Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

М.П. САРИНА, В.Н. ХОЛЯВКО

ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2019

УДК 535.1(075.8)
С 201

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент *А.В. Баранов*
канд. техн. наук, доцент *Ю.В. Соколов*

Работа подготовлена на кафедре прикладной
и теоретической физики для студентов I и II курсов
всех специальностей и всех форм обучения

Сарина М.П.

С 201 Волновая и квантовая оптика: учебное пособие / М.П. Сарина, В.Н. Холявко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 124 с.

ISBN 978-5-7782-3813-8

В пособии содержится набор тестовых заданий по разделам волновой и квантовой оптики. Кроме того, в нем изложен краткий теоретический материал по указанным разделам, приведены примеры решения тестовых заданий, а также варианты тестов с ответами. Пособие может быть использовано студентами и преподавателями при изучении раздела «Волновая и квантовая оптика» в курсе общей физики и для контроля знаний студентов при промежуточной или итоговой аттестации.

УДК 535.1(075.8)

ISBN 978-5-7782-3813-8

© Сарина М.П., Холявко В.Н., 2019
© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

В ходе процесса обучения студентов необходимо периодически контролировать усвояемость изученного материала и проверять знания студентов. Одним из видов такого контроля является тестирование, занимающее определенное положение во всем арсенале методов контроля знаний и компетенций студентов. Тестирование позволяет оценить широкий спектр знаний студентов, в то время как, например, контрольные работы оценивают глубину понимания пройденного материала, расчетно-графические задания оценивают умение применять полученные навыки в процессе обучения при решении задач и т. д. Кроме того, тестирование, используемое во время семестра, позволяет студентам выявить пробелы в своих знаниях и обратить на это внимание при подготовке к зачетам или экзаменам.

Настоящее учебное пособие организовано таким образом, что позволяет студенту повторить теорию по изучаемому разделу, потренироваться на примерах решения тестовых заданий, а затем проверить свои знания в тестах для самостоятельного решения.

Дидактическая единица «Волновая и квантовая оптика», по которой и подготовлено учебное пособие, содержит следующие разделы.

1. Волновая природа света. Интерференция волн.

2. Принцип Гюйгенса–Френеля. Дифракция на щели, дифракция на решетке. Метод зон Френеля.

3. Поляризация света. Закон Малюса. Оптически активные среды. Дисперсия света.

4. Законы теплового излучения. Гипотеза Планка о кванте энергии. Формула Планка.

5. Фотоэффект и его законы. Гипотеза светового кванта. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

6. Эффект Комптона. Световое давление. Корпускулярно-волновая природа электромагнитного излучения.

1. ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА

Оптика – это раздел физики, в котором изучаются природа света и различные световые явления.

Закон прямолинейного распространения света упоминается ещё в «Началах» Евклида: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Прямолинейное распространение света объясняет образование тени. Если между лампочкой и экраном поместить непрозрачный предмет, то на экране мы увидим темное пятно (тень), повторяющее форму непрозрачного предмета. Линии, вдоль которых распространяется световая энергия, называются ***лучами***.

Прямолинейно свет распространяется только в оптически однородной среде, когда же свет пересекает границу раздела двух сред, он изменяет направление (рис.1.1) – этот луч называется ***преломленным***. Кроме того, часть света возвращается обратно в первую среду, отражаясь от границы раздела. Этот луч называется ***отраженным***. Угол между нормалью к границе раздела и отраженным лучом называется ***углом отражения*** (i_1'), угол между нормалью и падающим лучом называется ***углом падения*** (i_1), угол между нормалью и преломленным лучом называется ***углом преломления*** (i_2).

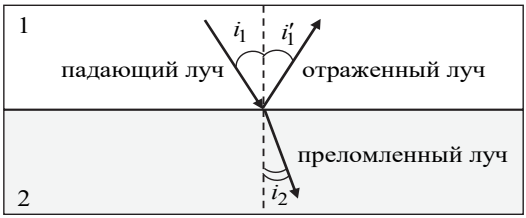


Рис. 1.1

Закон отражения света: отраженный и падающий луч, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный в точке падения, лежат в одной плоскости, при этом угол падения равен углу отражения:

$$i_1 = i_1' . \tag{1.1}$$

Закон преломления света: преломленный и падающий луч, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный в точке падения, лежат в одной плоскости, при этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления – величина постоянная для двух выбранных сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} . \tag{1.2}$$

Величина $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – называется ***относительным показателем преломления*** второй среды относительно первой, а n_1 и n_2 – ***абсолютные показатели преломления***. Абсолютные показатели преломления зависят от скорости распространения света в среде V_1 и V_2 :

$$n_1 = \frac{c}{V_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{c}{V_2} , \tag{1.3}$$

где c – скорость света в вакууме.

Среду с меньшим показателем преломления (с большей скоростью распространения света) называют ***оптически менее плотной***.

Если свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (из воды в воздух или из стекла в воздух), то угол преломления больше угла падения, и наоборот.

Примеры тестовых заданий

1. В какой из следующих прозрачных сред скорость света наименьшая: вода ($n = 1,3$), спирт ($n = 1,36$), глицерин ($n = 1,47$)? (n – абсолютный показатель преломления):

А) в спирте
Б) во всех этих средах скорость света одинакова
В) в воде
Г) в глицерине

Решение

Абсолютный показатель преломления n зависит от скорости распространения света в среде V:

$$n = \frac{c}{V},$$

где c – скорость света в вакууме. Откуда можно выразить скорость V:

$$V = \frac{c}{n}.$$

Скорость света в вакууме – постоянная величина $(c = \text{const})$, следовательно, скорость распространения света наименьшая в той среде, где наибольший показатель преломления. Из предложенного набора веществ наибольший показатель преломления света в глицерине, следовательно, правильный ответ Г) – глицерин.

Ответ: Г).

2. Пучок монохроматического света падает на три плоскопараллельные пластинки с разными показателями преломления. Ход лучей показан на рис. 1.2.

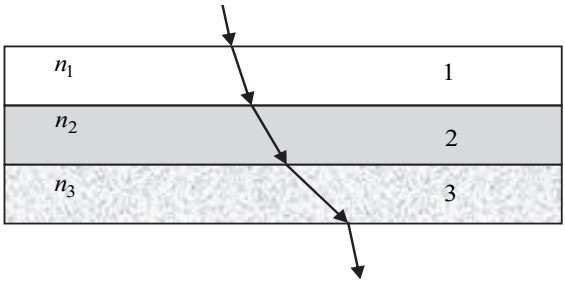


Рис. 1.2

Показатели преломления этих пластин соотносятся между собой:

А) $n_1 = n_2 = n_3$ В) $n_1 < n_2 < n_3$

Б) $n_1 > n_2 > n_3$ Г) $n_1 > n_2 < n_3$

Решение

При падении света на границу раздела двух диэлектриков выполняется закон преломления света:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления двух сред. Таким образом, чем выше показатель преломления среды, тем меньше угол между преломленным лучом и нормалью к границе раздела двух сред.

На границе 1 и 2 среды с показаниями преломления n_1 и n_2 луч больше отклонен от вертикали (нормали к поверхности двух сред) в среде 2, чем в среде 1. Поэтому $n_2 < n_1$.

На границе сред 2 и 3 с показаниями преломления n_2 и n_3 луч больше отклонен от вертикали в среде 3, чем в среде 2. Поэтому $n_3 < n_2$.

Объединяя два найденных условия, получим, что $n_1 > n_2 > n_3$, следовательно, правильный ответ Б).

Ответ: Б).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т1. Для света какого цвета показатель преломления воды является наибольшим?

А) зелёного В) красного

Б) фиолетового Г) жёлтого

Т2. В какой из следующих прозрачных сред скорость света наибольшая: вода ($n = 1{,}3$), спирт ($n = 1{,}36$), глицерин ($n = 1{,}47$)? (n – абсолютный показатель преломления)

А) в спирте В) в воде

Б) во всех этих средах скорость света одинакова Г) в глицерине

Т3. Какое электромагнитное излучение имеет наименьшую длину волны:

А) инфракрасное
Б) красное в видимой области спектра
В) фиолетовое в видимой области спектра
Г) ультрафиолетовое

Т4. Пучок монохроматического света падает на три плоскопараллельные пластинки с разными показателями преломления. Ход лучей показан на рис. 1.3.

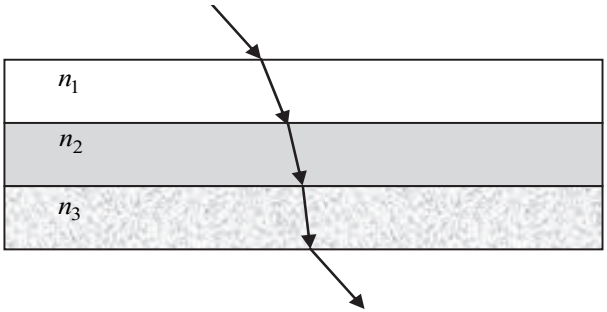


Рис. 1.3

Показатели преломления этих пластин соотносятся между собой:

А) $n_1 = n_2 = n_3$
Б) $n_1 > n_2 > n_3$
В) $n_1 < n_2 < n_3$
Г) $n_1 > n_2 < n_3$

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Многие оптические явления, например интерференция волн, наблюдаются только для когерентных волн. ***Когерентность*** – это согласованное протекание в пространстве и времени нескольких колебательных процессов. Чтобы две волны были когерентны, они должны иметь одинаковую частоту ($\omega_1 = \omega_2$) и постоянную разность фаз ($\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$), кроме того, колебания должны происходить в одной плоскости. Условию когерентности удовлетворяют ***монохроматические волны*** – неограниченные в пространстве волны одной определенной строго постоянной частоты (волны, распространяющиеся по гармоническому закону).

При наложении когерентных волн происходит перераспределение энергии, в результате чего образуется картина с чередованием максимумов и минимумов интенсивности. Это явление называется ***интерференцией***. Световая волна – это электромагнитная волна, в которой колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поскольку на электрические заряды среды, в которой распространяется свет, в первую очередь действует электрическое поле, то для изучения оптических явлений достаточно рассматривать поведение только одного вектора – вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$, его называют ***световым вектором***.

Рассмотрим две монохроматические световые волны, создаваемые точечными источниками света S_1 и S_2, распространяющиеся в оптически однородной среде.

Пусть интересующая нас точка пространства (точка *M*) находится на расстоянии s_1 от первого источника и на расстоянии s_2 от второго (рис. 2.1). Тогда в этой точке первая волна создаст колебания

$$E_1 = A_1 \cos\omega\left(t - \frac{s_1}{V}\right), \qquad (2.1)$$

где ω – частота колебаний источника (она одинакова для обоих источников, так как они когерентные); V – скорость распространения световой волны в среде; A_1 – амплитуда колебаний волны первого источника.

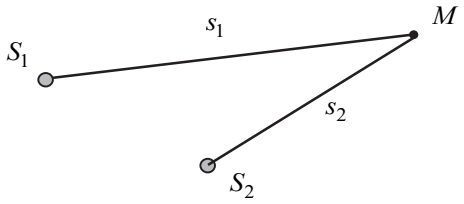


Рис. 2.1

Световая волна от второго источника создаст в точке M колебания

$$E_2 = A_2 \cos\omega\left(t - \frac{s_2}{V}\right), \qquad (2.2)$$

где A_2 – амплитуда колебаний волны второго источника.

Приходя в точку M, эти две волны складываются, и чтобы найти амплитуду результирующего колебания можно воспользоваться ***методом векторных диаграмм***.

В методе векторных диаграмм надо из точки O, взятой на оси x, отложить вектор, длина которого равна амплитуде колебаний A, повернутый относительно оси x на угол, равный начальной фазе колебаний φ. Первое колебание, например, будет изображаться на векторной диаграмме так, как показано на рис. 2.2.

Рис. 2.2

Результирующее колебание показано на рис. 2.3 и его амплитуда легко находится из теоремы косинусов:

$$\left|\vec{E}\right|^2 = \left|\vec{E}_1\right|^2 + \left|\vec{E}_2\right|^2 + 2\left|\vec{E}_1\right|\left|\vec{E}_2\right|\cos\delta\varphi\,,$$

$$A^2 = A_1{}^2 + A_2{}^2 + 2A_1A_2\cos\delta\varphi\,. \qquad (2.3)$$

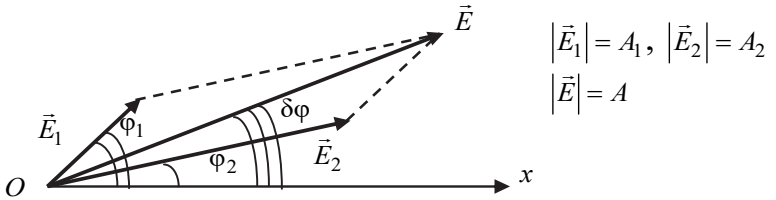


Рис. 2.3

Из выражения (2.3) видно, что результирующая амплитуда зависит от разности фаз колебаний $\delta\varphi$

$$\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega\left(\frac{s_1}{V} - \frac{s_2}{V}\right) = \frac{\omega}{V}(s_1 - s_2)\,. \qquad (2.4)$$

Измерительные приборы могут регистрировать только интенсивность света, а поскольку интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны $\left(I \sim \left|\vec{E}\right|^2\right)$, то в соответствии с (2.3) интенсивность результирующей волны

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi\,. \qquad (2.5)$$

Из уравнения (2.5) видно, что в случае когерентных волн интенсивность I зависит от разности фаз колебаний $\delta\varphi$ в точке *M*:

если $\cos\delta\varphi > 0$, то $I > I_1 + I_2$,

если $\cos\delta\varphi < 0$, то $I < I_1 + I_2$,

если $\cos\delta\varphi = 0$, то $I = I_1 + I_2$.

Когда волны не когерентны, величина $\cos\delta\varphi$ непрерывно меняется со временем и надо брать его среднее значение $\langle\cos\delta\varphi\rangle = 0$. В этом случае результирующая интенсивность – это просто сумма интенсивностей от каждого источника

$$I = I_1 + I_2 .$$

Именно поэтому, когда включаем в комнате две лампочки (некогерентные источники света), мы не наблюдаем чередования темноты и света, а просто регистрируем увеличение интенсивности (в комнате стало светлее).

Выше был рассмотрен случай, когда волны распространяются в оптически однородной среде. В общем случае первая волна может распространяться в среде с показателем преломления n_1, а вторая – в среде с показателем преломления n_2. Тогда разность фаз:

$$\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega\left(\frac{s_1}{V_1} - \frac{s_2}{V_2}\right) = \frac{\omega}{c}\left(n_1 s_1 - n_2 s_2\right) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 s_1 - n_2 s_2), \quad (2.6)$$

где учтены соотношения $V = \frac{c}{n}$ (c – скорость света) и $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ – длина волны в вакууме).

В интерференционных схемах луч проходит от источника света к точке наблюдения различными путями. Произведение длины пути на показатель преломления (ns) называют ***оптической длиной пути***, а разность оптических длин интерферирующих лучей $\Delta = n_1 s_1 - n_2 s_2$ называют ***оптической разностью хода***.

Оптическую разность хода Δ можно выразить через разность фаз из уравнения (2.6):

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta .$$

Если $\Delta = m\lambda$, то $\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} m\lambda = 2\pi m$, $(m = 0, \pm1, \pm2, \ldots)$, и $\cos\delta\varphi = 1$, тогда согласно уравнению (2.5) результирующая интенсивность $I > I_1 + I_2$, и мы имеем максимум интенсивности (светлое пятно).

Таким образом, ***если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме***, ***мы наблюдаем максимум интенсивности*** (волны приходят в фазе и усиливают друг друга):

$$\Delta = m\lambda\ ,\ (m = 0, \pm 1, \pm 2, ...). \tag{2.7}$$

Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн в вакууме, ***мы наблюдаем минимум интенсивности*** (волны приходят в противофазе и ослабляют друг друга):

$$\Delta = \frac{2m+1}{2}\lambda\ \ (m = 0, \pm 1, \pm 2, ...). \tag{2.8}$$

Интерференция света от двух источников

Интерференционную картину можно получить, например, от двух когерентных источников, что было осуществлено в опыте Юнга. Когерентные лучи получаются путем разделения света от одного источника на два пучка. Свет от источника с длиной волны λ, прошедший через узкую щель, попадает на непрозрачный экран с двумя щелями, расстояние между которыми d (рис. 2.4). Эти щели служат в качестве когерентных источников света. Интерференция наблюдается на экране в области, где пучки света перекрываются. Расстояние от экрана до щелей обозначим L. Наблюдаемая интерференционная картина – это чередование темных и светлых полос.

Для того чтобы выяснить, что мы будем наблюдать в точке A, удаленной на расстояние X от центра экрана, необходимо рассчитать разность хода Δ. Различимая интерференционная картина может наблюдаться, когда $d \ll L$. Легко показать, что в этом случае

$$\Delta = s_2 - s_1 = \frac{Xd}{L}\ . \tag{2.9}$$

Максимумы интенсивности (светлые полосы) будут наблюдаться в тех точках на экране, где разность хода должна равняться целому числу длин волн $(\Delta = \pm m\lambda\ ,\ m = 0,1,2....)$, и их координаты

$$X_{m\max} = \pm\frac{m\lambda L}{d},\ \ m = 0,1,2.... \tag{2.10}$$

В центре экрана $(m=0)$ будет наблюдаться максимум интенсивности (светлая полоса). При $m=1$ будут наблюдаться максимумы первого порядка, расположенные в точках с координатами $X_{1\ \max}=\pm\dfrac{\lambda L}{d}$ по обе стороны от центрального максимума, при $m=2$ будут наблюдаться максимумы второго порядка и т. д.

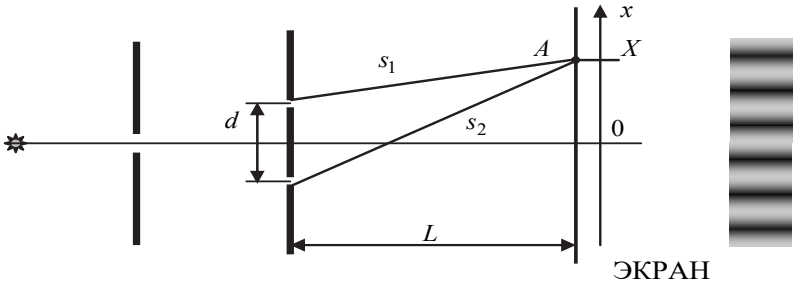


Рис. 2.4

Минимумы интенсивности (темные полосы) будут наблюдаться в тех точках на экране, где разность хода равняется полуцелому числу длин волн, и их координаты

$$X_{m\min}=\pm\frac{(2m+1)}{2}\frac{\lambda L}{d}\ ,\ m=0,1,2....\qquad(2.11)$$

Ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними темными или светлыми полосами) – разность между координатами соседних максимумов (минимумов)

$$\Delta X=\frac{\lambda L}{d}.\qquad(2.12)$$

Таким образом, ширина интерференционной полосы зависит от длины волны падающего света: ***чем больше длина волны*** λ, ***тем шире интерференционная полоса***.

Интерференция света в плоскопараллельных пластинах

Интерференционную картину в тонких пленках легко наблюдать без применения специального оптического оборудования. Радужную окраску имеют мыльные пленки, тонкие пленки нефти, плавающие на поверхности воды, поверхности предметов, покрытых тонким слоем окисла. Все эти явления возникают при интерференции двух когерентных волн, отраженных от нижней и верхней границы пленки.

Ход луча света, падающего под углом i_1 на тонкую плоскопараллельную пластинку с показателем преломления n и толщиной d, изображен на рис. 2.5. Пластинка находится в среде с меньшим показателем преломления, чем у нее (например воздух, для которого показатель преломления можно считать равным единице). Падающий на пластинку луч света разделится на два луча: преломленный (луч AB) и отраженный от верхней грани пластинки (луч 1). Преломленный луч, дойдя до нижней грани пластинки, также отражается (луч BC) и, преломляясь на верхней грани, выходит из пластинки (луч 2).

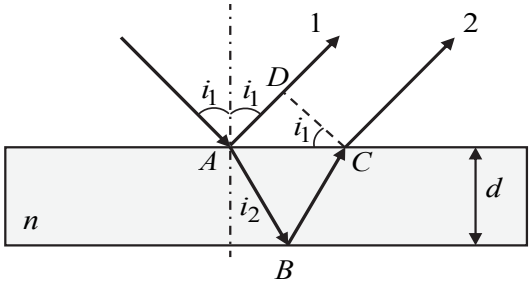


Рис. 2.5

Лучи 1 и 2 параллельны и когерентны и дают интерференционную картину, которую можно наблюдать либо в бесконечности, либо, поставив на их пути собирающую линзу, в фокус которой помещен экран. Вид интерференционной картины зависит от оптической разности хода Δ интерферирующих лучей

$$\Delta = s_2 n - \left(s_1 \cdot 1 + \frac{\lambda}{2} \right), \qquad (2.13)$$

где $s_2 = AB + BC = 2AB$, $s_1 = AD$.

Дополнительная разность хода $\frac{\lambda}{2}$ появляется из-за того, что луч 1 отражается от оптически более плотной среды, при этом его фаза изменяется на π, что эквивалентно появлению дополнительной разности хода $\frac{\lambda}{2}$.

Разность хода можно вычислить (см. рис. 2.5):

$$\Delta = 2dn\cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}. \qquad (2.14)$$

Чтобы в точке наблюдения мы видели светлое пятно (максимум), разность хода должна равняться целому числу длин волн в вакууме:

$$2dn\cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = m\lambda,\ \ m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots. \qquad (2.15)$$

Чтобы в точке наблюдения мы видели темное пятно (минимум), разность хода должна равняться полуцелому числу длин волн в вакууме:

$$2dn\cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = \frac{2m+1}{2}\lambda,\ \ m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots. \qquad (2.16)$$

Если наблюдение проводить в белом свете, то для одних длин волн будет выполняться условие максимума, а для других – условие минимума, поэтому в отраженном свете пленка кажется окрашенной.

Кольца Ньютона

Когда тонкая пластинка (пленка) имеет переменную толщину, то в этом случае интерференционная картина, полученная при отражении, называется ***полосами равной толщины***. Классическим примером такой картины являются кольца Ньютона. Кольца Ньютона получаются на установке, изображенной на рис. 2.6. Плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны R помещается на плоскопараллельную пластину. Свет падает нормально на плоскую поверхность линзы, частично отражается на границе линзы и воздушного зазора (луч 1), преломляется в воздушный зазор и отражается от верхней плоскости плоскопараллельной пластины (луч $1'$). Роль тонкой пленки, от которой

отражаются когерентные волны, играет воздушный зазор между пластинкой и линзой.

В результате наложения лучей 1 и 1′ получается интерференционная картина в виде концентрических колец, показанная на рис. 2.7. Интенсивность колец уменьшается по мере удаления от центра. В центре интерференционной картины наблюдается темное пятно.

