



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

М.А. Бутюгин,  
А.А. Куколева,  
А.Н. Разумовский

**ФИЗИКА**

**ВОЛНОВАЯ  
И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие  
по выполнению контрольных работ  
и контрольные задания

для студентов I курса  
всех специальностей и направлений  
заочной формы обучения

Москва  
2019

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

---

**Кафедра физики**

**М.А. Бутюгин, А.А. Куколева, А.Н. Разумовский**

**ФИЗИКА**  
**ВОЛНОВАЯ**  
**И КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

**Учебно-методическое пособие**  
**по выполнению контрольных работ**  
**и контрольные задания**

*для студентов I курса*  
*всех специальностей и направлений*  
*заочной формы обучения*

Москва  
2019

ББК 53  
Б-93

Рецензент:

*Камзолов С.К.* – д-р техн. наук, профессор

**Бутюгин М.А.**

Б-93      Физика. Волновая и квантовая оптика: учебно-методическое пособие по выполнению контрольных работ. / М.А. Бутюгин, А.А. Куколева, А.Н. Разумовский. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 48 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика. Волновая и квантовая оптика» по учебному плану для студентов I курса всех специальностей и направлений заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 29.08.2019 г. и методического совета 10.09.2019 г.

*В авторской редакции.*

Подписано в печать 07.10.2019 г.  
Формат 60x84/16 Печ.л. 3 Усл. печ. л. 2,79  
Заказ 528/2880 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
*125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20*

Отпечатано ООО «МИР»  
394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119А, лит. Я, оф. 215  
Тел.: 8 (958) 649-53-31 Email: 89586495331@mail.ru

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2019

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
Рекомендуемая литература .....	5
Основные теоретические сведения и примеры решения задач	6
Тема 1. Электромагнитные волны в вакууме.....	6
Тема 2. Поляризация электромагнитных волн .....	8
Тема 3. Интерференция электромагнитных волн	11
Тема 4. Дифракция электромагнитных волн.....	14
Тема 5. Электромагнитные волны в веществе	19
Тема 6. Квантовая оптика .....	20
Тема 7. Равновесное тепловое излучение.....	25
Задачи к контрольной работе .....	30

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое издание содержит методические указания и типовые задания к решению задач по пятой части курса физики «Волновая и квантовая оптика». Распределение задач по вариантам обеспечивает студентам индивидуальные наборы наиболее типичных для каждой темы задач. Для удобства выполнения индивидуальных заданий пособие содержит краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы. Кроме того, приводятся примеры решения задач по разделам изучаемого курса.

При оформлении контрольных работ студенту-заочнику необходимо руководствоваться следующими правилами.

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

<p style="text-align: center;">Контрольная работа по физике №5 <b>Вариант № 54</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Студента заочного факультета МГТУ ГА</b> <b>Филиппова А.М.</b> <b>Шифр АК – 037345</b></p> <p style="text-align: center;">Адрес: г. Тюмень, ул. Киевская, дом 61, кв.52</p>
--

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

3. Студент-заочник должен решить **задачи** того варианта, номер которого совпадает с последними **двумя** цифрами его **Шифра**. Задачи варианта выбираются по **таблицам, размещенным на вкладке заочного факультета на сайте университета** («контрольные задания и консультации»), где они представлены для каждого направления и семестра обучения в отдельных файлах:

4. Условия задач переписываются в тетрадь **полностью, без сокращений**. Для замечаний преподавателя на страницах тетради обязательно оставляются поля шириной 4-5 см.

5. Решение задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями.

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

7. В конце контрольной работы указывается, какими учебными пособиями студент пользовался при выполнении контрольной работы (название, авторы, год издания).

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

Для самостоятельного изучения курса Физики ниже приводится список литературы.

## **Рекомендуемая литература**

### **Основная литература**

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2006-2018.

### **Дополнительная литература**

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика - М.: Наука, 2006-2019.

3. Савельев И.В. Курс общей физики Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: Наука, 2006-2019.

4. Дмитриева В.Д., Прокофьев В.Л. **Основы физики:** учебное пособие для студентов вузов. - М.: Высшая школа, 2009-2016. –527с.

**Электронный адрес кафедры физики МГТУ ГА: [kf@mstuca.ru](mailto:kf@mstuca.ru)**

## ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### Тема 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ВАКУУМЕ

Электромагнитные волны (ЭМВ) – это возмущения электромагнитного поля (переменное электромагнитное поле), распространяющиеся в пространстве. Скорость ЭМВ в вакууме постоянна и равна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с ( $c$  – скорость света). ЭМВ – поперечные волны: вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  поля волны лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Волновая поверхность – это геометрическое место точек, в которых фаза волны в рассматриваемый момент времени имеет одно и то же значение. В зависимости от формы поверхности различают плоские, сферические, *цилиндрические* и др. волны

При изучении свойств электромагнитных волн особое значение имеют **бегущие плоские гармонические волны**, так как любую другую волну можно представить через суперпозицию определенного набора таких волн. Векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции в бегущей плоской гармонической волне взаимно **ортогональны** и изменяются **синфазно** в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned} E_y(x, t) &= E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \\ B_z(x, t) &= B_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Формулы (1.1) описывают волну, распространяющуюся в направлении оси  $OX$ .