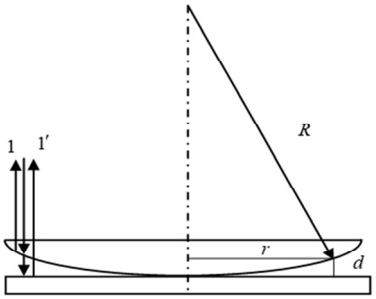


Рис. 2.6

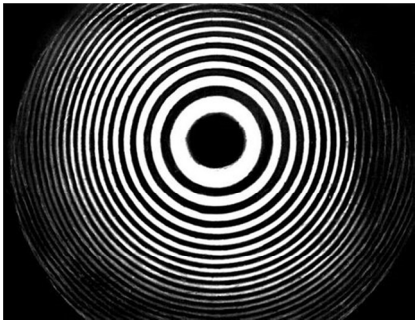


Рис. 2.7

Оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей 1 и 1′ в месте, где толщина воздушного зазора d,

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \tag{2.17}$$

(дополнительная разность хода $\frac{\lambda}{2}$ появляется при отражении от верхней грани плоскопараллельной пластины (оптически более плотная среда)). В (2.17) учтено, что показатель преломления воздуха $n = 1$, если же в пространство между линзой и пластиной залить жидкость с показателем преломления $n_{\text{ж}}$, то оптическая разность хода станет

$$\Delta = 2dn_{\text{ж}} + \frac{\lambda}{2}.$$

Чтобы получился интерференционный минимум (темное пятно), должно выполняться условие

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2},\ 2d = m\lambda. \tag{2.18}$$

С другой стороны, из рис. 2.6 видно, что

$$R^2 = r^2 + (R-d)^2 .$$

Раскрывая скобки, получим

$$R^2 = r^2 + R^2 - 2Rd + d^2 . \qquad (2.19)$$

Слагаемым d^2 можно пренебречь в силу малости, и после подстановки формулы (2.18) в (2.19) и очевидных преобразований получим радиус m темного кольца

$$r^2 = 2Rd = Rm\lambda ,$$

$$r_{\text{темн}} = \sqrt{Rm\lambda}, \ \ m = 0, 1, 2, \ldots . \qquad (2.20)$$

Из (2.20) видно, что в центре интерференционной картины должно находиться темное пятно – минимум нулевого порядка, что и видно на рис. 2.7.

Для светлых колец должно выполняться условие интерференционного максимума

$$2d + \frac{\lambda}{2} = m\lambda , \ 2d = \lambda\left(m - \frac{1}{2} \right). \qquad (2.21)$$

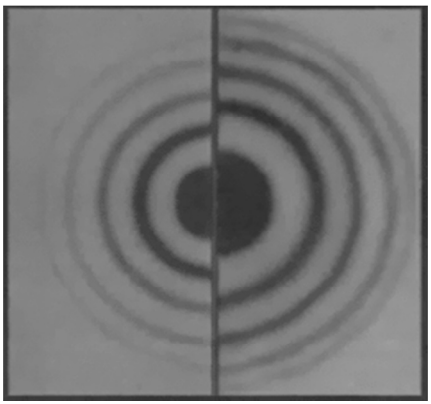


Рис. 2.8

Радиусы светлых колец

$$r_{\text{светл}} = \sqrt{R\lambda\left(m - \frac{1}{2}\right)},\ m = 1, 2, \ldots\ . \qquad (2.22)$$

Радиусы светлых и темных колец зависят от длины волны света. Чем больше длина волны, тем больше радиусы колец, что хорошо видно на рис. 2.8, где показаны кольца Ньютона при освещении зеленым (слева) и красным светом (справа).

Отметим, что приведенные рассуждения относятся к интерференции в отраженном свете.

Примеры тестовых заданий

1. Электромагнитная волна, в которой световой вектор меняется по закону $E_1 = E_0 \cos\omega t$, интерферирует со второй волной, в которой световой вектор колеблется по одному из законов, приведенных ниже. В каком случае результирующая интенсивность будет наибольшей?

А) $E_2 = E_0 \cos\omega t$ В) $E_2 = 2E_0 \cos\omega t$

Б) $E_2 = E_0 \cos(\omega t + \pi)$ Г) $E_2 = 2E_0 \cos(\omega t + \pi)$

Решение

При наложении двух когерентных волн происходит интерференция. Амплитуда результирующего колебания определяется амплитудами каждого колебания и их разностью фаз $\delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$:

$$\left|\vec{E}\right|^2 = \left|\vec{E}_1\right|^2 + \left|\vec{E}_2\right|^2 + 2\left|\vec{E}_1\right|\left|\vec{E}_2\right|\cos\delta\varphi\ .$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Поэтому интенсивность результирующего колебания можно записать как

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi\ .$$

Вычислим интенсивность результирующего колебания для каждого предложенного варианта уравнений колебаний второй волны:

А) $I_1 = E_0^2$, $I_2 = E_0^2$, $\delta\varphi$=0, $\cos\delta\varphi = 1$,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi = E_0^2 + E_0^2 + 2\sqrt{E_0^2 E_0^2}\cdot 1 = 4E_0^2;$$

Б) $I_1 = E_0^2$, $I_2 = E_0^2$, $\delta\varphi = \pi$, $\cos\delta\varphi = -1$,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi = E_0^2 + E_0^2 - 2\sqrt{E_0^2 E_0^2} = 2E_0^2 - 2E_0^2 = 0,$$

В) $I_1 = E_0^2$, $I_2 = 4E_0^2$, $\delta\varphi = 0$, $\cos\delta\varphi = 1$,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi = E_0^2 + 4E_0^2 + 2\sqrt{E_0^2 4E_0^2}\cdot 1 = 9E_0^2,$$

Г) $I_1 = E_0^2$, $I_2 = 4E_0^2$, $\delta\varphi = \pi$, $\cos\delta\varphi = -1$,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\delta\varphi = E_0^2 + 4E_0^2 - 2\sqrt{E_0^2 \cdot 4E_0^2} = E_0^2.$$

Очевидно, что максимальная интенсивность будет в случае В).

Ответ: В).

2. Если в данной точке пространства оптическая разность хода интерферирующих лучей равна λ_0 (λ_0 – длина волны в вакууме), то в этой точке будет наблюдаться…

А) минимум интенсивности света
Б) максимум интенсивности света
В) интенсивность не изменится
Г) интенсивности лучей вычитаются

Решение

Разность хода Δ связана с разностью фаз колебаний (см. формулу (2.6))

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta.$$

Если для разности фаз колебаний выполняется условие $\cos\delta\varphi = 1$ ($\delta\varphi = 2\pi m$, $m = 0,1,2,...$), то мы имеем максимум интенсивности (светлое пятно). Оптическая разность хода Δ при этом должна равняться целому числу длин волн $\Delta = m\lambda$ (волны приходят в выбранную точку пространства в фазе).

По условию задачи оптическая разность хода равна одной длине волны, следовательно, в точке наблюдения будет максимум интенсивности света, и правильный ответ будет Б).

Ответ: Б).

3. На экране наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников света, удаленных на одинаковое расстояние от экрана (опыт Юнга). Если источники испускают свет в фазе, то минимум второго порядка будет наблюдаться в точке, где разность хода лучей равна (λ –длина волны)…

А) λ

Б) $\frac{\lambda}{2}$

В) $5\frac{\lambda}{2}$

Г) $3\frac{\lambda}{2}$

Решение

Минимумы интенсивности в опыте Юнга наблюдаются в тех точках экрана, где разность хода лучей от источников равна полуцелому числу длин волн $\Delta = \frac{2m+1}{2}\lambda$. Для минимума второго порядка $m = 2$, следовательно, разность хода $\Delta = \frac{2 \cdot 2 + 1}{2}\lambda = \frac{5}{2}\lambda$. Правильный ответ В).

Ответ: В).

4. Во сколько раз изменится ширина интерференционной полосы при наблюдении на экране интерференции от двух щелей, если монохроматический источник излучения, излучающего зеленый свет с длиной волны $\lambda_1 = 0,5$ мкм, заменить на красный с длиной волны $\lambda_2 = 0,65$ мкм:

А) увеличится в 1,3 раза

Б) не изменится

В) уменьшится в 1,3 раза

Г) увеличится в 2,6 раза

Решение

Ширина интерференционной полосы в опыте Юнга пропорциональна длине волны падающего света. ***Чем больше длина волны*** λ, ***тем шире интерференционная полоса***:

$$\Delta X = \frac{\lambda L}{d}.$$

Если освещать щели зеленым светом с длиной волны λ_1, то ширина интерференционной полосы будет

$$\Delta X_1 = \frac{\lambda_1 L}{d}.$$

При замене источника света на красный с длиной волны λ_2 ширина интерференционной полосы изменится и станет равной

$$\Delta X_2 = \frac{\lambda_2 L}{d}.$$

Расстояние от источников до экрана (L) и расстояние между источниками (d) при этом не изменились.

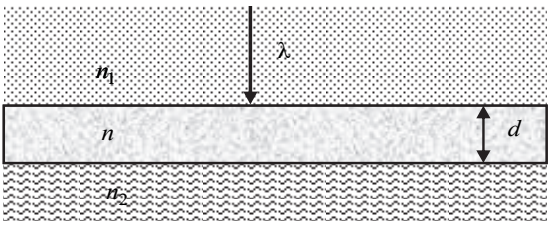
Найдем отношение ширины интерференционных полос

$$\frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} = \frac{\lambda_2 L}{d} \Big/ \frac{\lambda_1 L}{d} = \frac{\lambda_2 L d}{\lambda_1 L d} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{0,65}{0,5} = 1,3.$$

Таким образом, ширина интерференционной полосы увеличится в 1,3 раза. Выбираем из предложенных вариантов ответа правильный – это А).

Ответ: А).

5. Тонкая стеклянная пластинка толщиной d с показателем преломления n помещена между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2, причем ($n_1 < n < n_2$). На пластинку нормально падает монохроматический свет с длиной волны λ. Оптическая разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней границ пластины:



А) 0

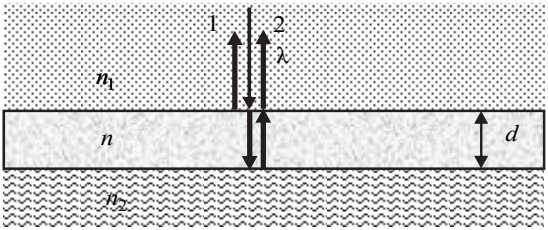
Б) $2dn$

В) $2dn_1$

Г) $2dn - \frac{\lambda}{2}$

Решение

Изобразим ход лучей в пластинке:



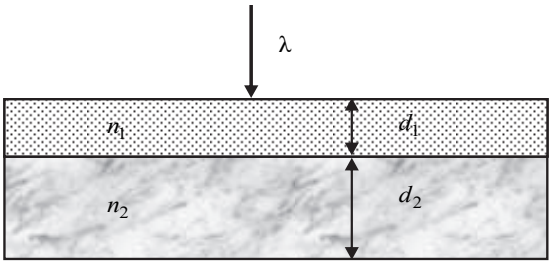
Луч 1 отражается от верхней грани пластинки. По условию показатель преломления пластинки больше показателя преломления верхней среды $n > n_1$, поэтому при отражении от верхней границы у луча 1 фаза скачком меняется на π, что соответствует появлению дополнительной оптической длины пути $L_1 = \frac{\lambda}{2}$.

Луч 2 – это преломленный луч. Из-за того что свет падает на пластинку нормально (перпендикулярно к поверхности), то и преломленный луч также перпендикулярен к поверхности пластинки. Этот луч проходит в пластинке расстояние d от верхней границы до нижней, затем отражается от нижней границы и проходит расстояние d на обратном пути к верхней грани пластинки. При отражении от среды с большим показателем преломления $(n_2 > n)$ у луча 2 также появляется дополнительная оптическая длина пути $\frac{\lambda}{2}$. Таким образом, оптическая дина пути второго луча $L_2 = 2dn + \frac{\lambda}{2}$.

Разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней границы пластины, $\Delta = L_2 - L_1 = 2dn + \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} = 2dn$. Правильный ответ Б).

Ответ: Б).

6. Монохроматический свет падает нормально на две плоскопараллельные пластинки толщиной $d_1 = 2$ мм и $d_2 = 3$ мм. Показатели преломления пластин $n_1 = 1{,}3$ и $n_2 = 1{,}5$ соответственно. Оптическая длина пути прошедшего через пластины света…



А) 2,6 мм
Б) 7,5 мм
В) 7,1 мм
Г) 6,9 мкм

Решение

По условию задачи свет падает на пластинки нормально, поэтому преломленный луч пойдет через две плоскопараллельные пластинки по нормали к их поверхностям. В первой среде оптическая длина пути луча $L_1 = d_1 n_1$, во второй среде – $L_2 = d_2 n_2$. Суммарная оптическая длина пути прошедшего через обе пластинки света:

$$L = L_1 + L_2 = d_1 n_1 + d_2 n_2 .$$

После подстановки численных значений получим

$$L = d_1 n_1 + d_2 n_2 = 2 \cdot 1{,}3 + 3 \cdot 1{,}5 = 7{,}1 \text{ мм} .$$

Выбираем правильный ответ из предложенных вариантов: В).

Ответ: В).

7. Минимум пропускания света с длиной волны 600 нм будет наблюдаться при прохождении через пленку с показателем преломления 1,2 минимальной толщиной …

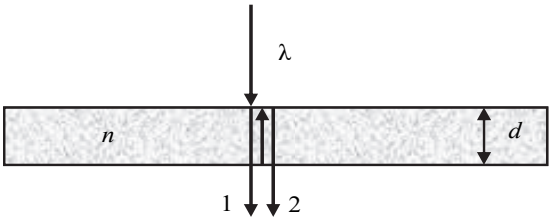
А) $1{,}25 \cdot 10^{-7}$ м
Б) $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ м
В) $3{,}75 \cdot 10^{-7}$ м
Г) $5 \cdot 10^{-7}$ м

Решение

Ход лучей при интерференции в проходящем свете (при нормальном падении света на пленку) показан на рисунке.

Луч 1 – это преломленный падающий луч, который имеет оптическую длину пути $L_1 = dn$. Луч 2 – это луч, часть преломленного в пленку луча 1, отраженная сначала от нижней границы пленки, а затем

от верхней границы пленки. Его оптическая длина пути $L_2 = 3dn$. На верхней и нижней границе пленки отражение происходит от оптически менее плотной среды, поэтому дополнительная разность хода не появляется (так как не происходит изменения фазы скачком на π).



Разность хода лучей

$$\Delta = L_2 - L_1 = 3dn - dn = 2dn\,.$$

Минимум интенсивности света появляется в том случае, если оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн в вакууме:

$$\Delta = 2dn = \frac{2m+1}{2}\lambda,\ \ m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots .$$

Минимальная толщина пленки d соответствует значению $m = 0$. Тогда

$$2d_{\min} n = \frac{\lambda}{2},$$

откуда

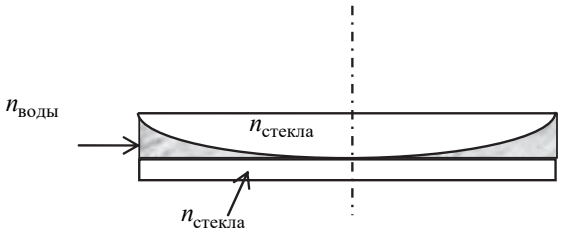
$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{600 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,2} = 1,25 \cdot 10^{-7}\ \text{м}.$$

Правильный ответ А).

Ответ: А).

8. Кольца Ньютона наблюдаются в установке, в которой между линзой и стеклянной пластинкой находится вода, показатели преломления воздуха, воды и стекла удовлетворяют неравенствам

$n_{\text{возд}} = 1 < n_{\text{воды}} < n_{\text{стекла}}$. Наблюдение ведется в отраженном свете. Радиусы темных колец Ньютона определяются по следующей формуле:



А) $r_k = \sqrt{\dfrac{k\lambda R}{n_{\text{воды}}}}$

Б) $r_k = \sqrt{k\lambda R}$

В) $r_k = \sqrt{(2k-1)\lambda R}$

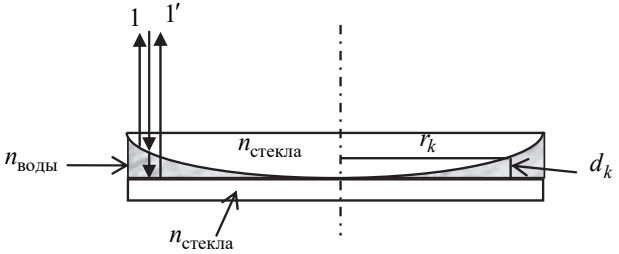
Г) $r_k = \sqrt{\dfrac{(2k-1)\lambda R}{2n_{\text{воды}}}}$

Решение

Темное кольцо Ньютона с номером k и радиусом r_k получается в том месте, где толщина воды d_k. При этом оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей 1 и 1′

$$\Delta = \Delta_{1'} - \Delta_1 = 2d_k n_{\text{воды}} + \frac{\lambda}{2}$$

(дополнительная разность хода $\dfrac{\lambda}{2}$ появляется при отражении луча 1′ от верхней грани плоскопараллельной пластины ($n_{\text{воды}} < n_{\text{стекла}}$)). Луч 1 на границе линза–вода отражается от оптически менее плотной среды, поэтому там не появляется дополнительная разность хода.



Чтобы получился интерференционный минимум (темное пятно), должно выполняться условие:

$$\Delta = 2d_k n_{\text{воды}} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

$$2d_k n_{\text{воды}} = k\lambda, \quad d_k = \frac{k\lambda}{2n_{\text{воды}}}.$$

Радиусы темных колец Ньютона связаны с переменной толщиной пленки геометрическим соотношением

$$R^2 = r_k{}^2 + (R - d_k)^2,$$

или, пренебрегая малым слагаемым d_k^2,

$$r_k{}^2 = 2Rd_k,$$

$$r_k{}^2 = 2R\frac{k\lambda}{2n_{\text{воды}}} = \frac{Rk\lambda}{n_{\text{воды}}},$$

$$r_k = \sqrt{\frac{Rk\lambda}{n_{\text{воды}}}}.$$

Сравнивая полученную формулу с предложенными вариантами ответа, выбираем правильный – это А).

Ответ: А).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т5. Электромагнитная волна, в которой световой вектор меняется по закону $E_1 = E_0 \cos\omega t$, интерферирует со второй волной, в которой световой вектор колеблется по одному из приведенных ниже законов. В каком случае результирующая интенсивность будет наименьшей?

А) $E_2 = E_0 \cos\omega t$

Б) $E_2 = E_0 \cos(\omega t + \pi)$

В) $E_2 = 2E_0 \cos\omega t$

Г) $E_2 = 2E_0 \cos(\omega t + \pi)$

Т6. Если в данной точке пространства оптическая разность хода интерферирующих лучей равна $\frac{\lambda_0}{2}$ (λ_0 – длина волны в вакууме), то в этой точке будет наблюдаться …

А) минимум интенсивности света

Б) максимум интенсивности света

В) интенсивность не изменится

Г) интенсивности лучей складываются

Т7. На экране наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников света (опыт Юнга). Светлые полосы на экране появляются в тех местах, где разность фаз двух лучей (m – целое число)…

А) $2\pi m$

Б) $2\pi m + \pi/8$

В) $2\pi m + \pi$

Г) $2\pi m + \pi/2$

Т8. На экране наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников света, удаленных на одинаковое расстояние от экрана (опыт Юнга). Расстояние между источниками $d = 1$ мм. Расстояние от источников до экрана $L = 5$ м. Длина волны света $\lambda = 500$ нм. В этом случае ширина интерференционной полосы будет составлять:

А) 0,1 см

Б) 0,25 см

В) 0,5 см

Г) 1 см

Д) 2 см

Т9. Монохроматический свет падает нормально на тонкую мыльную пленку, находящуюся в воздухе. Если d – толщина пленки, а n – показатель преломления пленки, то,при какой длине волны падающего света λ отраженный свет будет максимально усилен…

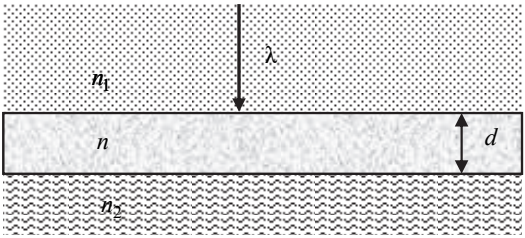
А) $\lambda = dn$

Б) $\lambda = 4dn$

В) $\lambda = 2dn$

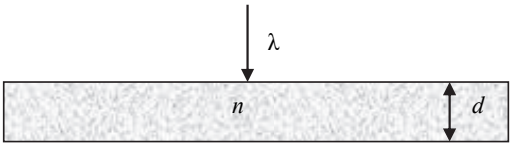
Г) $\lambda = 3dn$

Т10. Тонкая стеклянная пластинка толщиной d с показателем преломления n помещена между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2, причем ($n_1 > n < n_2$). На пластинку нормально падает монохроматический свет с длиной волны λ. Разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней границ пластины …



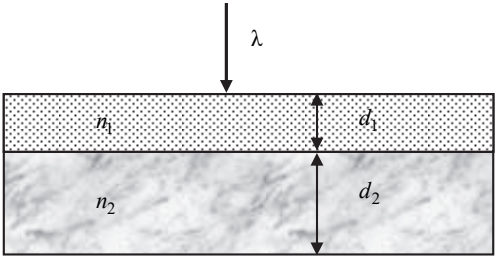
А) 0
Б) $2dn$
В) $2dn_1$
Г) $2dn-\frac{\lambda}{2}$

Т11. Световая волна распространяется в воздухе. Если на ее пути поставить плоскопараллельную пластинку толщиной $d=1$ мм с показателем преломления $n=1,5$ (свет падает на пластинку нормально), то оптическая длина пути изменится следующим образом:



А) увеличится на 0,5 мм
Б) не изменится
В) увеличится на 3 мм
Г) увеличится на 1,5 мм

Т12. Монохроматический свет падает нормально на две плоскопараллельные пластинки толщиной $d_1=2$ мм и $d_2=3$ мм. Показатели преломления пластин $n_1=1,2$ и $n_2=1,3$ соответственно. Оптическая длина пути…

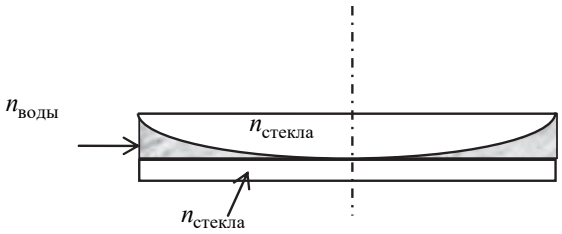


А) 2,6 мм
Б) 7,5 мм
В) 6,3 мм
Г) 7,1 мкм

Т13. Максимум пропускания света с длиной волны 600 нм будет наблюдаться при прохождении через пленку с показателем преломления 1,2 минимальной толщиной…

А) $1{,}25\cdot10^{-7}$ м
Б) $2{,}5\cdot10^{-7}$ м
В) $3{,}75\cdot10^{-7}$ м
Г) $5\cdot10^{-7}$ м

Т14. Кольца Ньютона наблюдаются в установке, в которой между линзой и стеклянной пластинкой находится вода, показатели преломления воздуха, воды и стекла удовлетворяют неравенствам $n_{\text{возд}} = 1 < n_{\text{воды}} < n_{\text{стекла}}$. Наблюдение ведется в отраженном свете. Радиусы светлых колец Ньютона определяются по следующей формуле:



А) $r_k = \sqrt{\dfrac{k\lambda R}{n_{\text{воды}}}}$
Б) $r_k = \sqrt{k\lambda R}$
В) $r_k = \sqrt{(2k-1)\lambda R}$
Г) $r_k = \sqrt{\dfrac{(2k-1)\lambda R}{2n_{\text{воды}}}}$

3. ДИФРАКЦИЯ

Дифракция – огибание волной препятствия, встречающегося на ее пути с последующим интерференционным перераспределением энергии. Благодаря дифракции волны попадают в область геометрической тени, проникают через небольшие отверстия и т. д.

Если на пути параллельного пучка света поставить круглое препятствие (диск, шарик), то на экране, расположенном достаточно далеко от препятствия, появится дифракционная картина в виде чередующихся темных и светлых колец. Если на пути параллельного пучка света поставить прямолинейное препятствие (щель, нить, край плоскости), то на экране появится дифракционная картина в виде чередующихся темных и светлых полос.

В общем случае расчет дифракционной картины – очень трудоемкая задача. Однако в случаях, отличающихся симметрией, задача упрощается, если применить так называемый ***метод зон Френеля***.

Рассмотрим точечный источник S, создающий монохроматическую сферическую волну. Найдем амплитуду волны, получающуюся в точке наблюдения M (рис. 3.1).

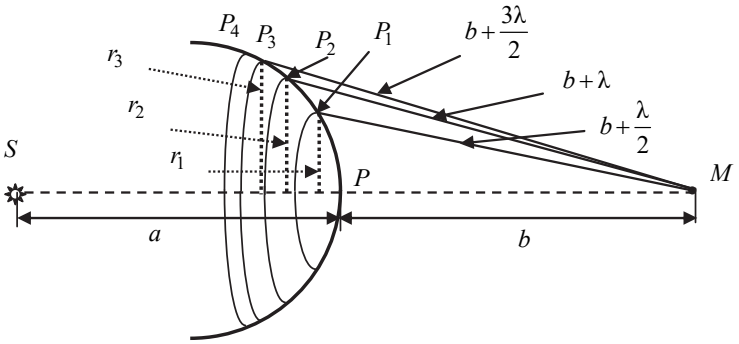


Рис. 3.1

Каждая точка волнового фронта, согласно принципу Гюйгенса–Френеля, становится источником когерентных вторичных волн, которые в результате интерференции определяют амплитуду волны в точке *M*. Френель предложил разбить волновой фронт на кольцевые зоны (***зоны Френеля***) по следующему правилу: расстояние от краев соседних зон (точки *P*, P_1, P_2...) до точки *M* должно отличаться на $\frac{\lambda}{2}$. Если кратчайшее расстояние от точки наблюдения *M* до волнового фронта

$$PM = b\,,$$

то

$$P_1M = b + \frac{\lambda}{2},\ P_2M = b + 2\frac{\lambda}{2},\ P_3M = b + 3\frac{\lambda}{2},\ P_4M = b + 4\frac{\lambda}{2},\ldots$$

При таком разбиении колебания от соседних зон приходят в точку *M* в противофазе

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 \pm \ldots, \qquad (3.1)$$

где A_i – амплитуда колебаний от i зоны.

Можно показать, что радиус внешней границы m – зоны Френеля вычисляется по формуле

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{(a+b)}\lambda m}\,, \qquad (3.2)$$

где a – радиус волнового фронта.

Если источник света находится на бесконечности $(a = \infty)$, как в случае плоской волны, то радиус r_m внешней границы m зоны Френеля

$$r_m = \sqrt{bm\lambda}\,. \qquad (3.3)$$

Дифракция на круглом отверстии

Рассмотрим сферическую волну, распространяющуюся от точечного источника S. Наблюдение ведется на экране в точке M. На пути волны находится непрозрачный экран с круглым отверстием радиусом r (рис. 3.2). Расстояние от непрозрачного экрана до точки наблюдения b.

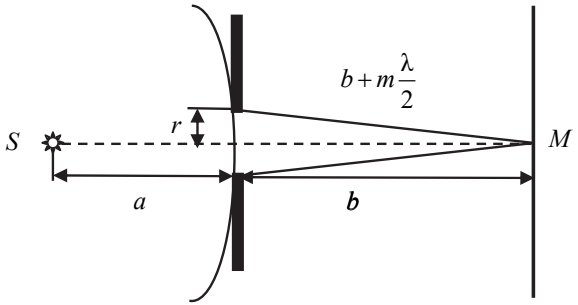
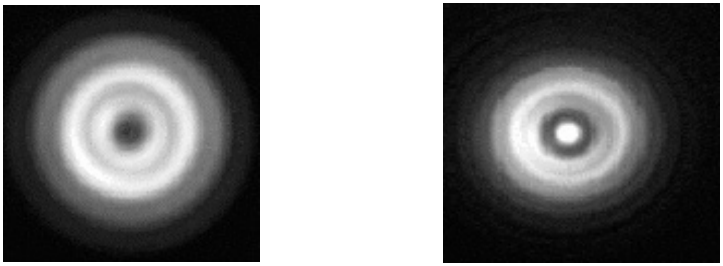


Рис. 3.2

Если разбить открытую часть волновой поверхности на зоны Френеля, то можно найти, что результирующая амплитуда определяется формулой

$$A=\frac{A_1}{2}\pm\frac{A_m}{2}, \tag{3.4}$$

где знак «+» соответствует нечетным m, знак «–» соответствует четным m (m – номер последней зоны Френеля).



а *б*

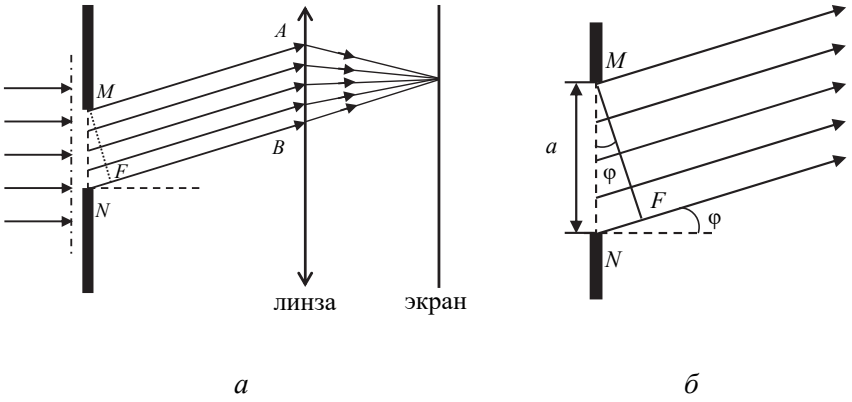
Рис. 3.3

Если отверстие открывает нечетное число зон Френеля, то мы наблюдаем в центре экрана (точка *M*) светлое пятно (рис. 3.3, *б*) – максимум интенсивности. Если отверстие открывает четное число зон Френеля, то мы наблюдаем в центре экрана темное пятно – минимум интенсивности (рис. 3.3, *а*). Центральное пятно окружено чередующимися темными и светлыми концентрическими кольцами.

Дифракция Фраунгофера на узкой бесконечной щели

Дифракция Фраунгофера (дифракция в параллельных лучах) наблюдается в том случае, когда источник и точка наблюдения расположены достаточно далеко от препятствия. Это можно осуществить на узкой щели, поместив источник в фокальной плоскости собирающей линзы, а экран расположить в фокальной плоскости другой собирающей линзы (рис. 3.4, *а*).

Рассмотрим дифракцию на узкой бесконечной щели шириной a. Пусть на щель падает нормально (перпендикулярно плоскости щели) плоская монохроматическая волна.



а *б*

Рис. 3.4

Согласно принципу Гюйгенса–Френеля каждая точка волновой поверхности становится источником когерентных вторичных волн, и результат их интерференции даст распределение интенсивности на экране. Поскольку на щель падает нормально плоская волна, то все точки, расположенные в плоскости щели, колеблются в одинаковой

фазе. Следовательно, интерференция будет определяться только разностью хода лучей от различных участков щели. Линза не создает дополнительной разности хода, поэтому разность хода от различных участков щели появится только до линзы.

Если разбить щель на зоны Френеля, имеющие вид узких полос, и вычислить разность хода Δ от краев щели (рис. 3.4, *б*)

$$\Delta = NF = a\sin\varphi,$$

то можно получить условие ***интерференционного минимума*** (при четном количестве зон Френеля)

$$a\sin\varphi = \pm 2m\frac{\lambda}{2}, \quad m = 1,2,3,... \tag{3.5}$$

и ***интерференционного максимума*** (при нечетном количестве зон Френеля)

$$a\sin\varphi = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0,1,2,3, \tag{3.6}$$

где m – номер минимума (максимума). В центре экрана ($\varphi = 0$) мы наблюдаем ***центральный максимум***.

Дифракционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых полос (рис. 3.5). В центре экрана расположен самый светлый центральный максимум, по обе стороны от центрального максимума расположены последовательно максимумы первого порядка, второго порядка и т. д.

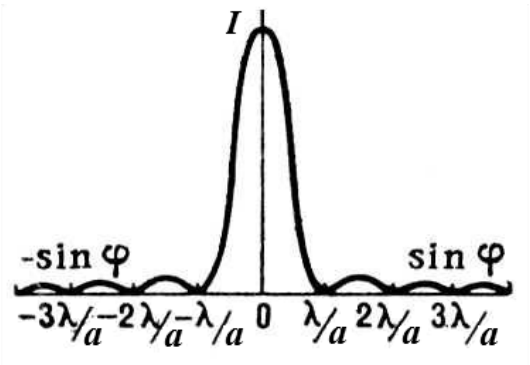


Рис. 3.5

Расчеты показывают, что отношение интенсивностей в центральном и последующих максимумах 1:0,047:0,017:0,0083…., т. е. основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме.

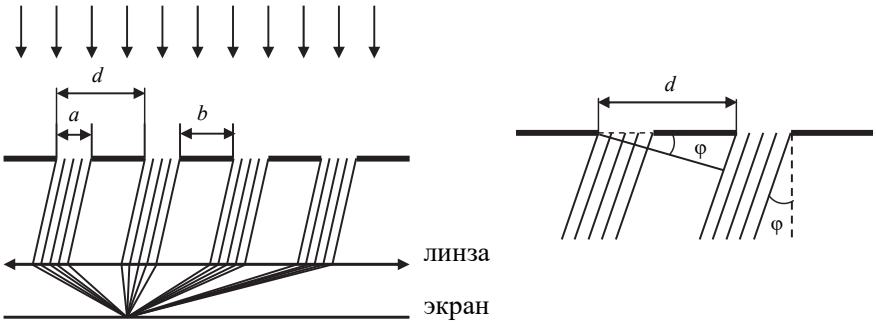
Ширина центрального максимума – это расстояние между первыми симметричными минимумами. Угол, под которым виден первый минимум

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\pm\frac{\lambda}{a}\right),$$

уменьшается при увеличении размера щели, т. е. центральный максимум становится у́же. При $a \gg \lambda$ на экране получаем четкое изображение источника света, так как в этом случае дифракции нет.

Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке

Дифракционная решетка – это система щелей одинаковой ширины a, разделенных между собой непрозрачными промежутками длиной b (рис. 3.6, *а*).



а *б*

Рис. 3.6

Периодом дифракционной решетки называется величина

$$d = a + b\,.$$

Пусть источник монохроматического света находится в бесконечности, тогда волна, падающая на дифракционную решетку, плоская. Линза, помещенная за решеткой, собирает лучи на экране, расположенном в одном из ее фокусов.

Расчет дифракционной картины (распределения интенсивности I на экране как функции угла наблюдения φ) для дифракционной решетки достаточно сложен, зависит от количества щелей и соотношения длин прозрачных a и непрозрачных b промежутков.

В тех направлениях, где колебания от соседних щелей приходят в фазе (разность хода равна целому числу длин волн), мы будем наблюдать интерференционные максимумы, которые называются ***главными максимумами***, и определяются условием

$$d \sin \varphi = k\lambda, \qquad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \ . \tag{3.7}$$

При $k = 0$ наблюдается центральный максимум, по обе стороны которого расположены главные максимумы первого порядка ($k = \pm 1$), главные максимумы второго порядка ($k = \pm 2$) и т. д. Количество главных максимумов определяется соотношением длины волны λ и периода дифракционной решетки d. Наибольший порядок главного максимума, который можно наблюдать, вычисляется по формуле (3.7), подставив в нее $\sin \varphi = 1$ и взяв целую часть

$$k_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda} \right] \qquad .$$

В тех направлениях, где колебания от соседних щелей приходят в противофазе (разность хода равна полуцелому числу длин волн), мы будем наблюдать интерференционный минимум. В этих направлениях колебания от соседних щелей гасят друг друга, и на интерференционной картине появляются ***дополнительные минимумы***.

Однако на интерференционную картину также влияет распределение интенсивности от каждой щели. В тех направлениях, где одна щель создает минимум интенсивности, все остальные щели также будут давать минимум интенсивности

$$a \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \ldots \ . \tag{3.8}$$

В этих направлениях будут появляться ***главные минимумы***. Выполнение условия (3.8) может привести к исчезновению некоторых главных максимумов на интерференционной картине.

На рис. 3.7 показано распределение интенсивности I в зависимости от синуса угла наблюдения для дифракционной решетки из $N = 4$ щелей. Пунктирной линией показано распределение интенсивности от одной щели. В центре находится центральный максимум, по обе стороны от него расположены главные максимумы, причем главный максимум третьего порядка ($k = \pm 3$) отсутствует.

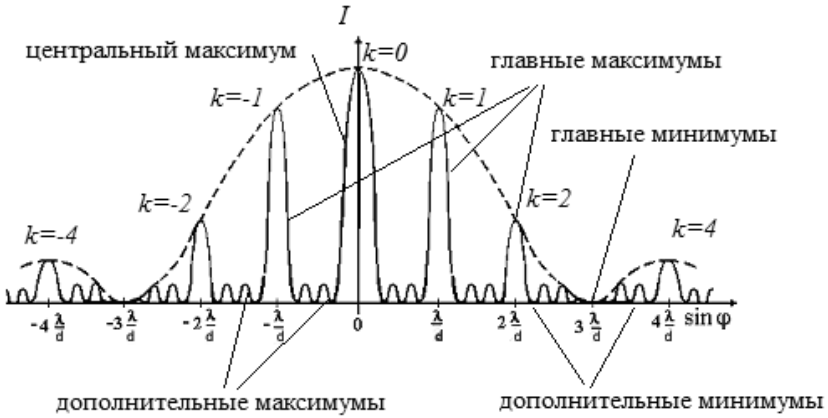


Рис. 3.7

При увеличении количества щелей главные максимумы становятся более резкими и их интенсивность увеличивается. Если обозначить интенсивность центрального максимума, создаваемого одной щелью через I_0, то тогда интенсивность центрального максимума I для решетки, содержащей N щелей,

$$I = N^2 I_0 .$$

Из рис. 3.8 видно, как меняется интерференционная картина вблизи центрального максимума при изменении количества щелей.

Если освещать дифракционную решетку белым светом, то для каждой длины волны угол, под которым виден главный максимум, будет меняться. Поэтому в местах расположения главных максимумов на экране будут видны серии разноцветных полос. Говорят, что ***дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр***, ***обращенный***

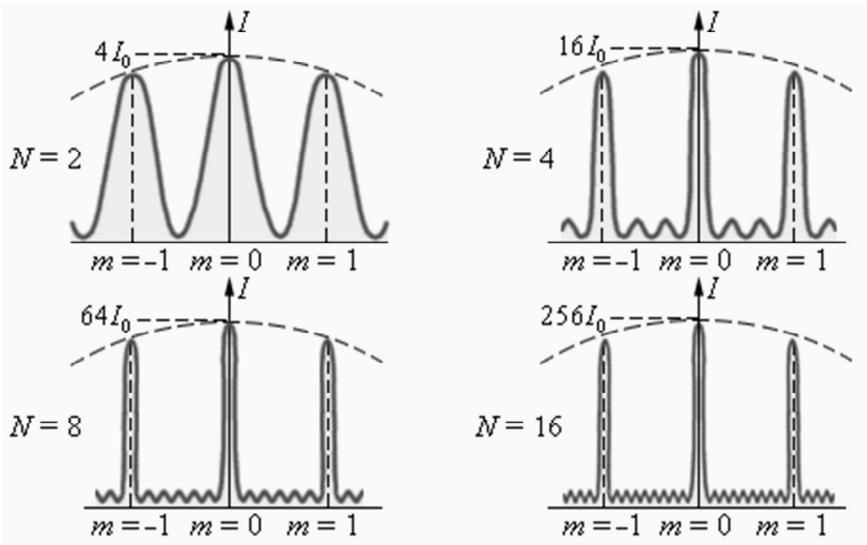


Рис. 3.8

фиолетовым краем к центру. Центральный максимум на дифракционной картине в спектр не разлагается, так как при $\varphi = 0$ все лучи для всех длин волн собираются в одной точке.

Графический метод сложения амплитуд
Спираль Френеля

Для наглядной оценки действия зон Френеля можно использовать графический метод сложения амплитуд. Известно, что любое колебание можно изобразить с помощью вектора, длина которого равна амплитуде колебания, а угол, на который он повернут относительно горизонтальной оси, характеризует фазу колебания. Если надо сложить несколько колебаний, то следует воспользоваться правилами сложения векторов.

Разобьем каждую зону Френеля на большое количество кольцевых участков, которые будем называть ***подзонами***. Пусть амплитуды от каждой подзоны изображаются в точке наблюдения *M* вектором постоянной длины. Колебания от крайних подзон внутри одной зоны Френеля отличаются на π, так как разность хода от краев зоны Френеля

составляет $\frac{\lambda}{2}$. Разность фаз от соседних подзон $\delta = \frac{\pi}{N}$, где N – количество подзон. Фазу первой подзоны будем считать равной нулю. Результирующая амплитуда – результат сложения цепочки векторов показана на рис. 3.9.

На рис. 3.10, *а* показана амплитуда первой зоны Френеля A_1 при разбиении ее на восемь подзон. Если увеличивать количество подзон, очевидно, что ломаная линия превратится в полуокружность, рис. 3.10, *б*.

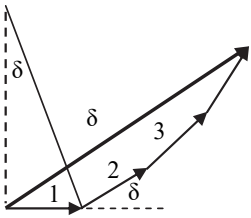
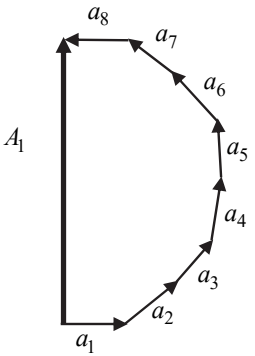
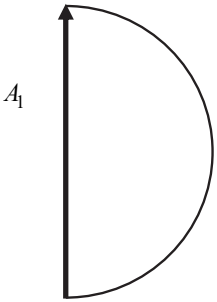


Рис. 3.9



а



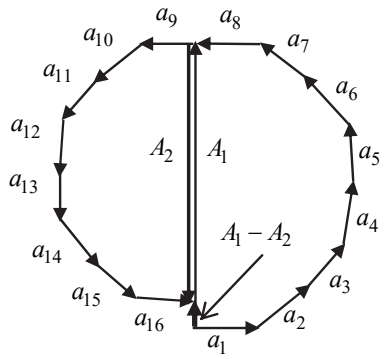
б

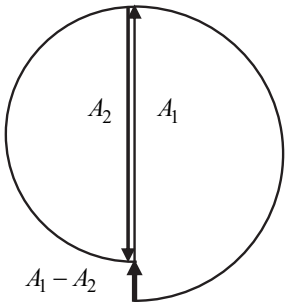
Рис. 3.10

Амплитуда колебаний от второй зоны Френеля A_2 показана на рис. 3.11, *а* при разделении ее на восемь подзон.

Амплитуда колебаний по мере удаления от точки наблюдения уменьшается $A_1 > A_2 > A_3 > ... > A_m$. Поэтому цепочка векторов не замыкается, а результатом действия двух зон является их маленькая разница $A_1 - A_2$. На рис. 3.11, *б* показан результат действия двух зон Френеля при увеличении количества подзон – незамкнутая окружность.

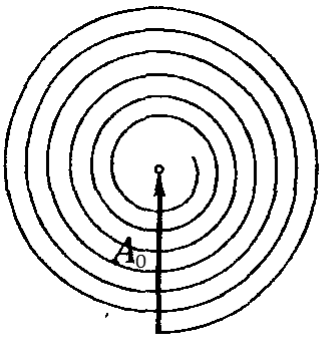
Продолжая построение аналогичным образом, для открытого волнового фронта мы получим спираль (рис. 3.12), которую называют ***спиралью Френеля***. Амплитуда полностью открытого волнового фронта A_0 составляет половину амплитуду первой зоны Френеля A_1.





а *б*

Рис. 3.11



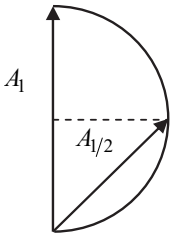


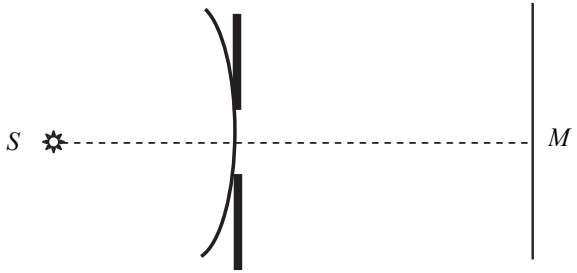
Рис. 3.12 *Рис. 3.13*

С помощью спирали Френеля можно находить амплитуды и частично открытых зон. Так, например, чтобы найти амплитуду наполовину открытой первой зоны Френеля $A_{1/2}$ (рис. 3.13), следует воспользоваться теоремой Пифагора

$$A_{1/2} = \sqrt{\left(\frac{A_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_1}{2}\right)^2} = \frac{A_1}{2}\sqrt{2} = \frac{A_1}{\sqrt{2}}.$$

Примеры тестовых заданий

1. Сферическая волна распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием. В центре экрана (точка *M*) будет наиболее темное пятно, если в отверстии помещается…



А) 4 зоны Френеля
Б) 1 зона Френеля
В) 2 зоны Френеля
Г) 3 зоны Френеля

Решение

Задача решается путем разбиения открытой части волновой поверхности на зоны Френеля. Результирующая амплитуда определяется формулой (3.4)

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2},$$

где знак «+» соответствует нечетным m; знак «–» соответствует четным m.

Если отверстие открывает нечетное число зон Френеля, то мы наблюдаем в центре экрана (точка *M*) светлое пятно – максимум интенсивности. Если отверстие открывает четное число зон Френеля, то мы наблюдаем в центре экрана темное пятно – минимум интенсивности.

Таким образом, в центре экрана будет темное пятно, если отверстие открывает 2 или 4 зоны Френеля.

Если открыто 2 зоны Френеля, то результирующая амплитуда

$$A_{1\to 2} = \frac{A_1}{2} - \frac{A_2}{2},$$

если открыто 4 зоны Френеля, то результирующая амплитуда

$$A_{1\to 4} = \frac{A_1}{2} - \frac{A_4}{2}.$$

Амплитуда колебаний, создаваемая 4-й зоной Френеля, меньше амплитуды колебаний, создаваемой 2-й зоной Френеля, $A_2 > A_4$, поэтому $A_{1\to 2} < A_{1\to 4}$.

Следовательно, пятно будет наиболее темным при открытых двух зонах Френеля, – правильный ответ Б)

Ответ: Б).

2. Как различаются между собой радиусы 2-й и 8-й зон Френеля для плоского волнового фронта?

А) радиус 8 зоны Френеля и радиус 2 зоны Френеля одинаковы

Б) радиус 8 зоны Френеля меньше радиуса 2 зоны Френеля в два раза

В) радиус 8 зоны Френеля больше радиуса 2 зоны Френеля в два раза

Г) радиус 8 зоны Френеля больше радиуса 2 зоны Френеля в четыре раза

Решение

Для плоского волнового фронта радиус r_m внешней границы m зоны Френеля определяется формулой (3.3)

$$r_m = \sqrt{bm\lambda},$$

где m – номер кольца; λ – длина волны источника света; b – расстояние от волнового фронта до точки наблюдения.

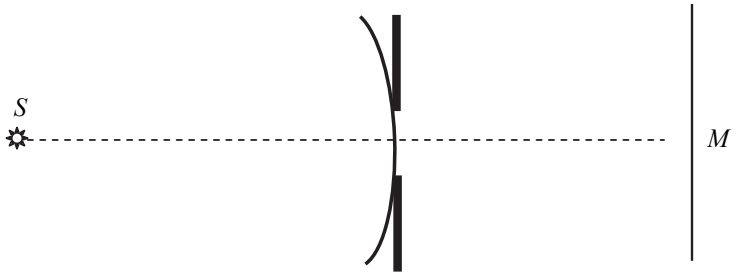
Радиус второй зоны Френеля $r_2 = \sqrt{2b\lambda}$, радиус восьмой зоны Френеля $r_8 = \sqrt{8b\lambda}$. Их отношение

$$\frac{r_8}{r_2} = \frac{\sqrt{8b\lambda}}{\sqrt{2b\lambda}} = \sqrt{\frac{8}{2}} = \sqrt{4} = 2.$$

Таким образом, радиус 8-й зоны Френеля в два раза больше радиуса 2-й зоны Френеля, правильный ответ – В).

Ответ: В).

3. Сферическая волна с амплитудой A_0 распространяется от точечного источника *S.* На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием, открывающим только первую зону Френеля. Амплитуда света в центре экрана (точка *M*) равна…



А) A_0

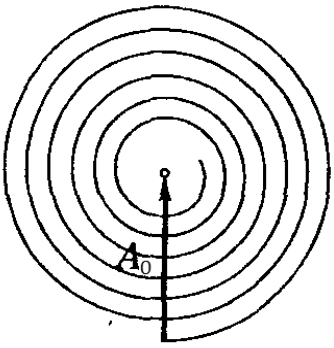
Б) $\frac{A_0}{2}$

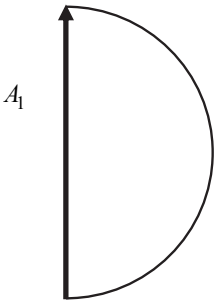
В) $2A_0$

Г) $4A_0$

Решение

Задачу удобно решать с помощью метода графического сложения амплитуд. Для полностью открытого волнового фронта (когда нет препятствий) эта зависимость имеет вид спирали, где A_0 – амплитуда источника.





Если открыта только первая зона Френеля, то мы получим вектор с длиной A_1. Сравнивая два рисунка, видим, что амплитуда A_1 вдвое больше амплитуды A_0. Правильный ответ $2A_0$, В).

Ответ: В).

4. Монохроматический свет с длиной волны λ нормально падает на щель шириной 4λ. Дифракционный минимум **второго** порядка, наблюдается под углом…

А) 60º
Б) 90º
В) 30º
Г) 14,5º

Решение

При падении монохроматического света на узкую щель возникает явление дифракции. Для минимумов интенсивности должно выполняться условие

$$a\sin\varphi = \pm m\lambda, \qquad m = 1,2,3,\ldots,$$

где a – размер щели. По условию задачи $a = 4\lambda$, $m = 2$. Для этого случая условие минимума примет вид

$$4\lambda\sin\varphi = \pm 2\lambda,$$

знак $\pm$ означает, что дифракционные максимумы и минимумы расположены в обе стороны от центрального максимума.

Отсюда получим

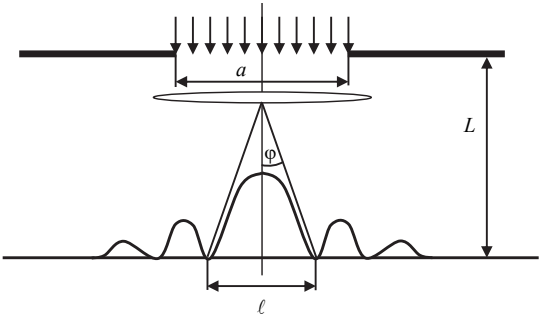
$$\sin\varphi = \frac{1}{2},\ \varphi = \arcsin\left(\frac{1}{2}\right) = 30^\circ.$$

Выбираем правильный ответ – это В).

Ответ: В).

5. Монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм нормально падает на щель шириной a = 0,1 мм. Если ширина центрального дифракционного максимума $\ell = 1,0$ см, то расстояние от щели до экрана L равно…

А) 1 м
Б) 0,5 м
В) 0,1 м
Г) 2,0 м



Решение

Ширина центрального максимума – это расстояние между первыми минимумами. Угол φ, определяющий положение первого минимума $(m=1)$, можно найти из формулы (3.5)

$$a\sin\varphi=\lambda,\quad \sin\varphi=\frac{\lambda}{a}=\frac{0{,}5\cdot10^{-6}}{0{,}1\cdot10^{-3}}=5\cdot10^{-3}.$$

С другой стороны, из рисунка видно, что

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\ell/2}{L},\quad L=\frac{\ell/2}{\operatorname{tg}\varphi}.$$

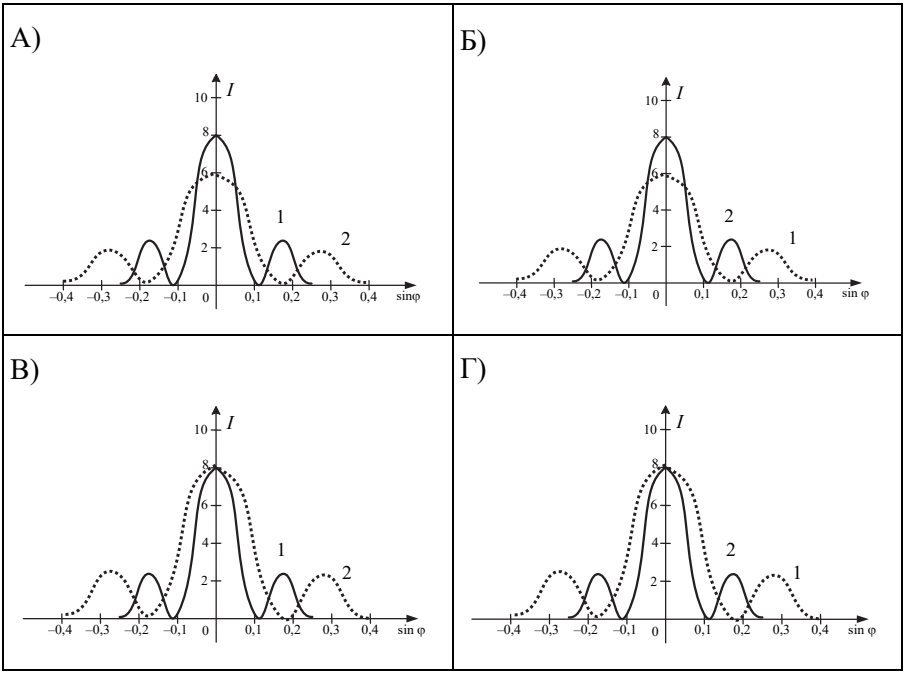
При малых углах $\operatorname{tg}\varphi\simeq\sin\varphi=5\cdot10^{-3}$ и сам угол можно не вычислять. Теперь можно вычислить расстояние от щели до экрана

$$L=\frac{\ell/2}{\operatorname{tg}\varphi}=\frac{0{,}5\cdot10^{-2}}{5\cdot10^{-3}}=1\ \text{м}.$$

Выбираем из предложенных вариантов правильный ответ – А).

Ответ: А).

6. Дифракционная решетка по очереди освещается нормально падающим монохроматическим светом одинаковой интенсивности с длинами волн λ_1 и λ_2. Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых дифракционной решеткой, если $\lambda_1>\lambda_2$? (I – интенсивность света, φ – угол дифракции).



Решение

В условии задачи сказано, что решетка освещается светом одинаковой интенсивности, поэтому варианты графиков для случая А) и Б) сразу же отпадают, поскольку на них зависимости имеют различные значения интенсивностей в максимумах.

Чтобы выбрать правильный ответ из двух оставшихся вариантов, необходимо рассмотреть угловое положение главных максимумов в зависимости от длины волны света. Для дифракции Фраунгофера (свет падает нормально на дифракционную решетку) углы, под которыми видны главные максимумы, определяются уравнением (3.7):

$$d \sin \varphi = k\lambda, \qquad k = 0, \pm 1, \pm 2, ...$$

Для первого главного максимума

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{d}.$$

Следовательно, чем больше длина волны, тем больше должно быть значение $\sin\varphi$. По условию задачи $\lambda_1 > \lambda_2$, значит, $\sin\varphi_1 > \sin\varphi_2$. Выбираем из рисунков В) и Г) тот, где $\sin\varphi_1 > \sin\varphi_2$ – это Г).

Ответ: Г).

7. Если на 1 мм длины дифракционной решетки содержится 200 штрихов, то наибольший порядок дифракции узкого пучка монохроматического света с длиной волны 550 нм, падающего на эту решетку нормально, равен:

А) 10 В) 9
Б) 5 Г) 15

Решение

Найдем из условия задачи постоянную дифракционной решетки (N – число штрихов на единицу длины)

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1\text{ мм}}{200} = \frac{10^{-3}\text{ м}}{200} = 5\cdot10^{-6}\text{ м}.$$

При дифракции на дифракционной решетке (свет падает нормально) углы, под которыми видны главные максимумы, определяются уравнением (3.7):

$$d\sin\varphi = k\lambda, \qquad k = 0,\pm1,\pm2,...$$

Наибольший порядок главного максимума, который можно наблюдать, определяется отношением $\frac{d}{\lambda}$. Его можно вычислить, подставив $\sin\varphi=1$ и взяв целую часть $k_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda}\right]$.

$$k_{\max} = \left[\frac{d}{\lambda}\right] = \left[\frac{5\cdot10^{-6}}{550\cdot10^{-9}}\right] = [9,09] = 9 \quad .$$

Ответ: В).

8. Если заменить одну щель на дифракционную решетку, состоящую из десяти точно таких же щелей, то интенсивность света в центральном интерференционном максимуме…

А) останется неизменной
Б) уменьшится в 10 раз
В) увеличится в 10 раз
Г) увеличится в 100 раз

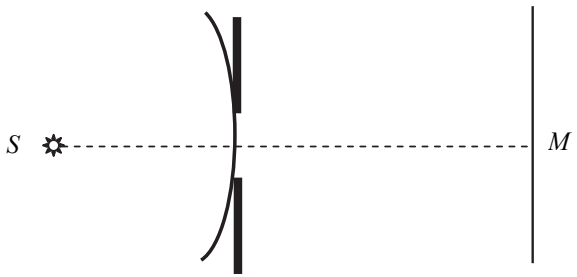
Решение

Если заменить одну щель дифракционной решеткой, состоящей из N таких же щелей, то интенсивность центрального максимума увеличится в N^2 раз. В нашем случае $N=10$, поэтому интенсивность увеличится в $N^2=100$ раз.

Ответ: Г).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т15. Сферическая волна распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием. В центре экрана (точка *M*) будет наиболее светлое пятно, если в отверстии помещается…

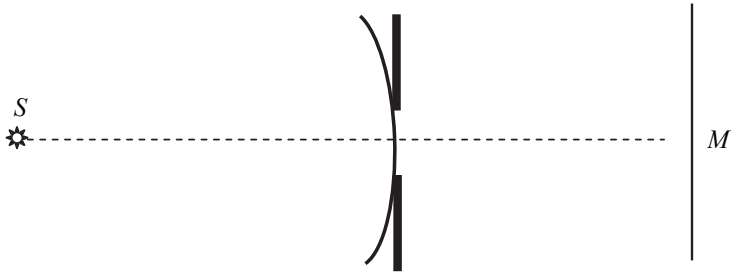


А) 4 зоны Френеля
Б) 1 зона Френеля
В) 2 зоны Френеля
Г) 3 зоны Френеля

Т16. Как различаются между собой радиусы 3 и 27 зон Френеля для плоского волнового фронта?

А) радиус 27 зоны Френеля и радиус 3 зоны Френеля одинаковы
Б) радиус 27 зоны Френеля больше радиуса 3 зоны Френеля в два раза
В) радиус 27 зоны Френеля больше радиуса 3 зоны Френеля в три раза
Г) радиус 27 зоны Френеля больше радиуса 3 зоны Френеля в четыре раза

Т17. Сферическая волна с интенсивностью I_0 распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием, открывающим только половину первой зоны Френеля. Интенсивность света в центре экрана (точка *M*) равна…



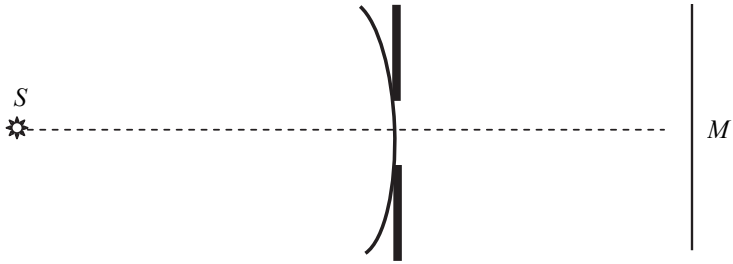
А) I_0

Б) $\frac{I_0}{2}$

В) $2I_0$

Г) $4I_0$

Т18. Сферическая волна с интенсивностью I_0 распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием, открывающим только две первые зоны Френеля. Интенсивность света в центре экрана (точка *M*) равна…



А) 0

Б) $\frac{I_0}{2}$

В) $2I_0$

Г) $4I_0$

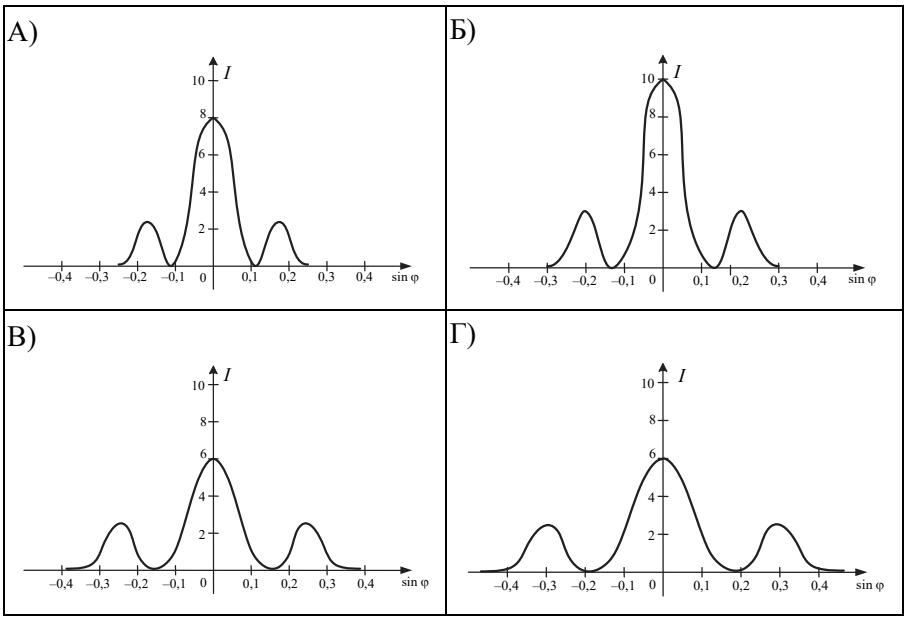
Т19. Монохроматический свет с длиной волны λ нормально падает на щель шириной 4λ. Дифракционный минимум, наблюдаемый под углом 14,5º, является минимумом порядка…

А) 3 В) 1
Б) 4 Г) 2

Т20. Монохроматический свет с длиной волны λ=0,6 мкм нормально падает на щель шириной a. Как изменится ширина центрального дифракционного максимума, если, не меняя размер щели и расстояние от щели до экрана, заменить источник монохроматического света на другой с длиной волны $\lambda_1 = 0,5$ мкм.

А) увеличится в 1,2 раза В) уменьшится в 1,2 раза
Б) не изменится Г) уменьшится в 2,4 раза

Т21. Имеются четыре дифракционные решетки с различными постоянными решетки d, освещаемые одним и тем же монохроматическим излучением различной интенсивности. Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых дифракционной решеткой с наименьшей постоянной решетки? (I – интенсивность света, φ – угол дифракции).



Т.22. На дифракционную решетку с периодом d нормально падает монохроматический свет с длиной волны λ. Какое из приведенных ниже выражений определяет угол, под которым виден пятый главный максимум?

А) $\sin\varphi = \frac{5d}{\lambda}$ В) $\sin\varphi = \frac{5\lambda}{d}$

Б) $\cos\varphi = \frac{5d}{\lambda}$ Г) $\sin\varphi = \frac{\lambda}{5d}$

Т23. Дифракционная решетка с периодом d=2 мкм освещается светом с длиной волны λ=0,589 мкм. Наибольший порядок наблюдаемого главного максимума равен…

А) 1 В) 3

Б) 2 Г) 5

Т24. Дифракционная решетка с периодом $d = 2$ мкм освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 500$ нм, падающим нормально. Угол, под которым виден на удаленном экране второй максимум, …

А) 60° В) 90°

Б) 30° Г) 45°

Т25. Дифракционная решетка освещается белым светом, падающим нормально. На удаленном экране наблюдается дифракционная картина. Ближе всего к центру дифракционной картины расположена …

А) фиолетовая полоса В) зеленая полоса

Б) красная полоса Г) желтая полоса

Т26. Если заменить дифракционную решетку, состоящую из девяти щелей, на одну щель, то интенсивность света в интерференционном максимуме…

А) останется неизменной В) увеличится в 81 раз

Б) уменьшится в 81 раз Г) уменьшится в 9 раз

4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Естественный и поляризованный свет

Свет – это поперечная электромагнитная волна, в которой колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектора магнитной индукции $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны. При рассмотрении взаимодействия света с веществом достаточно рассмотреть поведение одного из векторов $\vec{E}$ или $\vec{B}$. Обычно рассматривают поведение вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ (***световой вектор***), поскольку взаимодействие света с веществом связано именно с этой составляющей электромагнитной волны.

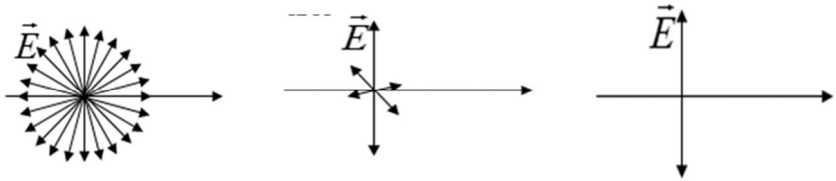
Свет – это электромагнитное излучение атомов вещества, которые испускают волны во всевозможных направлениях. Такой свет называют ***естественным***, в нем все направления колебания светового вектора равновероятны.

Волна, в которой колебания светового вектора упорядочены, называется ***поляризованной***. Упорядочить колебания можно только в поперечных волнах.

Естественный свет (солнечный свет, свет ламп накаливания) ***неполяризован*** (рис. 4.1, *а*), свет с преимущественными направлениями колебания вектора $\vec{E}$ – ***частично поляризован*** (рис. 4.1, *б*), в ***линейно поляризованном*** (или ***плоско поляризованном***) свете колебания вектора $\vec{E}$ совершаются в одной плоскости (рис. 4.1, *в*).

Степенью поляризации излучения P называется величина

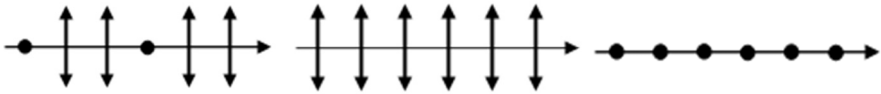
$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \qquad (4.1)$$



а *б* *в*

Рис. 4.1

где $I_{\max}$ – максимальная интенсивность света; $I_{\min}$ – минимальная интенсивность света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора $\vec{E}$. Для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и степень поляризации естественного света $P = 0$ (естественный свет не поляризован). Для плоскополяризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$.



а *б* *в*

Рис. 4.2

Поляризацию света можно изображать с помощью стрелок и точек, показывающих направление колебаний светового вектора. Стрелка означает, что колебания светового вектора происходят в плоскости рисунка, а точка показывает, что колебания светового вектора перпендикулярны плоскости рисунка. На рис. 4.2, *а* показан частично поляризованный свет, а на рис. 4.2, *б* и 4.2, *в* – линейно поляризованный.

Поляризаторы. Закон Малюса

Естественный свет можно превратить в плоскополяризованный с помощью ***поляризатора***. Поляризаторы пропускают колебания светового вектора только определенного направления, а остальные колебания не пропускают. Любые кристаллы, в которых присутствует анизотропия распространения света, могут работать в качестве поляризаторов.

Из природных материалов, которые часто используют в качестве поляризатора, следует отметить минерал ***турмалин***. Этот минерал обладает сильной анизотропией, он пропускает только те колебания электрического вектора, которые параллельны его оптической оси, а все остальные – не пропускает. Поэтому естественный свет после прохождения через пластинку из турмалина становится линейно поляризованным.

Если пластинку из турмалина используют для получения поляризованного света – её называют поляризатором, если она применяется для анализа поляризованного света – ее называют ***анализатором***.

Естественный свет, прошедший через поляризатор, будет поляризован в направлении оси пропускания поляризатора (рис. 4.3).

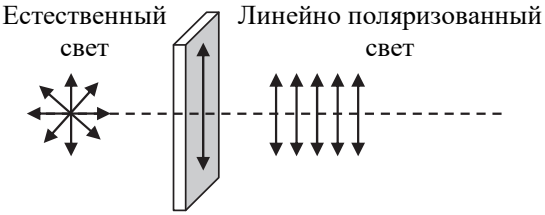


Рис. 4.3

Пусть ось пропускания поляризатора OO' параллельна оси y. Колебания светового вектора можно разложить на две перпендикулярные составляющие E_x и E_y (рис. 4.4):

$$E_x = E\sin\varphi \text{ и } E_y = E_{OO'} = E\cos\varphi . \qquad (4.2)$$

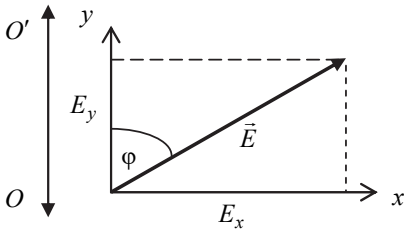


Рис. 4.4

Через поляризатор пройдет составляющая вектора напряженности электрического поля, параллельная оси пропускания поляризатора – E_y. Таким образом, естественный свет после прохождения через поляризатор станет поляризованным.

Если поставить за поляризатором анализатор (A), то с его помощью можно будет анализировать интенсивность прошедшего света. Если ось пропускания анализатора повернута относительно оси пропускания поляризатора на угол φ (рис. 4.5), то через анализатор пройдет только составляющая вектора напряженности, параллельная оси OO'.

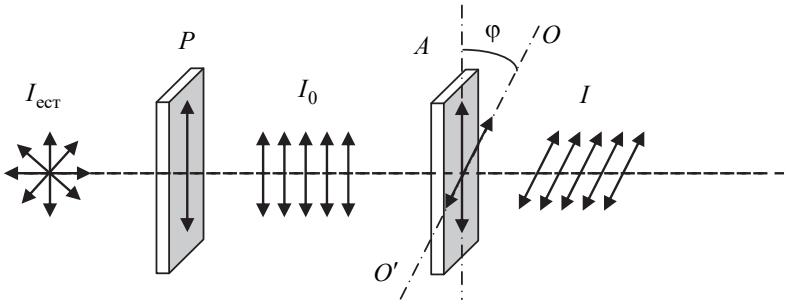


Рис. 4.5

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды. Обозначив интенсивность света после поляризатора I_0, а интенсивность света после анализатора I, ($I_0 \sim E^2$, $I \sim E_y{}^2$), можно найти соотношение, связывающее интенсивности падающего на анализатор поляризованного света I_0 с интенсивностью прошедшего света I:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi . \qquad (4.3)$$

Уравнение (4.3) называется ***законом Малюса***. Если оптические оси поляризатора и анализатора параллельны, то анализатор пропустит весь свет полностью, если же анализатор повернуть на 90° относительно поляризатора, то через него световая волна не пройдет.

Если на поляризатор падает естественный свет с интенсивностью $I_{ест}$, то после поляризатора получается поляризованный свет с интенсивностью I_0.

Эти интенсивности связаны между собой соотношением

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} . \tag{4.4}$$

Таким образом, интенсивность света полученного на выходе из анализатора I связана с интенсивностью падающего естественного света $I_{\text{ест}}$ соотношением

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \varphi . \tag{4.5}$$

Поляризация при отражении и преломлении Закон Брюстера

Поляризованный свет можно получить при отражении от границы раздела двух сред с различными показателями преломления n_1 и n_2. При угле падения света $\theta_{\text{БР}}$ (***угол Брюстера***), удовлетворяющего условию

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{БР}} = \frac{n_2}{n_1}, \tag{4.6}$$

отраженный луч полностью поляризован в перпендикулярном к плоскости рисунка направлении, ***а угол между преломленным и отраженным лучом составляет*** 90° (рис. 4.6). Соотношение (4.6) носит название ***закон Брюстера***.

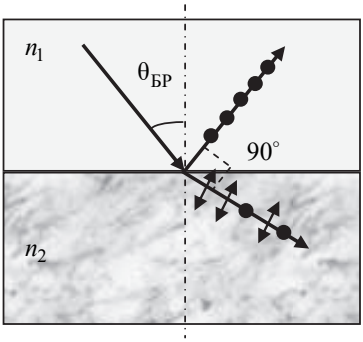


Рис. 4.6

Преломленный луч поляризован частично с преимущественной ориентацией в плоскости рисунка.

Оптически активные вещества

Некоторые вещества, например сахарный раствор, камфара, кварц, обладают способностью поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света. Такие вещества называются ***оптически активными***. Прошедший через такое вещество луч света имеет прежнюю амплитуду, но колебания светового вектора происходят уже в другом направлении. Оптически активные вещества бывают ***право-*** и ***левовращающие*** в зависимости от направления вращения плоскости поляризации.

Угол φ, на который поворачивается плоскость поляризации, определяется свойствами вещества $[\alpha]$ (постоянная, зависящая от свойств вещества, называется ***удельное вращение***), концентрацией раствора C и расстоянием, пройденным в оптически активном веществе ℓ:

$$\varphi = [\alpha] C \ell . \tag{4.7}$$

Измерением угла поворота плоскости поляризации можно вычислять концентрацию вещества в растворе.

Дисперсия

Дисперсия – явление, обусловленное зависимостью показателя преломления от длины волны света

$$n = f(\lambda), \tag{4.8}$$

где λ – длина волны в вакууме.

Величина $D = \dfrac{dn}{d\lambda}$ называется ***дисперсией вещества*** и показывает, как быстро изменяется показатель преломления при изменении длины волны.

Зависимость показателя преломления n от длины волны λ в видимой части спектра для прозрачных бесцветных веществ представлена на рис. 4.7.

Если показатель преломления уменьшается с увеличением длины волны $\dfrac{dn}{d\lambda} < 0$, то такая дисперсия называется ***нормальной***. Зависимость, показанная на рис. 4.7, как раз является нормальной дисперсией. На рис. 4.8 изображена зависимость показателя преломления от длины

волны с участками нормальной и ***аномальной*** $\left(\right.$ когда показатель преломления увеличивается с ростом длины волны $\frac{dn}{d\lambda} > 0\left.\right)$ дисперсий.

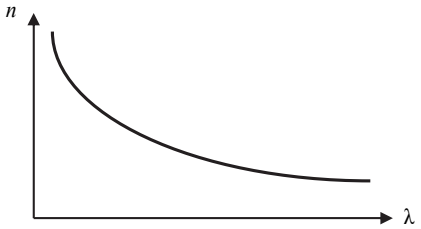


Рис. 4.7

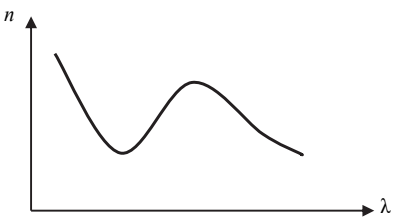
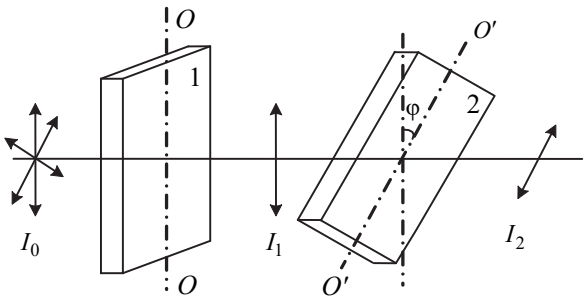


Рис. 4.8

Примеры тестовых заданий

1. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями OO и $O'O'$ $\varphi = 60°$, то I_1 и I_2 связаны соотношением …



А) $I_2 = \frac{I_1}{4}$

В) $I_2 = \frac{3I_1}{4}$

Б) $I_2 = \frac{I_1}{2}$

Г) $I_2 = I_1$

Решение

Естественный свет, прошедший через первый поляризатор, становится поляризованным в направлении оси пропускания поляризатора *OO*. Через второй поляризатор пройдет только та составляющая поляризованного света, которая параллельна оси $O'O'$.

Интенсивность света, прошедшего через второй поляризатор поляризованного света I_2, связана с интенсивностью падающего на него поляризованного света I_1 законом Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi .$$

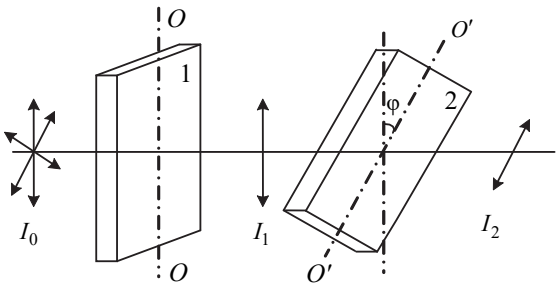
По условию задачи $\varphi = 60° \left(\cos 60° = \frac{1}{2} \right)$, следовательно,

$$I_2 = I_1 \cos^2 60° = I_1 \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{I_1}{4}.$$

Правильный ответ – А).

Ответ: А).

2. Естественный свет интенсивностью I_0 проходит через два поляризатора. Если угол между осями пропускания поляризаторов (осями OO и $O'O'$) равен $60°$, то интенсивность света I_2, прошедшего через оба поляризатора, равна…



А) $I_2 = \frac{I_0}{2}$

В) $I_2 = \frac{I_0}{8}$

Б) $I_2 = \frac{I_0}{4}$

Г) $I_2 = \frac{3I_0}{8}$

Решение

Естественный свет, прошедший через первый поляризатор, становится поляризованным в направлении оси пропускания поляризатора *OO*. Интенсивность прошедшего через первый поляризатор поляризованного света I_1 связана с интенсивностью падающего на поляризатор естественного света I_0 соотношением

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 .$$

Интенсивность прошедшего через второй поляризатор поляризованного света I_2 связана с интенсивностью падающего на него поляризованного света I_1 законом Малюса:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi .$$

Подставляя вместо I_1 его связь с интенсивностью падающего естественного света и значения $\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, получим

$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ = \frac{I_0}{2}\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{I_0}{8} .$$

Правильный ответ – В).

Ответ: В).

3. Луч света падает из воздуха на стеклянную пластинку с показателем преломления $n = \sqrt{3}$. Если преломленный луч оказался перпендикулярным к отраженному, то угол падения равен…

А) 90° В) 45°

Б) 60° Г) 30°

Решение

При падении света на границу раздела двух диэлектриков под некоторым углом, который называется углом Брюстера, происходит поляризация отраженного луча света, а преломленный и отраженный лучи перпендикулярны друг другу. Угол Брюстера $\theta_{БР}$ определяется выражением

$$\operatorname{tg}\theta_{БР} = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_2 и n_1 – абсолютные показатели преломления сред.

По условию задачи одна из сред – воздух, его показатель преломления $n_1 = 1$, показатель преломления второй среды $n_2 = \sqrt{3}$. Тогда угол падения света, равный углу Брюстера:

$$\theta_{БР} = \operatorname{arctg}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \operatorname{arctg}\sqrt{3} = 60°.$$

Правильный ответ – Б).

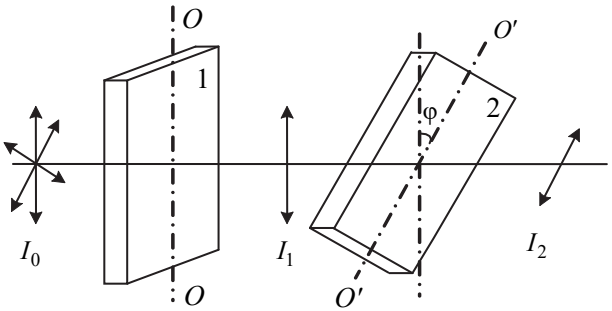
Ответ: Б).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т27. Выберите верные утверждения:
А) поляризовать можно только поперечные волны
Б) поляризовать можно только продольные волны
В) поляризовать можно звуковые волны
Г) поляризовать можно электромагнитные волны

Т28. Кристалл турмалина превращает…
А) поляризованный свет в естественный
Б) естественный свет в поляризованный
В) световую волну с меньшей интенсивностью в световую волну с большей интенсивностью
Г) разлагает белый свет в спектр

Т29. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и $I_1 = I_2$, то угол φ между направлениями OO и $O'O'$ …



А) 0°
В) 90°
Б) 60°
Г) 30°

Т30. Интенсивность естественного света, прошедшего через два поляризатора, уменьшается вдвое, если угол между главными плоскостями поляризаторов равен:

А) 90°
В) 45°
Б) 60°
Г) 0°

Т31. При падении луча света на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера полностью поляризован луч…

А) преломленный
В) падающий
Б) отраженный
Г) нет верного ответа

Т32. Луч света падает на стеклянную пластинку под углом $60°$. При этом оказалось, что преломлённый луч перпендикулярен к отраженному. Показатель преломления пластинки n равен…

А) $\sqrt{3}$
В) $\sqrt{5}$
Б) $\sqrt{2}$
Г) $\sqrt{6}$

Т33. Чему равна степень поляризации P естественного света?

А) Не определяется
В) $P = 0,5$
Б) $P = 0$
Г) $P = 1$

Т34. В оптически активных веществах основное явление…

А) вращение плоскости поляризации
Б) двойное лучепреломление

В) преломление
Г) отражение

Т35. Укажите верное утверждение:
А) дисперсия – это явление, обусловленное зависимостью показателя преломления от длины волны;
Б) дисперсия – это разложение белого света в спектр призмой;
В) дисперсия – это разложение белого света в спектр дифракционной решеткой;
Г) дисперсия возникает при поляризации света.

5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

При температуре выше 0 К атомы и молекулы совершают тепловое движение, причем чем выше температура, тем выше кинетическая энергия теплового движения атомов и молекул. Часть энергии теплового движения может излучаться, поэтому нагретые тела являются источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется ***тепловым излучением***.

Экспериментальные исследования показали, что тепловое излучение имеет непрерывный спектр. Распределение энергии по частоте зависит от температуры тела, при этом для всех тел с повышением температуры общая излученная энергия возрастает, а максимум излученной энергии смещается в область более коротких длин волн. Так, например, максимум излученной энергии для батареи центрального отопления ($T \approx 350$ К) приходится на инфракрасную область, Солнце ($T_{\text{поверх.}} \approx 6 \cdot 10^3$ К) излучает энергию в видимом диапазоне, а энергия атомного взрыва ($T \approx 10^6$ К) излучается в виде рентгеновского и γ-излучения.

Тепловое излучение – единственный вид излучения, которое является равновесным. ***Равновесное излучение*** – это излучение, при котором распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для любой длины волны. Другими словами, ***сколько энергии поглощается, столько же ее и излучается*** для каждой длины волны.

Для описания спектрального состава теплового излучения вводится понятие ***спектральной плотности энергетической светимости*** $r_{\omega,T}$ (***спектральной испускательной способности***) – энергии, приходя-

щейся на единичный диапазон частот. Индексы ω и T подчеркивают, что спектральная плотность энергетической светимости зависит от частоты и температуры.

Энергия R, излученная с единицы поверхности тела в единицу времени во всем диапазоне частот, называется ***интегральной испускательной способностью,*** или ***энергетической светимостью***:

$$R = \int_0^\infty r_{\omega,T} d\omega . \tag{5.1}$$

Энергетическую светимость R можно записать и как функцию от длины волны λ:

$$R = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda . \tag{5.2}$$

Для характеристики поглощения телами излучения применяется ***спектральная поглощательная способность*** $a_{\omega,T}$, которая показывает, какая доля энергии, падающей на единицу поверхности тела в единицу времени $(dW_{\omega,\omega+d\omega})$, поглощается $\left(dW^{\text{погл}}_{\omega,\omega+d\omega}\right)$ для выбранного диапазона частот:

$$a_{\omega,T} = \frac{dW^{\text{погл}}_{\omega,\omega+d\omega}}{dW_{\omega,\omega+d\omega}} . \tag{5.3}$$

Из опыта известно, что при разных температурах тело поглощает тепло на одинаковых частотах по-разному, т. е. вид функции $a_{\omega,T}$ меняется в зависимости от температуры. Очевидно, что спектральная поглощательная способность всегда меньше либо равна единице: $a_{\omega,T} \le 1$.

Особое место в теории теплового излучения занимает ***абсолютно черное тело***, для которого $a_{\omega,T} = 1$ и которое ***поглощает всю падающую энергию при любых частотах и температурах***. Идеальных черных тел в природе не существует, однако некоторые тела как, например, сажа или черный бархат, в некотором диапазоне частот близки по своим свойствам к черному телу.

Наряду с понятием черного тела используют понятие ***серого тела***, поглощательная способность которого меньше единицы и постоянна при данной температуре во всем диапазоне частот:

$$a^c_{\omega,T} = a^c_T = \text{const} < 1 .$$

На рис. 5.1 показана зависимость коэффициента поглощения от частоты (при некоторой температуре): для абсолютно черного тела, для серого тела и для реального тела.

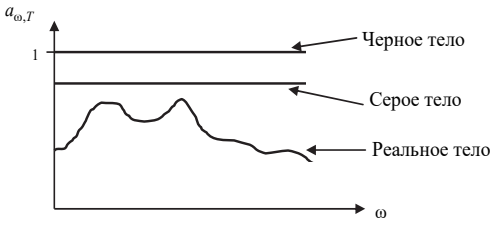


Рис. 5.1

Экспериментальные исследования теплового излучения, интенсивно проводимые в XIX веке, показали, что между спектральной испускательной и спектральной поглощательной способностью тел есть связь: их отношение не зависит от природы тел, оно является универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры

$$\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} = f(\omega, T) , \qquad (5.4)$$

где $f(\omega, T) = r^*_{\omega,T}$ – ***универсальная функция Кирхгофа, равная*** спектральной испускательной способности абсолютно черного тела. Уравнение (5.4) выражает ***закон Кирхгофа для теплового излучения***. Величины $r_{\omega,T}$ и $a_{\omega,T}$ различны для разных тел, но их отношение – постоянная величина. Таким образом, если тело излучает больше энергии, то оно и поглощает больше энергии. Если тело не поглощает энергии совсем, то оно и не может излучать энергию.

Энергетическая светимость абсолютно черного тела R^* определяется ***законом Стефана–Больцмана:***

$$R^* = \sigma T^4 , \qquad (5.5)$$

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

Для реальных тел закон Стефана–Больцмана имеет вид

$$R = A_T R^* = A_T \sigma T^4 , \tag{5.6}$$

где $A_T < 1$ – ***интегральная поглощательная способность***.

Энергия, излученная с поверхности тела площадью S за время t,

$$W = R^* St = \sigma S t T^4 , \tag{5.7}$$

мощность излучения

$$P = R^* S = \sigma S T^4 . \tag{5.8}$$

Закон Стефана–Больцмана не дает ответа на вопрос о спектральном составе теплового излучения. Из экспериментальных результатов известно, что распределение излучаемой энергии в спектре абсолютно черного тела является неравномерным. Все кривые имеют ярко выраженный максимум (рис. 5.2), который смещается в область более коротких длин волн при повышении температуры тела. Площадь под кривой равна энергетической светимости абсолютно черного тела $R^* = \sigma T^4$, определяемой законом Стефана – Больцмана.

Длина волны, соответствующая ***максимуму спектральной плотности энергетической светимости*** (спектральной излучательной способности), определяется ***законом смещения Вина***:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} , \tag{5.9}$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянна Вина.

Значение максимума функции спектральной излучательной способности черного тела $r^*_{\max \lambda, T}$ определяется выражением

$$r^*_{\max \lambda, T} = C T^5 , \tag{5.10}$$

где $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$.

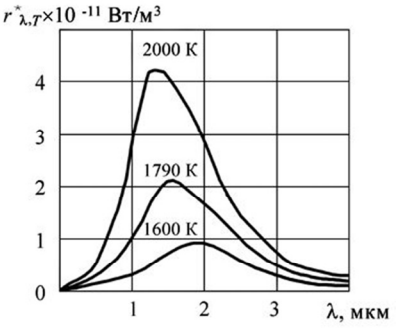


Рис. 5.2

В начале XX века Макс Планк выдвинул гипотезу, что поглощение и излучение электромагнитной энергии нагретым телом происходит не непрерывно, как считалось в классической физике, а отдельными порциями энергии – квантами. ***Квант*** – это минимальная порция энергии, которая поглощается (излучается) нагретым телом. Энергия одного кванта

$$E = h\nu = \hbar\omega\,, \tag{5.11}$$

где $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$; ν – частота; ω – циклическая частота.

С помощью этой гипотезы Планку удалось найти вид функции $r^*_{\lambda,T}$, в точности соответствующий опытным данным.

Примеры тестовых заданий

1.Температура абсолютно черного тела увеличилась в 2 раза. При этом его энергетическая светимость (излучательность)…

А) увеличилась в 16 раз
Б) увеличилась в 2 раза
В) увеличилась в 4 раза
Г) уменьшилась в 16 раз

Решение

Энергетическая светимость абсолютно черного тела определяется законом Стефана–Больцмана

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

где $\sigma = 5{,}67\cdot10^{-8}\ \dfrac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}^4}$ – постоянная Стефана–Больцмана.

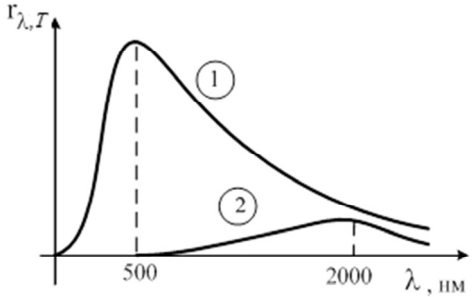
По условию задачи температура абсолютно черного тела увеличилась в два раза, следовательно, его энергетическая светимость стала

$$R_1^* = \sigma(2T)^4 = 16\sigma T^4 = 16R^*,$$

т. е. энергетическая светимость абсолютно черного тела увеличилась в 16 раз. Правильный ответ – А).

Ответ: А).

2. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 2 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1500 К, то кривая 1 соответствует температуре (в градусах Кельвина) …



А) 6000
Б) 3000
В) 1000
Г) 750

Решение

Длина волны, соответствующая максимуму излучения $r_{\lambda,T}$, определяется ***законом смещения Вина***

$$\lambda_{\max} T = b,$$

где $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянна Вина. Следовательно, для двух кривых можно записать соотношения:

$$\lambda_{1\max} T_1 = \lambda_{2\max} T_2, \quad T_1 = \frac{\lambda_{2\max}}{\lambda_{1\max}} T_2.$$

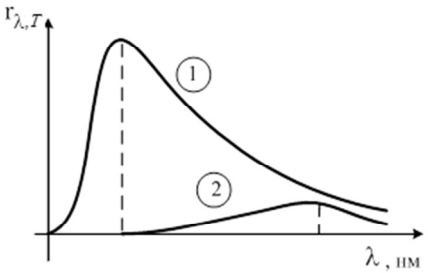
Для кривой 2 длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности, $\lambda_{2\max} = 2000$ нм (из рисунка), а температура $T_2 = 1500$ К (по условию). Для кривой 1 длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности, $\lambda_{1\max} = 500$ нм (из рисунка). После подстановки получим

$$T_1 = \frac{\lambda_{2\max}}{\lambda_{1\max}} T_2 = \frac{2000}{500} 1500 = 6000 \text{ К}.$$

Правильный ответ – А).

Ответ: А).

3. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если длина волны, соответствующая максимуму излучения, увеличилась в два раза, то площадь под кривой...



А) увеличилась в 16 раза
Б) уменьшилась в 4 раза
В) уменьшилась в 2 раза
Г) уменьшилась в 16 раз

Решение

Длина волны, соответствующая максимуму излучения, определяется ***законом смещения Вина***:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянна Вина. Если длина волны увеличилась в два раза, то соответственно температура уменьшилась в два раза.

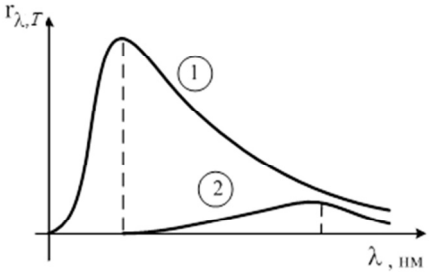
Площадь под кривой зависимости спектральной плотности энергетической светимости от длины волны – это интегральная энергетическая светимость, которая для абсолютно черного тела зависит от температуры и определяется законом Стефана–Больцмана:

$$R^* = \sigma T^4 .$$

При уменьшении температуры в два раза, энергетическая светимость абсолютно черного тела уменьшается в 2^4 =16 раз. Следовательно, площадь под кривой уменьшилась в 16 раз, правильный ответ – Г).

Ответ: Г).

4. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если длина волны, соответствующая максимуму излучения, увеличилась в два раза, то максимальная спектральная плотность энергетической светимости...



А) увеличилась в 16 раза
Б) уменьшилась в 4 раза
В) уменьшилась в 2 раза
Г) уменьшилась в 32 раза

Решение

Длина волны, соответствующая максимальной плотности спектральной энергетической светимости, определяется ***законом смещения Вина***:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянна Вина. Если длина волны увеличилась в два раза, то соответственно температура уменьшилась в два раза.

Значение максимума функции спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела $r^*_{\max\,\lambda,T}$ определяется выражением

$$r^*_{\max\,\lambda,T} = CT^5,$$

где $C = 1{,}3 \cdot 10^{-5} \dfrac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$.

При уменьшении температуры в два раза максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела уменьшается в $2^5 = 32$ раз. Следовательно, правильный ответ – Г).

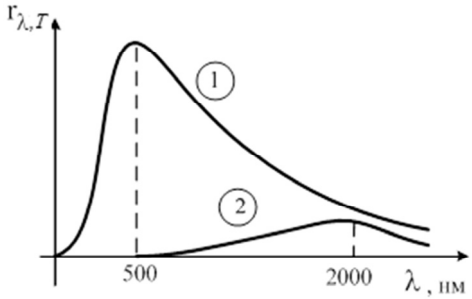
Ответ: Г).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т36. Энергетическая светимость абсолютно черного тела увеличилась в 81 раз в результате того, что его температура …

А) увеличилась в 3 раза
Б) увеличилась в 81 раз
В) увеличилась в 9 раз
Г) уменьшилась в 3 раза

Т37. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 1 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1000 К, то кривая 2 соответствует температуре (в градусах Кельвина) …



А) 600
Б) 300
В) 100
Г) 250

Т38. Тело, способное поглощать полностью при любой температуре падающие на него электромагнитные волны любой частоты,…

А) тело белого цвета

Б) тело синего цвета

В) серое тело

Г) абсолютно черное тело

Т39. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной испускательной способности в спектре абсолютно черного тела, при понижении температуры в два раза…

А) уменьшается в два раза

Б) увеличивается в два раза

В) уменьшается в четыре раза

Г) не зависит от температуры

Т40. Максимальная спектральная испускательная способность абсолютно черного тела…

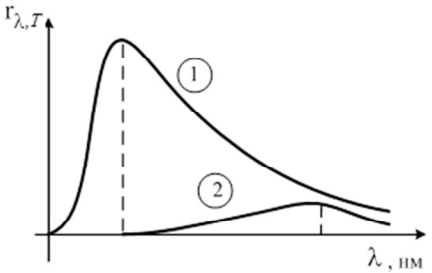
А) обратно пропорциональна температуре

Б) прямо пропорциональна температуре

В) прямо пропорциональна пятой степени температуры

Г) прямо пропорциональна четвертой степени температуры

Т41. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если длина волны, соответствующая максимуму излучения, уменьшилась в три раза, то площадь под кривой...



А) увеличилась в 3 раза

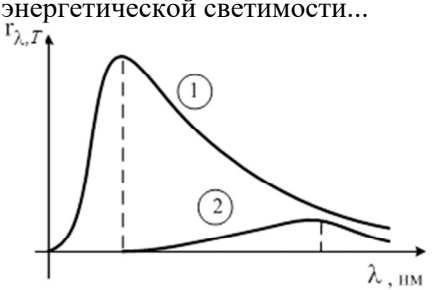
Б) уменьшилась в 9 раз

В) увеличилась в 81 раз

Г) увеличилась в 9 раз

Т42. На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины

волны при разных температурах. Если длина волны, соответствующая максимуму излучения, уменьшилась в три раза, то максимальная спектральная плотность энергетической светимости...



А) увеличилась в 81 раз
Б) уменьшилась в 9 раз
В) уменьшилась в 3 раза
Г) уменьшилась в 81 раз

6. ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффект – это испускание электронов веществом (внешний фотоэффект) или появление свободных электронов внутри вещества (внутренний фотоэффект) под воздействием электромагнитного излучения.

Внешний фотоэффект впервые был обнаружен Г. Герцем в 1887 году. Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта показана на рис. 6.1. В стеклянном баллоне в вакууме расположены два электрода: катод (К) и анод (А), напряжение между которыми можно изменять. Катод освещается монохроматическим светом длиной λ через прозрачное кварцевое окно.

Снималась зависимость тока в цепи при изменении напряжения между электродами, световой поток при этом не менялся. Типичные вольт-амперные характеристики при двух интенсивностях падающего светового потока приведены на рис. 6.2. Из анализа этих кривых видно, что фототок I достигает насыщения при достаточно больших напряжениях на аноде, когда все электроны, вырванные из катода, достигают анода. Значение тока насыщения $I_{\text{н}}$ пропорционально интенсивности падающего света. При $U = 0$ фототок отличен от 0, это означает, что вырванные светом из катода фотоэлектроны обладают кинетической энергией и могут достичь анода и без ускоряющего электрического поля.

Чтобы фототок исчез, надо приложить задерживающее напряжение $U_{\text{з}}$ противоположного знака. При отрицательном напряжении на аноде электрическое поле тормозит фотоэлектроны, и анода могут достичь только те из них, у которых кинетическая энергия больше величины $eU_{\text{з}}$. Зная задерживающее напряжение $U_{\text{з}}$, можно вычислить максимальную кинетическую энергию $T_{\max}$ электронов:

$$eU_з = T_{max} = \frac{mV_{max}^2}{2}, \qquad (6.1)$$

где $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

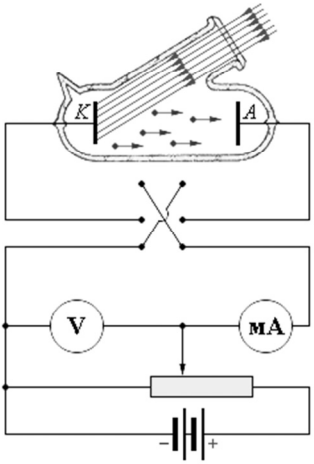


Рис. 6.1

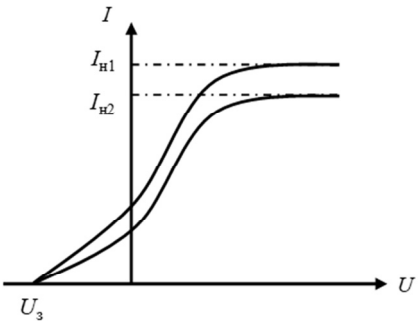


Рис. 6.2

На основе многочисленных экспериментов русским ученым А.Г. Столетовым были выведены следующие законы фотоэффекта:

1. Число электронов, вырываемых из катода в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности света при фиксированной частоте.

2. Максимальная начальная кинетическая энергия электронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.

3. Для каждого вещества существует ***красная граница фотоэффекта***, т. е. наименьшая частота, ниже которой фотоэффект невозможен.

Кроме того, фототок практически безынерционен и возникает сразу же после освещения катода при условии, что частота падающего излучения больше частоты, соответствующей красной границе фотоэффекта.

Закономерности фотоэффекта невозможно объяснить с точки зрения классической теории взаимодействия света с веществом. Согласно классической теории при взаимодействии с электромагнитной волной электрон постепенно накапливает энергию, и должно пройти некоторое время, чтобы электрон смог накопить энергию, достаточную для вылета из катода. Однако из опыта известно, что фотоэлектроны появляются сразу же после освещения катода. Кроме того, существование красной границы фотоэффекта также невозможно объяснить с классической точки зрения.

Фотоэффект был объяснен Эйнштейном в 1905 году на основе квантовых представлений. Эйнштейн предположил, что свет не только испускается отдельными квантами (как предполагал Планк), но также поглощается и распространяется отдельными квантами с энергией $E = h\nu$. Кванты электромагнитного излучения получили название ***фотонов***.

По Эйнштейну, каждый квант света может поглотиться только одним электроном, поэтому количество вырванных электронов пропорционально интенсивности света (1-й закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется мгновенной передачей энергии фотона электрону.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта выражает закон сохранения энергии: энергия падающего фотона $h\nu$ расходуется на работу выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и на сообщение ему кинетической энергии

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\max}^2}{2}. \qquad (6.2)$$

Уравнение Эйнштейна объясняет и существование красной границы фотоэффекта. Работа выхода для вещества всегда отлична от 0, и при уменьшении частоты падающего света уменьшается и кинетическая энергия фотоэлектронов. При некоторой частоте падающего света ν_0 кинетическая энергия станет равной 0. Частота, соответствующая красной границе фотоэффекта, определяется уравнением

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \qquad (6.3)$$

Работу выхода принято выражать в ***электрон-вольтах*** (эВ)

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Значения работы выхода для некоторых металлов приведены в таблице [3].

Значение работы выхода

Металл	Калий	Литий	Платина	Рубидий	Серебро	Цезий	Цинк
$A_{\text{вых}}$, эВ	2,2	2,3	6,3	2,1	4,7	2,0	4,0

Явление фотоэффекта подтверждает гипотезу о том, что свет – это поток частиц, которые называются фотонами.

Примеры тестовых заданий

1. В результате изменения частоты света, падающего на фотоэлемент, задерживающее напряжение увеличилось в 4 раза. При этом максимальная скорость фотоэлектронов…

А) увеличилась в 4 раза
Б) не изменилась
В) уменьшилась в 4 раза
Г) увеличилась в 2 раза

Решение

Задерживающее напряжение $U_з$ связано с максимальной кинетической энергией $T_{\max}$ электронов соотношением

$$eU_з = T_{\max} = \frac{mV_{\max}^2}{2},$$

откуда максимальная скорость фотоэлектронов

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_з}{m}}.$$

При увеличении задерживающего напряжения в 4 раза максимальная скорость фотоэлектронов

$$V_{1\max} = 2\sqrt{\frac{2eU_з}{m}} = 2V_{\max}$$

увеличится в два раза. Правильный ответ – Г).

Ответ: Г).

2. Если максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при фотоэффекте возросла в 2 раза, значит, частота света была (работой выхода электронов из металла пренебречь)...

А) увеличена в 8 раз
Б) уменьшена в 2 раза
В) увеличена в 2 раза
Г) уменьшена в 4 раза

Решение

Фотоэффект описывается уравнением Эйнштейна: энергия падающего фотона $h\nu$ равна сумме работы выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и максимальной кинетической энергии электрона

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\max}^2}{2}.$$

По условиям задачи работой выхода электронов можно пренебречь, тогда в этом случае уравнение примет вид

$$h\nu = \frac{mV_{\max}^2}{2} = T_{\max},$$

т. е. кинетическая энергия фотоэлектрона линейно зависит от частоты падающего света. Если кинетическая энергия фотоэлектрона увеличилась вдвое, это означает, что частота падающего света также была увеличена вдвое. Правильный ответ – В).

Ответ: В).

3. Если интенсивность света, падающего на металл, увеличивается, а его частота остается неизменной, то:

А) количество выбитых электронов уменьшается, а их кинетическая энергия остается неизменной;

Б) количество выбитых электронов увеличивается, а их кинетическая энергия остается неизменной;

В) количество выбитых электронов и их кинетическая энергия увеличиваются;

Г) количество выбитых электронов остается неизменным, а их кинетическая энергия увеличивается.

Решение

Увеличение интенсивности света означает увеличение количества фотонов, попадающих на металл. Каждый падающий на металл фотон способен выбить один электрон, поэтому если количество падающих фотонов увеличивается, то и ***возрастает количество выбитых электронов***.

Кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, она определяется частотой падающего света и работой выхода. По условию частота падающего света не изменилась, работа выхода тоже не поменялась (металл остался прежним), следовательно, ***кинетическая энергия электронов не изменилась***.

Выбираем правильный ответ: количество выбитых электронов увеличилось + кинетическая энергия осталась неизменной – это Б).

Ответ: Б).

4. На металл падает поток фотонов, имеющих частоту ν. Красная граница фотоэффекта для этого металла $\nu_0 = \frac{1}{3}\nu$. Максимальная кинетическая энергия электронов в этом случае...

А) 0 (фотоэффекта не происходит)

Б) $h\nu_0$

В) $\frac{2}{3}h\nu$

Г) $\frac{1}{2}h\nu$

Решение

Фотоэффект описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T_{\max},$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода; $T_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия электронов.

Работа выхода определяется свойствами материала, на который падают фотоны. Ее можно вычислить из известной частоты, соответствующей красной границе фотоэффекта,

$$A_{\text{вых}} = h\nu_0.$$

Тогда максимальная кинетическая энергия электронов

$$T_{\max} = h\nu - A_{\text{вых}} = h\nu - h\nu_0 = h\nu - \frac{1}{3}h\nu = \frac{2}{3}h\nu.$$

Выбираем правильный ответ из предложенных вариантов – это В).

Ответ: В).

5. С какой максимальной скоростью (Мм/с) вылетают фотоэлектроны из металла с работой выхода 4,5 эВ при освещении его светом с длиной волны 150 нм?

А) 1,23 В) 1,67
Б) 1,16 Г) 1,77

Решение

Фотоэффект описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\max}^2}{2},$$

откуда можно вычислить максимальную скорость фотоэлектронов $V_{\max}$:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - A_{\text{вых}})}.$$

Вычислим энергию падающего фотона:

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{6{,}63\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^{8}}{150\cdot10^{-9}} = 1{,}33\cdot10^{-18} \text{ Дж}.$$

Работа выхода электрона в условии дана в электроновольтах, ее нужно перевести в джоули:

$$A_{\text{вых}} = 4{,}5\cdot1{,}6\cdot10^{-19} = 0{,}72\cdot10^{-18} \text{ Дж}.$$

Теперь можно вычислить максимальную скорость фотоэлектронов:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - A_{\text{вых}})} = \sqrt{\frac{2}{9{,}1\cdot10^{-31}}(1{,}336\cdot10^{-18} - 0{,}72\cdot10^{-18})} =$$

$$= \sqrt{\frac{2\cdot0{,}61\cdot10^{-18}}{9{,}1\cdot10^{-31}}} = 1{,}16\cdot10^{6} \text{ м/с} = 1{,}16 \text{ Мм/с}.$$

Правильный ответ – Б).

Ответ: Б).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т43. Вырывание электронов под действием света – это…

А) фотоэффект
В) фоторезистивный эффект
Б) тепловое излучение
Г) излучение видимого света

Т44. Если минимальная энергия фотонов, вызывающих фотоэффект, равна 4,5 эВ, то работа выхода электрона из металла (в электроновольтах) равна…

А) 5,0 эВ
В) 2,25 эВ
Б) 4,5 эВ
Г) 9 эВ

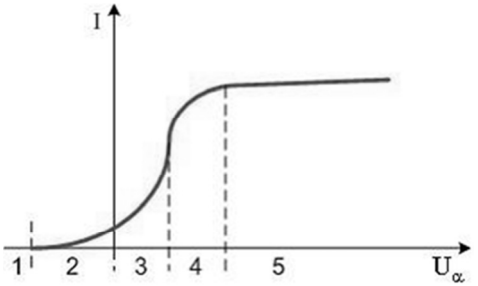
Т45. В результате изменения частоты света, падающего на фотоэлемент, задерживающая разность потенциалов увеличилась в 2 раза. При этом максимальная скорость фотоэлектронов….

А) увеличилась в 4 раза
В) уменьшилась в 2 раза
Б) не изменилась
Г) увеличилась в 2 раза

Т46. Если максимальная скорость электронов при фотоэффекте возросла в 2 раза, значит частота света была (работой выхода электронов из металла пренебречь)…

А) уменьшена в 2 раза
В) уменьшена в 4 раза
Б) увеличена в 2 раза
Г) увеличена в 4 раза

Т47. На рисунке приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоприемника с внешним фотоэффектом. На графике этой ВАХ попаданию всех электронов, вылетевших в результате фотоэмиссии на анод фотоприемника, соответствует область...



А) 1
В) 2
Б) 5
Г) 4

Т48. Свет, падающий на металл, вызывает эмиссию электронов из металла. Если интенсивность света уменьшается, а его частота остается неизменной, то:

А) количество выбитых электронов уменьшается, а их кинетическая энергия остается неизменной;

Б) количество выбитых электронов увеличивается, а их кинетическая энергия уменьшается;

В) количество выбитых электронов и их кинетическая энергия увеличиваются;

Г) количество выбитых электронов остается неизменным, а их кинетическая энергия увеличивается.

Т49. Металл облучают светом с длиной волны λ. Красная граница фотоэффекта для этого металла равна λ_0, работа выхода – A. Если $\lambda = \frac{1}{2}\lambda_0$, то максимальная кинетическая энергия вырванных электронов будет равна...

А) 0, фотоэффект не происходит

Б) $\frac{1}{2}A$

В) A

Г) $2A$

Т50. На металл падает поток фотонов, имеющих частоту ν. Красная граница фотоэффекта для этого металла $\nu_0 = 2\nu$. Максимальная кинетическая энергия электронов в этом случае равна ...

А) 0 (фотоэффект не происходит)

Б) $h\nu_0$

В) $\frac{2}{3}h\nu$

Г) $\frac{1}{2}h\nu$

Т51. С какой максимальной скоростью (Мм/с) вылетают фотоэлектроны из металла с работой выхода 3,5 эВ при освещении его светом с длиной волны 100 нм?

А) 1,77

Б) 1,30

В) 1,97

Г) 1,06

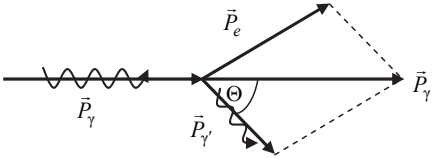
7. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

При изучении фотоэффекта возник вопрос об импульсе фотона. Экспериментальное подтверждение существования импульса у фотона было проведено американским физиком А. Комптоном в 1923 году. Импульс частиц проще всего найти при столкновении частиц, поэтому Комптон исследовал процесс столкновения фотонов с электронами. Если у фотона есть импульс, то этот импульс должен проявиться в законе сохранения импульса при столкновении фотона с электроном.

Комптон поставил опыт по рассеянию рентгеновского излучения на графите. Рентгеновское излучение – это электромагнитные волны с энергией от 10 эВ до 1 МэВ, обладающие высокой проникающей способностью. Из курса оптики известно, что видимый свет рассеивается (отклоняется от первоначального направления движения) на мелких частях вещества, например, на мелких капельках воды или частичках пыли. Длина волны рентгеновского излучения меньше длины волны видимого света, поэтому рассеяние рентгеновского излучения должно наблюдаться на еще более мелких объектах – на атомах и отдельных электронах.

Согласно классическим представлениям под действием рентгеновского излучения электроны в веществе совершают вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы, т. е. с частотой падающего рентгеновского излучения. Однако в эксперименте в рассеянном излучении регистрировалось излучение не только с длиной волны падающего излучения λ_0, но и с длиной волны $\lambda' > \lambda_0$, причем величина λ' зависела от угла рассеяния Θ.

Пусть фотон падает на свободный или слабо связанный электрон (см. рисунок). Импульс падающего фотона обозначим $\vec{P}_\gamma$, импульс рассеянного фотона $\vec{P}_{\gamma'}$, а импульс электрона $\vec{P}_e$ (энергия покоя); m – масса электрона.



Падение фотона на свободный
или слабосвязанный электрон

Задачу удобно решать в той системе отсчета, где первоначально электрон покоился, чтобы его первоначальный импульс был нулевым. В этом случае при рассеянии фотона на свободном или слабосвязанном электроне выполняются законы сохранения импульса и энергии. Закон сохранения импульса

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}_{\gamma'} + \vec{P}_e .$$

Величины импульсов падающего фотона $\left|\vec{P}_\gamma\right|$, рассеянного фотона $\left|\vec{P}_{\gamma'}\right|$ и электрона отдачи $\left|\vec{P}_e\right|$ связаны между собой теоремой косинусов:

$$\left|\vec{P}_e\right|^2 = \left|\vec{P}_\gamma\right|^2 + \left|\vec{P}_{\gamma'}\right|^2 - 2\left|\vec{P}_\gamma\right|\left|\vec{P}_{\gamma'}\right|\cos\Theta , \qquad (7.1)$$

где $\left|\vec{P}_\gamma\right| = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ – импульс падающего фотона; $\left|\vec{P}_{\gamma'}\right| = \frac{h\nu'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$ – импульс рассеянного фотона; $\left|\vec{P}_e\right|$ – импульс электрона отдачи.

Закон сохранения энергии, с учетом того что первоначально электрон покоился, имеет вид

$$\frac{hc}{\lambda} + E_0 = \frac{hc}{\lambda'} + E , \qquad (7.2)$$

где $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ – энергия падающего фотона; $E_{\gamma'} = h\nu' = \frac{hc}{\lambda'}$ – энергия рассеянного фотона; $E = \sqrt{(P_e c)^2 + (mc^2)^2}$ – энергия электрона отдачи; $E_0 = mc^2$ – энергия электрона до столкновения (энергия покоя); m – масса электрона.

Решением совместно уравнений (7.1) и (7.2) можно получить изменение длины волны $\Delta\lambda$ при комптоновском рассеянии:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\Theta) = \lambda_C(1-\cos\Theta), \qquad (7.3)$$

где $\lambda_C = \dfrac{hc}{m} = \dfrac{6{,}63\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^{8}}{9{,}1\cdot10^{-31}} = 2{,}43$ пм – ***комптоновская длина волны для электрона***.

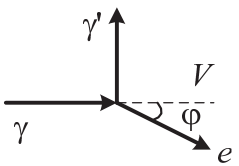
Из уравнения (7.3) следует, что при нулевом угле рассеяния $(\Theta = 0,\ \cos\Theta = 1,\ \Delta\lambda = 0)$ изменения длины волны не происходит. При угле рассеяния $\Theta = 90°,\ \cos\Theta = 0,\ \Delta\lambda = \lambda_C = 2{,}43$ пм изменение длины волны рассеянного фотона равно комптоновской длине волны для электрона. Максимальное изменение длины волны происходит при рассеянии под углом $\Theta = 180°,\ \cos\Theta = -1,\ \Delta\lambda = 2\lambda_C = 4{,}86$ пм.

Энергия электрона отдачи

$$E = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} + E_0. \qquad (7.4)$$

Примеры тестовых заданий

1. На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (e). Угол рассеяния 90°, направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол $\varphi = 30°$. Если импульс падающего фотона равен 3 (МэВ·с)/м, то импульс рассеянного фотона (в тех же единицах) равен…



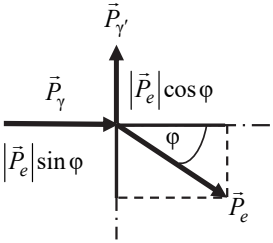
А) $\sqrt{3}$
Б) 1,5
В) $2\sqrt{3}$
Г) $1{,}5\sqrt{3}$

Решение

При рассеянии фотона на свободном или слабосвязанном электроне (эффект Комптона) выполняется закон сохранения импульса

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}_{\gamma'} + \vec{P}_e,$$

где $\vec{P}_\gamma$ – импульс падающего фотона; $\vec{P}_{\gamma'}$ – импульс рассеянного фотона; $\vec{P}_e$ – импульс электрона отдачи.



Поскольку выполняется закон сохранения импульса, то сумма проекций импульсов на каждую ось координат должна равняться нулю. Поэтому можно записать:

$$|\vec{P}_{\gamma'}| = |\vec{P}_e|\sin\varphi\,,\ |\vec{P}_\gamma| = |\vec{P}_e|\cos\varphi\,.$$

Поделив одно уравнение на другое, получим

$$\frac{|\vec{P}_{\gamma'}|}{|\vec{P}_\gamma|} = \frac{|\vec{P}_e|\sin\varphi}{|\vec{P}_e|\cos\varphi} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \operatorname{tg}\varphi,$$

$$|\vec{P}_{\gamma'}| = |\vec{P}_\gamma|\operatorname{tg}\varphi = 3\operatorname{tg}30^\circ = 3\frac{\sqrt{3}}{3} = \sqrt{3} \quad (\text{МэВ}\cdot\text{с})/\text{м}.$$

Выбираем правильный ответ из предложенных вариантов – это А).

Ответ: А).

2. Фотон с длиной волны $\lambda = 3{,}00\cdot10^{-12}$ м рассеялся на свободном электроне под углом $\theta = 60^\circ$. При этом длина волны рассеянного фо-

тона стала равной (комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{12}$ м)…

А) $7,86 \cdot 10^{-12}$ м

Б) $4,22 \cdot 10^{-12}$ м

В) $6,65 \cdot 10^{-12}$ м

Г) $5,43 \cdot 10^{-12}$ м

Решение

Изменение длины волны фотона $\Delta\lambda$ при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\Theta),$$

откуда

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = \lambda + \lambda_C (1 - \cos\Theta) = 3,00 + 2,43(1 - \cos 60^\circ) =$$

$$= 3,00 + 2,43(1 - 0,5) = 4,215 \text{ пм} \approx 4,22 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

Выбираем правильный ответ из предложенных вариантов – это Б).

Ответ: Б)

3. При комптоновском рассеянии на свободном электроне длина волны γ-излучения увеличилась на $\lambda_C = \dfrac{h}{mc}$. Угол рассеяния равен $\left(\lambda_C = \dfrac{h}{mc} - \text{ комптоновская длина волны электрона}\right)$ …

А) 30°

Б) 180°

В) 90°

Г) 60°

Решение

Изменение длины волны $\Delta\lambda$ при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\Theta) = \lambda_C(1-\cos\Theta),$$

где $\lambda_C = \frac{h}{mc}$.

По условию задачи изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии равно комптоновской длине волны для электрона:

$$\Delta\lambda = \lambda_C .$$

Подставляя это выражение в первое уравнение, получим

$$\lambda_C = \lambda_C(1-\cos\Theta), \quad 1 = 1-\cos\Theta,$$

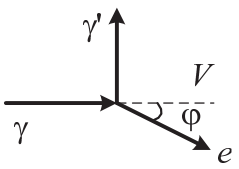
$$\cos\Theta = 0, \quad \Theta = 90^\circ .$$

Выбираем правильный ответ из предложенных вариантов – это В).

Ответ: В)

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т52. На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (*e*). Угол рассеяния 90°, направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол $\varphi = 30°$. Если импульс электрона отдачи равен 3 (МэВ·с)/м, то импульс падающего фотона (в тех же единицах) равен…



А) $1{,}5\sqrt{3}$
Б) $2\sqrt{3}$
В) 1,5
Г) $\sqrt{3}$

Т53. Комптоновское рассеяние электромагнитного излучения на электронах наиболее легко наблюдается для…

А) радиоволн

Б) инфракрасного света

В) видимого света

Г) рентгеновских лучей

Т54. В комптоновском рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах наименьшее изменение длины волны наблюдается, когда фотон рассеивается под углом…

А) 0° В) 45°

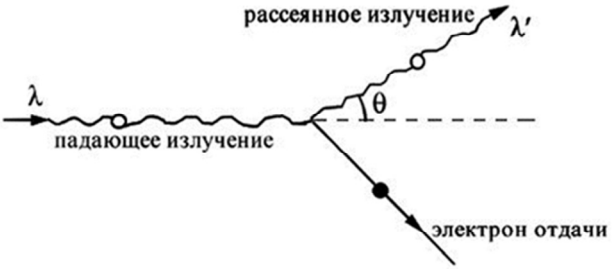
Б) 30° Г) 90°

Т55. Электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda = 5,70 \cdot 10^{-12}$ м рассеивается на свободных электронах вещества. При этом угол, под которым регистрируется рассеянное излучение с длиной волны $\lambda' = 6,57 \cdot 10^{-12}$ м (комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м), равен…

А) 10° В) 40°

Б) 120° Г) 50°

Т56. Фотон с длиной волны $\lambda = 3,00 \cdot 10^{-12}$ м рассеялся на свободном электроне под углом $\theta = 120^\circ$. При этом длина волны рассеянного фотона стала равной (комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м)…



А) $7{,}86\cdot10^{-12}$ м

Б) $4{,}22\cdot10^{-12}$ м

В) $6{,}65\cdot10^{-12}$ м

Г) $5{,}43\cdot10^{-12}$ м

Т57. Угол рассеяния γ -излучения при комптоновском рассеянии на свободном электроне равен 180°. При этом длина волны увеличилась на $\left(\lambda_C = \dfrac{h}{mc} - \text{комптоновская длина волны электрона}\right)$…

А) $2\dfrac{h}{mc}$

Б) $\dfrac{h}{2mc}$

В) $\dfrac{h}{mc}$

Г) $\dfrac{h}{4mc}$

8. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Идея о существовании давления света на вещества была высказана еще И. Кеплером в XVII веке для объяснения отклонения хвостов комет от Солнца.

В 1873 году Дж. Максвелл исходя из представлений об электромагнитной природе света пришел к выводу, что свет должен оказывать давление на препятствия. С точки зрения теории Максвелла, свет – это электромагнитная волна определенного диапазона частот. Если это так, то под действием электрического поля волны заряженные частицы вещества начинают упорядоченно двигаться. На эти движущиеся заряды действует магнитное поле волны с силой Лоренца, направленной в сторону распространения волны. Таким образом, свет оказывает давление на тела.

Экспериментальное подтверждение существования светового давления было дано русским ученым П.Н. Лебедевым в 1900 году. В исключительно тонких физических экспериментах он измерил давление света на твердые тела, использовав для этого чувствительные крутильные весы. Результаты эксперимента совпали с теорией Максвелла. В 1910 году Лебедев доказал существование давления света на газы.

Световое давление объясняется и на основе квантовой теории, согласно которой свет испускается, распространяется и поглощается порциями (квантами), называемыми фотонами. Фотон – элементарная частица, не имеющая массы и всегда движущаяся со скоростью света. Энергия фотона

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка; ν – частота. Согласно этой теории давление света – результат передачи импульса фотонов веществу в процессе поглощения и отражения света.

Пусть на поверхность площадью S перпендикулярно к ней за время Δt падает N фотонов. Каждый фотон обладает импульсом

$$P_{\text{ф}} = \frac{h\nu}{c}.$$

При соударении с поверхностью фотон передает ей свой импульс. Импульс, полученный поверхностью, равен по величине и противоположен по направлению изменению импульса фотона $\Delta P_{\text{ф}}$.

Если фотон поглощается (поверхность абсолютно черная), то изменение его импульса

$$\Delta P_{\text{ф}} = -P_{\text{ф}}.$$

Если фотон отражается (поверхность зеркальная), то изменение его импульса

$$\Delta P_{\text{ф}} = -2P_{\text{ф}}.$$

Согласно второму закону Ньютона поверхность тел будет действовать на фотон с силой

$$f_{1n} = \frac{\Delta P_{\text{ф}}}{\Delta t}.$$

По третьему закону Ньютона с такой же по величине силой, противоположно направленной, будет действовать фотон на поверхность тела

$$f_{1\text{ф}} = -f_{1n}.$$

Таким образом, сила давления, оказываемая на поверхность одним поглощенным фотоном за время Δt:

$$f_{1\text{ф погл}} = \frac{P_{\text{ф}}}{\Delta t},$$

а сила давления, оказываемая одним отраженным фотоном, будет в два раза больше.

Давление света P, оказываемое на поверхность S за время Δt всеми фотонами:

$$P = \frac{F}{S},$$

где F – сила давления, действующая на поверхность со стороны всех фотонов.

Если все фотоны поглощаются поверхностью, то давление света

$$P_{\text{погл}} = \frac{Nh\nu}{Sc\Delta t},$$

если все фотоны отражаются телом в обратном направлении

$$P_{\text{отр}} = 2P_{\text{погл}}.$$

Наконец, если отраженная доля фотонов ρ (ρ – коэффициент отражения), а поглощенная доля соответственно $(1-\rho)$, то для давления света на поверхность получается выражение

$$P = \frac{2Nh\nu}{Sc\Delta t}\rho + \frac{Nh\nu}{Sc\Delta t}(1-\rho) = \frac{Nh\nu}{Sc\Delta t}(1+\rho).$$

В этом выражении энергия всех фотонов $W = Nh\nu$, а величина $E_e = \frac{W}{S\Delta t}$ – энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, или ***плотность потока световой энергии*** (облученность поверхности).

Тогда выражение для светового давления примет вид

$$P = \frac{E_e}{c}(1+\rho).$$

Заменяя $w = \frac{E_e}{c}$, где w – ***объемная плотность энергии*** (энергия фотонов, заключенная в единице объема), получим выражение для давления света:

$$P = w(1+\rho).$$

Это уравнение совпадает с уравнением давления света, полученного из электромагнитной (волновой) теории света Максвелла.

Примеры тестовых заданий

1. Если увеличить в 2 раза объемную плотность световой энергии, то давление света…

А) останется неизменным
Б) увеличится в 2 раза
В) увеличится в 4 раза.
Г) уменьшится в 2 раза

Решение

Давление света P пропорционально объемной плотности световой w энергии. Поэтому при увеличении объемной плотности световой энергии в два раза давление также увеличится в два раза.

Ответ: Б).

2. Зеркальную пластинку, на которую падает свет, заменили на зачерненную той же площади. В результате давление света…

А) увеличилось в 2 раза
Б) осталось неизменным
В) уменьшилось в 2 раза
Г) увеличилось в 4 раза

Решение

Для зеркальной пластинки коэффициент отражения $\rho_{\text{зерк}} = 1$, а для зачерненной коэффициент отражения $\rho_{\text{черн}} = 0$.

Тогда давление света на зеркальную пластинку $P_{\text{зерк}} = w(1+\rho_{\text{зерк}}) = 2w$, а давление света на зачерненную пластинку $P_{\text{черн}} = w(1+\rho_{\text{черн}}) = w$.

Отношение $\dfrac{P_{\text{зерк}}}{P_{\text{черн}}} = 2$. Следовательно, при замене зеркальной пластинки на зачерненную той же площади давление уменьшится в два раза. Правильный ответ – В).

Ответ: В).

Тестовые задания для самостоятельного решения

Т58. Если уменьшить в 2 раза объемную плотность световой энергии, то давление света…

А) останется неизменным
Б) увеличится в 2 раза
В) увеличится в 4 раза.
Г) уменьшится в 2 раза

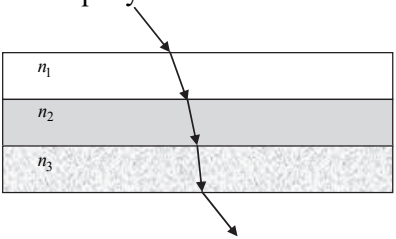
Т59. Свет падает на зеркальную пластинку. Если число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, уменьшить в 2 раза, а зеркальную пластинку заменить черной, то давление света:

А) останется неизменным
Б) увеличится в 2 раза
В) увеличится в 4 раза.
Г) уменьшится в 4 раза.

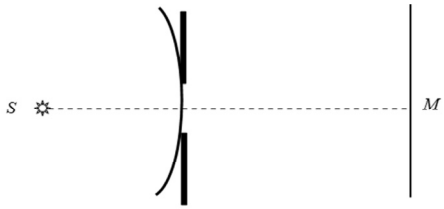
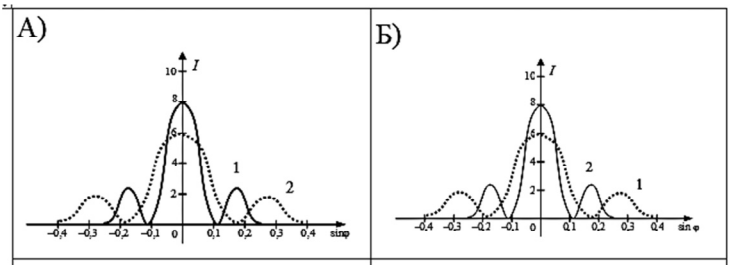
Т60. Параллельный пучок света падает по нормали на зачерненную плоскую поверхность, производя давление p. При замене поверхности на зеркальную давление света не меняется, если угол падения равен…

А) 60°
Б) 30°
В) 45°
Г) 90°

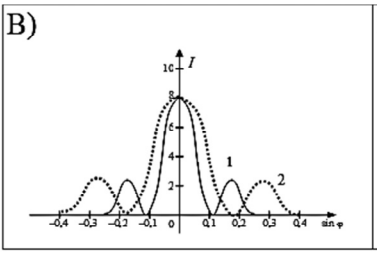
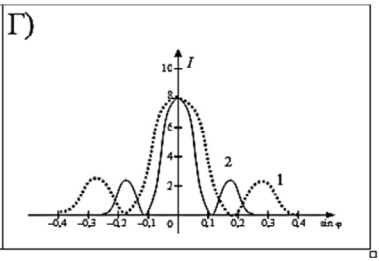
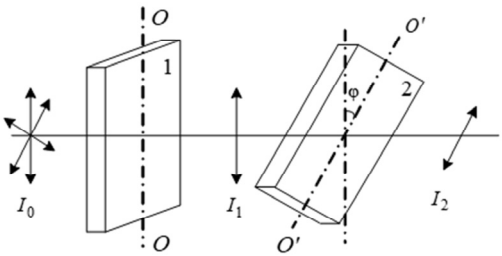
9. ПРИМЕР ТЕСТОВОГО ЗАДАНИЯ С РЕШЕНИЕМ

Номер задания	Тестовые задания
1	Какие из нижеперечисленных явлений объясняются на основе волновой теории света: 1) дифракция света; 2) интерференция света; 3) фотоэффект; 4) дисперсия; 5) поляризация света? А) 1, 2 и 3 В) 3, 4 и 5 Б) 1, 2, 4 и 5 Г) только 3 *Ответ:*
2	Пучок монохроматического света падает на три плоскопараллельные пластинки с разными показателями преломления. Ход лучей показан на рисунке.  Показатели преломления этих пластин соотносятся между собой как А) $n_1 = n_2 = n_3$ В) $n_1 < n_2 < n_3$ Б) $n_1 > n_2 > n_3$ Г) $n_1 > n_2 < n_3$ *Ответ:*

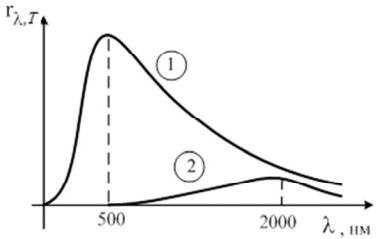
Продолжение таблицы

Номер задания	Тестовые задания
3	Сферическая волна с амплитудой A_0 распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием, открывающим только две первые зоны Френеля. Амплитуда света в центре экрана (точка *M*) равна…  А) A_0 В) $2A_0$ Б) $\frac{A_0}{\sqrt{2}}$ Г) 0 *Ответ:*
4	На дифракционную решетку падает излучение одинаковой интенсивности с длиной волн λ_1 и λ_2. Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых дифракционной решеткой, если $\lambda_1 < \lambda_2$? (I – интенсивность света, φ – угол дифракции) 

Продолжение таблицы

Номер задания	Тестовые задания
	В)  Г)  *Ответ:*
5	На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и $I_2 = 0$, то угол φ между направлениями OO и $O'O'$ …  А) 0° В) 90° Б) 60° Г) 30° *Ответ:*
6	Из приведенных ниже утверждений укажите **неверное** … А) Если свет падает на стекло под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг другу Б) Свет, отраженный от границы раздела при полном внутреннем отражении, является полностью поляризованным

Продолжение таблицы

Номер задания	Тестовые задания
	В) Раствор сахара поворачивает плоскость поляризации поляризованного света Г) Поляризованный свет можно получить с помощью поляроидов *Ответ:*
7	На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая 2 соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1500 К, то кривая *1* соответствует температуре (в градусах Кельвина) …  А) 6000 Б) 3000 В) 1000 Г) 750 *Ответ:*
8	Ниже приведены пять формул. Какая из них является формулой Рэлея–Джинса для испускательной способности абсолютно черного тела? А) $\frac{r(\omega,T)}{a(\omega,T)} = f(\omega,T)$ Б) $R_T = \int_0^\infty r(\omega,T)d\omega$ В) $R_T^* = \sigma T^4$ Г) $f(\omega,T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$ *Ответ:*

Продолжение таблицы

Номер задания	Тестовые задания
9	При внешнем фотоэффекте величина работы выхода зависит… А) от энергии фотоэлектронов Б) от материала фотокатода В) от частоты света, вызывающего фотоэффект Г) от интенсивности света *Ответ:*
10	Если максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при фотоэффекте возросла в 2 раза, значит частота света была (работой выхода электронов из металла пренебречь)… А) увеличена в 8 раз Б) уменьшена в 2 раза В) увеличена в 2 раза Г) уменьшена в 4 раза *Ответ:*
11	В Комптоновском рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах наибольшее изменение длины волны наблюдается, когда фотон рассеивается под углом… А) 0° В) 90° Б) 45° Г) 180° *Ответ:*
12	Фотон с длиной волны $\lambda = 3{,}00 \cdot 10^{12}$ м рассеялся на свободном электроне под углом $\theta = 120^\circ$. При этом длина волны рассеянного фотона стала равной (комптоновская длина волны электрона $\lambda_C = 2{,}43 \cdot 10^{-12}$ м)…

Окончание таблицы

Номер задания	Тестовые задания
	 А) $7{,}86\cdot10^{-12}$ м В) $6{,}65\cdot10^{-12}$ м Б) $4{,}22\cdot10^{-12}$ м Г) $5{,}43\cdot10^{-12}$ м *Ответ:*

Решение

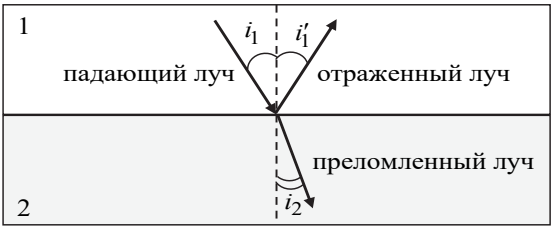
1. На основе волновой теории света, согласно которой свет – это распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны высокой частоты, объясняются явления интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии.

Фотоэффект невозможно объяснить на основе волновой теории света: этот эффект был объяснен Эйнштейном в 1905 году с помощью квантовой теории света.

Правильный ответ: Б).

2. При падении света на границу раздела двух диэлектриков выполняется закон преломления света, согласно которому отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 равно отношению абсолютных показателей преломления второй n_2 и первой среды n_1

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$



Таким образом, при переходе луча из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления угол преломления меньше угла падения (отклонение луча от перпендикуляра, проведенного в точке падения меньше).

Из хода луча, показанного на рисунке (отклонения от перпендикуляра в точке падения), видно, что $n_2 > n_1$ и $n_3 > n_2$, т. е. $n_1 < n_2 < n_3$.

Правильный ответ: Б).

3. Согласно методу зон Френеля волновой фронт разбивается на зоны Френеля так, что колебания световой волны от соседних зон Френеля когерентны и приходят в точку наблюдения M с противоположными фазами. При наложении эти колебания будут взаимно ослаблять друг друга.

Поэтому, если непрозрачный экран с круглым отверстием открывает только четное количество зон, то в центре экрана амплитуда результирующего колебания будет равна 0, что соответствует условию данного задания.

Правильный ответ: Г).

4. При дифракции света на дифракционной решетке условие, определяющее положение главных максимумов интенсивности света, имеет вид

$$d \sin \varphi = k\lambda, \qquad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots,$$

где d – период дифракционной решетки; λ – длина волны падающего света; φ – угол отклонения лучей, соответствующий k дифракционному максимуму.

Из этого условия следует, что чем меньше длина волны, тем меньше угол, под которым виден k максимум. По условию задачи $\lambda_1 < \lambda_2$, сле-

довательно, из предложенных вариантов надо выбрать те, где первый главный максимум для кривой *1* расположен ближе к началу координат. Это дифракционные картины, соответствующие ответам А) и В).

В условии задачи также сказано, что излучение имеет одинаковую интенсивность, т. е. значения интенсивности в центральном (и первом) максимуме для кривой *1* и кривой *2* должны иметь одно и то же значение. Этому условию соответствует вариант В).

Правильный ответ: В).

5. Интенсивность плоскополяризованного света I_2, прошедшего через два поляризатора (пластинки турмалина), согласно закону Малюса определяется выражением

$$I_2 = I_1 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi ,$$

где I_0 – интенсивность естественного света; I_1 – интенсивность поляризованного света после прохождения естественного света через первый поляризатор.

Из условия задания $I_2 = 0$, следовательно, $\cos^2 \varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$.

Правильный ответ: В).

6. Рассмотрим приведенные варианты ответов.

А) Если свет падает на границу раздела двух диэлектриков с показателями преломления n_1 и n_2, то при угле падения света под углом Брюстера $\theta_{БР}$, удовлетворяющего условию

$$\operatorname{tg} \theta_{БР} = \frac{n_2}{n_1},$$

отраженный луч полностью поляризован, и угол между преломленным и отраженным лучом составляет 90°. Утверждение верное.

Б) Явление полного внутреннего отражения происходит на границе двух сред при переходе света из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления, при этом преломленный луч отсутствует. Отраженный от границы раздела свет не является полностью поляризованным. Утверждение Б) – неверное.

В) При прохождении света через оптически активные вещества, к которым относится раствор сахара, плоскость поляризации поляризованного света поворачивается. Утверждение верное.

Г) Поляризованный свет можно получить с помощью поляроидов. Утверждение верное.

Единственное неверное утверждение из предложенных – это Б).

Правильный ответ: Б).

7. Длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, определяется ***законом смещения Вина***

$$\lambda_{\max} T = b\,,$$

где $b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянна Вина.

Для двух кривых, показанных на рисунке,

$$\lambda_{1\max} T_1 = \lambda_{2\max} T_2\,.$$

Из графика видно, что для второй кривой $\lambda_{2\max} = 2000$ нм, $\lambda_{1\max} = 500$ нм ($T_2 = 1500$ К по условию), тогда

$$T_1 = T_2 \frac{\lambda_{2\max}}{\lambda_{1\max}} = 1500 \frac{2000}{500} = 6000 \text{ К}\,.$$

Правильный ответ: А).

8) Формула Рэлея–Джинса для спектральной плотности энергетической светимости (излучательной способности) абсолютно черного тела имеет вид

$$f(w,T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT\,,$$

где ω – циклическая частота; k – постоянная Больцмана; T – температура; c – скорость света.

Правильный ответ: Г).

9. Внешним фотоэффектом называется явление вырывания электронов из вещества под действием электромагнитного излучения (света).

Работой выхода называется наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, для того чтобы удалить его из вещества. Она зависит только от материала фотокатода и качества обработки поверхности.

Правильный ответ: Б).

10. Внешний фотоэффект описывается уравнением Эйнштейна, которое выражает закон сохранения энергии: энергия падающего фотона $h\nu$ расходуется на работу выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и сообщение вылетевшему электрону кинетической энергии $T_{\max}$

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T_{\max} .$$

По условию задачи работой выхода можно пренебречь, тогда уравнение Эйнштейна примет вид

$$h\nu \approx T_{\max},$$

и при возрастании максимальной кинетической энергии $T_{\max}$ в два раза возрастет энергия фотона $h\nu$ и, следовательно, частота света ν.

Правильный ответ: В).

11. При рассеянии рентгеновского излучения на свободных или слабосвязанных электронах вещества в рассеянном излучении наряду с излучением первоначальной длины волны λ наблюдается излучение большей длины волны λ'.

Это явление называется эффектом Комптона и описывается уравнением

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\Theta),$$

где $\lambda_C = 2{,}43$ пм – комптоновская длина волны для электрона; Θ – угол рассеяния.

Из этого выражения следует, что наибольшее изменение длины волны наблюдается при рассеянии фотона под углом $\Theta = 180°$, $\cos\Theta = -1$, $\Delta\lambda = 2\lambda_C = 4{,}86$ пм.

Правильный ответ: Г).

12. Изменение длины волны рассеянного рентгеновского излучения при рассеянии рентгеновского излучения на свободных или слабосвязанных электронах вещества называется эффектом Комптона и описывается уравнением

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\Theta),$$

где $\lambda_C = 2{,}43$ пм – комптоновская длина волны для электрона; Θ – угол рассеяния.

Отсюда

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \lambda + \lambda_C (1 - \cos\Theta) =$$

$$= 3{,}00 \cdot 10^{-12} + 2{,}43 \cdot 10^{-12} (1 - \cos 120°) = 6{,}65 \cdot 10^{-12} \text{ пм}.$$

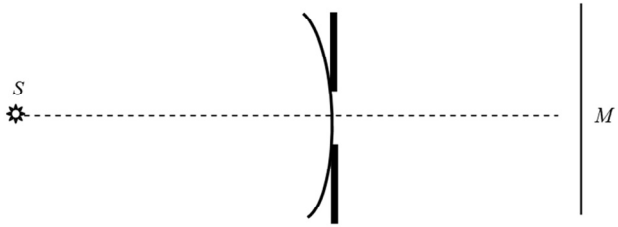
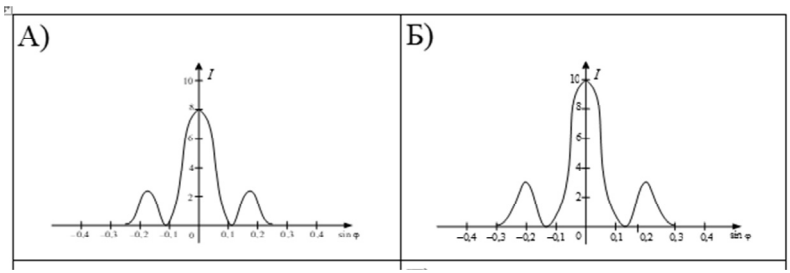
Правильный ответ: В).

10. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

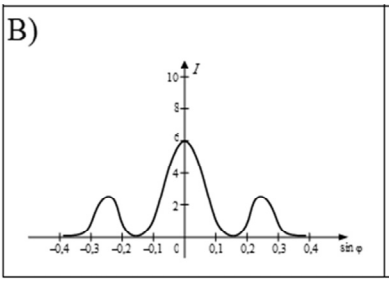
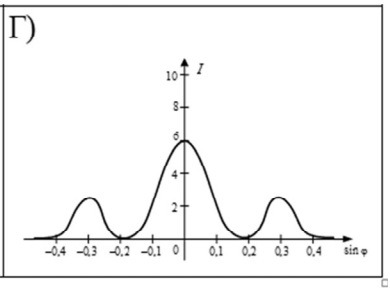
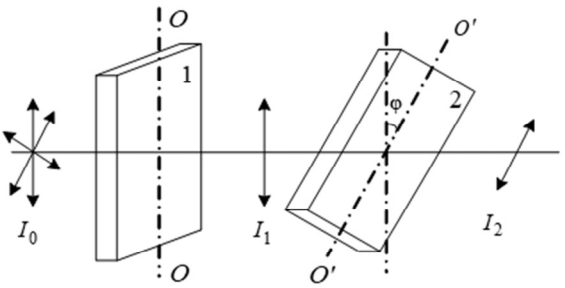
Тест № 1

Номер теста	Тестовые задания
1	В какой из следующих прозрачных сред скорость света наименьшая: вода (n = 1,3), спирт (n = 1,36), глицерин (n = = 1,47)? (n – показатель преломления) А) в спирте Б) во всех этих средах скорость света одинакова В) в воде Г) в глицерине *Ответ:*
2	Во сколько раз изменится ширина интерференционной полосы при наблюдении на экране интерференции от двух щелей, если монохроматический источник излучения, излучающего красный свет с длиной волны $\lambda_1 = 0,65$ мкм, заменить на зеленый с длиной волны $\lambda_1 = 0,5$ мкм А) увеличится в 1,3 раза Б) не изменится В) уменьшится 1,3 раза Г) увеличится в 2,6 раза *Ответ:*

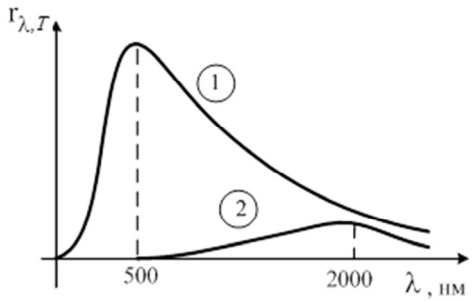
Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
3	Сферическая волна распространяется от точечного источника *S*. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием. В центре экрана (точка *M*) будет наиболее темное пятно, если в отверстии помещается…  А) 1 зона Френеля Б) 2 зоны Френеля В) 3 зоны Френеля Г) 5 зон Френеля *Ответ:*
4	Имеются четыре дифракционных решетки с различными постоянными решетки *d*, освещаемые одним и тем же монохроматическим излучением различной интенсивности. Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых дифракционной решеткой с наибольшей постоянной решетки? (*I* – интенсивность света, φ – угол дифракции). 

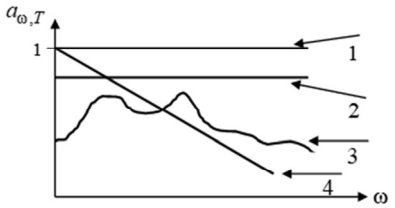
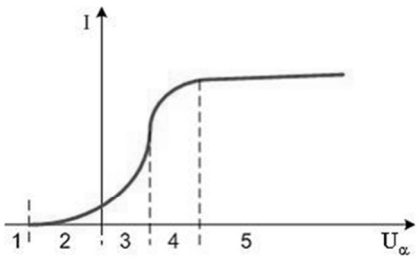
Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
	В)  Г)  *Ответ:*
5	На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями OO и $O'O'$ $\varphi = 60°$, то I_1 и I_2 связаны соотношением …  А) $I_2 \frac{I_1}{4}$ В) $I_2 \frac{3I_1}{4}$ Б) $I_2 \frac{I_1}{2}$ Г) $I_2 = I_1$ *Ответ*:

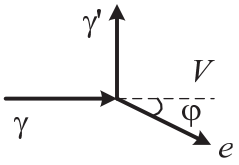
Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
6	Луч света падает на стеклянную пластинку с показателем преломления $n = \sqrt{3}$. Если преломленный луч оказался перпендикулярным к отраженному, то угол падения равен… А) 90° В) 45° Б) 60° Г) 30° *Ответ:*
7	На рисунке показана кривая зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при $T = 6000$ К Если температуру тела уменьшить в два раза, то энергетическая светимость абсолютно черного тела уменьшится …  А) в 16 раз В) в 4 раза Б) в 2 раза Г) в 8 раз *Ответ:*
8	На рисунке приведены четыре вида зависимости поглощательной способности тела от частоты падающего излучения. Абсолютно черному телу соответствует зависимость:

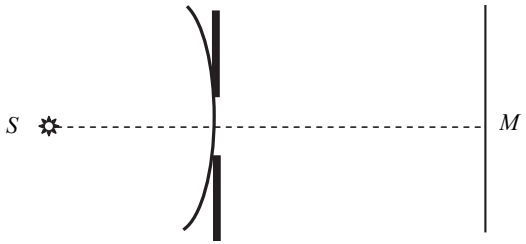
Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
	 А) 1 Б) 2 В) 3 Г) 4 *Ответ:*
9	Если минимальная энергия фотонов, вызывающих фотоэффект, равна 4,5 эВ, то работа выхода электрона из метала (в электроновольтах) равна… А) 5,0 эВ Г) 9 эВ Б) 4,5 эВ Д) 2,8 эВ В) 2,25 эВ *Ответ:*
10	На рисунке приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоприемника с внешним фотоэффектом. На графике этой ВАХ попаданию всех, вылетевших в результате фотоэмиссии электронов, на анод фотоприемника соответствует область... 

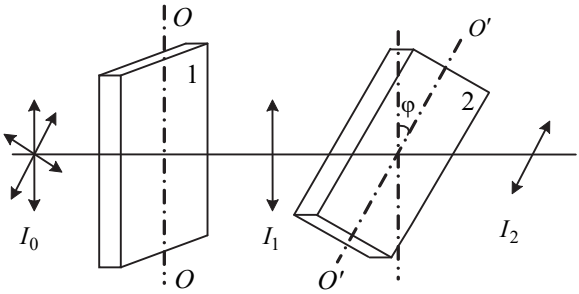
Окончание таблицы

Номер теста	Тестовые задания
	А) 1 Г) 4 Б) 5 Д) 3 В) 2 *Ответ:*
11	На рисунке показаны направления падающего фотона (γ), рассеянного фотона (γ') и электрона отдачи (e). Угол рассеяния 90°, направление движения электрона отдачи составляет с направлением падающего фотона угол $\varphi = 30°$. Если импульс падающего фотона $3\,(\text{МэВ}\cdot\text{с})/\text{м}$, то импульс рассеянного фотона (в тех же единицах) равен…  А) $\sqrt{3}$ В) $2\sqrt{3}$ Б) 1,5 Г) $1{,}5\sqrt{3}$ *Ответ:*
12	Свет падает на зеркальную пластинку. Если число фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, уменьшить в два раза, а зеркальную пластинку заменить черной, то давление света: А) останется неизменным Б) увеличится в 2 раза В) увеличится в 4 раза. Г) уменьшится в 2 раза Д) уменьшится в 4 раза *Ответ:*

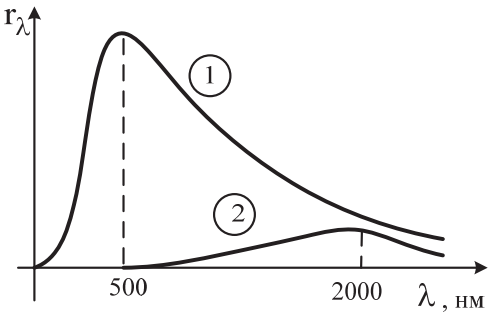
Тест № 2

Номер теста	Тестовые задания
1	Из каких экспериментальных фактов вытекает, что свет – это поперечные волны? А) из опытов по наблюдению колец Ньютона Б) из опытов по наблюдению полного отражения света В) из опытов с дифракционными решетками Г) из опытов по прохождению света через кристаллы турмалина *Ответ:*
2	Монохроматический свет падает нормально на тонкую мыльную пленку, находящуюся в воздухе. Если λ – длина волны падающего света, а n – показатель преломления пленки, то при какой наименьшей толщине пленки d отраженный свет будет максимально усилен… А) $d = \frac{\lambda}{n}$ В) $d = \frac{\lambda}{2n}$ Б) $d = \frac{\lambda}{4n}$ Г) $d = \frac{3\lambda}{4n}$ *Ответ:*
3	Сферическая волна с интенсивностью I_0 распространяется от точечного источника S. На экране наблюдается интерференционная картина. На пути волны располагается непрозрачный экран с круглым отверстием, открывающим только две первые зоны Френеля. Интенсивность света в центре экрана (точка M) равна 

Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
	А) 0 Б) $\frac{I_0}{2}$ В) $2I_0$ Г) $4I_0$ *Ответ:*
4	Дифракционная решетка с числом щелей N, периодом d и шириной щели a освещается монохроматическим светом с длиной волны λ, падающим перпендикулярно к ее поверхности. Условием определения главных дифракционных максимумов является (m и m' – целое число) … А) $d\sin\varphi = m\lambda$ В) $d\sin\varphi = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ Б) $a\sin\varphi = m\lambda$ Г) $d\sin\varphi = \pm m'\lambda / N$ *Ответ:*
5	На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Если I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2 соответственно, и угол между направлениями OO и $O'O'$ $\varphi = 30°$, то I_1 и I_2 связаны соотношением …  А) $I_2 = \frac{I_1}{4}$ Б) $I_2 = \frac{I_1}{2}$ В) $I_2 = \frac{3I_1}{4}$ Г) $I_2 = I_1$ *Ответ*:

Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
6	При падении луча света на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера взаимно перпендикулярны лучи… А) отраженный и преломленный Б) падающий и отраженный В) падающий и преломленный Г) нет верного ответа *Ответ:*
7	На рисунке показаны кривые зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах. Если кривая *1* соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при температуре 1000 К, то кривая *2* соответствует температуре (в градусах Кельвина)…  А) 600 В) 100 Б) 300 Г) 250 *Ответ:*
8	Ниже приведены пять формул. Какая из них является законом Кирхгофа для теплового излучения?

Продолжение таблицы

Номер теста	Тестовые задания
	А) $\frac{r(\omega,T)}{a(\omega,T)} = f(\omega,T)$ Г) $f(\omega,T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$ Б) $R_T = \int_0^\infty r(\omega,T)\,d\omega$ Д) все варианты не верны. В) $R_T^* = \sigma T^4$ *Ответ:*
9	Из приведенных ниже выражений формулой Эйнштейна для внешнего фотоэффекта является… А) $I_{\text{нас}} = en$ В) $\hbar\omega = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}$ Б) $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_з$ Г) $R_e = \sigma T^4$ *Ответ:*
10	В результате изменения частоты света, падающего на фотоэлемент, задерживающая разность потенциалов увеличилась в 2 раза. При этом максимальная скорость фотоэлектронов…. А) увеличилась в 4 раза Б) не изменилась В) уменьшилась в 2 раза Г) увеличилась в 2 раза Д) увеличилась в 4 раза *Ответ:*
11	В комптоновском рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах наибольшее изменение длины волны наблюдается, когда фотон рассеивается под углом… А) 0° Б) 30° В) 45° Г) 90° Д)180° *Ответ:*

Окончание таблицы

Номер теста	Тестовые задания
12	Зеркальную пластинку, на которую падает свет, заменили на зачерненную той же площади. В результате давление света… А) увеличилось в 2 раза Б) осталось неизменным В) уменьшилось в 2 раза Г) увеличилось в 4 раза Д) уменьшилось в 4 раза. *Ответ:*

11. ОТВЕТЫ К ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Т1. Б)	**Т2. В)**	**Т3. Г)**	**Т4. Б)**	**Т5. Б)**
Т6. А)	**Т7. А)**	**Т8. Б)**	**Т9. Б)**	**Т10. Г)**
Т11. А)	**Т12. В)**	**Т13. Г)**	**Т14. Г)**	**Т15. Б)**
Т16. В)	**Т17. Б)**	**Т18. А)**	**Т19. В)**	**Т20. А)**
Т21. Г)	**Т22. В)**	**Т23. В)**	**Т24. Б)**	**Т25. А)**
Т26. Б)	**Т27. А), Г)**	**Т28. Б)**	**Т29. А)**	**Т30. Г)**
Т31. Б)	**Т32. А)**	**Т33. Б)**	**Т34. А)**	**Т35. А)**
Т36. А)	**Т37. Г)**	**Т38. Г)**	**Т39. Б)**	**Т40. В)**
Т41. В)	**Т42. А)**	**Т43. А)**	**Т44. Б)**	**Т45. А)**
Т46. Г)	**Т47. Б)**	**Т48. А)**	**Т49. В)**	**Т50. А)**
Т51. В)	**Т52. В)**	**Т53. Г)**	**Т54. А)**	**Т55. Г)**
Т56. В)	**Т57. А)**	**Т58. Г)**	**Т59. Г)**	**Т60. А)**

Тест № 1

Номер задания	**1 Г)**	**2 В)**	**3 Б)**	**4 А)**	**5 А)**	**6 Б)**
Номер задания	**7 А)**	**8 А)**	**9 Б)**	**10 Б)**	**11 А)**	**12 Д)**

Тест № 2

Номер задания	**1 Г)**	**2 Б)**	**3 А)**	**4 А)**	**5 В)**	**6 А)**
Номер задания	**7 Г)**	**8 А)**	**9 В)**	**10 А)**	**11 Д)**	**12 В)**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М., 2007.

2. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. Основные законы. – СПб., 2003.

3. *Чертов А.Г., Воробьев А.А.* Задачник по физике. – М., 2007.

4. *Сарина М.П.* Колебания, волны оптика. Часть 2. Оптика. – Новосибирск, 2015.

5. *Сарина М.П.* Оптика, квантовая природа излучения. Элементы квантовой механики. Основы физики твердого тела. Ядерная физика. – Новосибирск, 2018.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

1. Волновая природа света 4

Примеры тестовых заданий 6

Тестовые задания для самостоятельного решения 7

2. Интерференция 9

Интерференция света от двух источников 13

Интерференция света в плоскопараллельных пластинах 15

Кольца Ньютона 16

Примеры тестовых заданий 19

Тестовые задания для самостоятельного решения 27

3. Дифракция 31

Дифракция на круглом отверстии 33

Дифракция Фраунгофера на узкой бесконечной щели 34

Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке 36

Графический метод сложения амплитуд. Спираль Френеля 39

Примеры тестовых заданий 42

Тестовые задания для самостоятельного решения 49

4. Поляризация света 53

Естественный и поляризованный свет 53

Поляризаторы. Закон Малюса 54

Поляризация при отражении и преломлении. Закон Брюстера 57

Оптически активные вещества 58

Дисперсия 58

Примеры тестовых заданий 59

Тестовые задания для самостоятельного решения 62

5. Тепловое излучение и его характеристики 65
Примеры тестовых заданий 69
Тестовые задания для самостоятельного решения 73
6. Фотоэффект 76
Примеры тестовых заданий 79
Тестовые задания для самостоятельного решения 83
7. Эффект Комптона 85
Примеры тестовых заданий 87
Тестовые задания для самостоятельного решения 90
8. Давление света 93
Примеры тестовых заданий 96
Тестовые задания для самостоятельного решения 97
9. Пример тестового задания с решением 98
10. Тестовые задания для самостоятельного решения 109
Тест № 1 109
Тест № 2 115
11. Ответы к тестовым заданиям для самостоятельного решения 120
Тест № 1 120
Тест № 2 120
Библиографический список 121

Сарина Марина Павловна
Холявко Валерий Николаевич

ВОЛНОВАЯ
И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 12.02.2019. Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экз.
Уч.-изд. л. 7,2. Печ. л. 7,75. Изд. № 338/18. Заказ № 441. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20