**Волновой вектор**  $\vec{k}$  указывает направление распространения волны. Модуль волнового вектора называется **волновым числом**  $k$  и определяется по формуле:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{k}$  (или  $\vec{c}$ ) составляют (правовинтовую) тройку векторов (рис. 1.1.). Модули векторов связаны соотношением:

$$E = cB. \quad (1.3)$$

Напомним, что  $\varphi = (\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)$  – фаза волны в точке, описываемой радиус-вектором  $\vec{r}$  в момент времени  $t$ ,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\omega$  – круговая (или циклическая) частота.

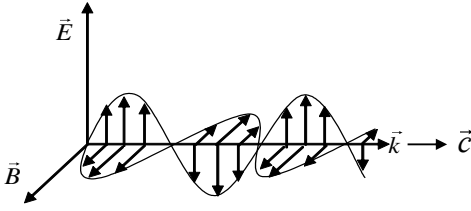


Рис. 1.1. Правовинтовая тройка векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{k}$

Частота  $\nu$  и период  $T$  колебаний связаны соотношением:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (1.4)$$

Магнитное поле часто описывают с помощью вектора напряженности магнитного поля  $H$ , модуль которого связан с модулем вектора напряженности электрического поля  $E$  соотношением:

$$\varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2, \quad (1.5)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\varepsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно.

Электромагнитные волны переносят энергию, плотность которой равна сумме плотностей энергии электрического  $w_{эл}$  и магнитного  $w_m$  полей и в вакууме определяется по формуле:

$$w = w_{эл} + w_m = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (1.6)$$

Произведение плотности энергии на скорость распространения волны дает модуль вектора плотности потока энергии

$$S = wc = EH. \quad (1.7)$$

Этот вектор называют **вектором Умова-Пойнтинга**:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]. \quad (1.8)$$

Поскольку векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{S}$  быстро осциллируют, на практике используют среднюю величину, которая называется **интенсивностью** волны:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = c \langle w \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \langle E^2 \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{E_0^2}{2}. \quad (1.9)$$

Обращаем внимание на то, что интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды напряженности вектора  $E$ .



## Тема 2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Итак, вектор напряжённости электрического поля плоской волны  $\vec{E}$  всегда расположен в плоскости, перпендикулярной направлению её распространения (то есть, лучу). Обычные источники света являются совокупностью огромного числа элементарных источников (атомов или молекул), испускающих свет независимо друг от друга, с разными фазами и с разными ориентациями векторов  $E$  и  $H$ . По этой причине ориентация векторов  $E$  и  $H$  в результирующей волне хаотически изменяется во времени, так что в плоскости, перпендикулярной лучу, все направления оказываются в среднем равноправными. Такой свет называют естественным или неполяризованным

Если колебания вектора  $\vec{E}$  (и, соответственно, вектора  $\vec{B}$ ) каким-либо образом упорядочены, то говорят, что волна поляризована. Если колебание вектора  $\vec{E}$  происходит строго в одной плоскости, называемой плоскостью поляризации, то волну называют **линейно-поляризованной** или **плоскополяризованной** (рис. 2.1).

Плоская ЭМВ **эллиптически поляризована**, если векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , оставаясь взаимно перпендикулярными, изменяются с течением времени так, что их концы описывают эллипсы (на рис. 2.2 показан только вектор  $\vec{E}$ ). Если концы вектора  $\vec{E}$  с течением времени описывают окружность, то волну называют циркулярно-поляризованной (или поляризованной по кругу).

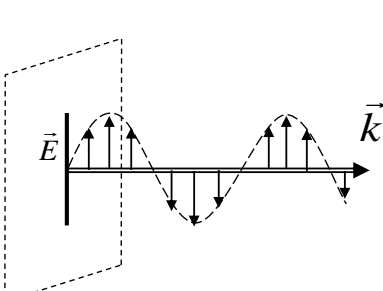


Рис. 2.1. Линейно-поляризованная волна

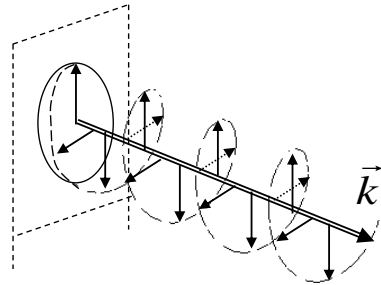


Рис. 2.2. Циркулярно-поляризованная волна

Поляризатор – оптическое устройство для получения линейно-поляризованного света. Эти приборы пропускают направления колебания вектора  $\vec{E}$  только в одной плоскости, называемой **плоскостью поляризатора** (его часто называют разрешенным направлением поляризатора).

При прохождении волны через поляризатор пропускается только проекция вектора  $\vec{E}$  (рис. 2.3):

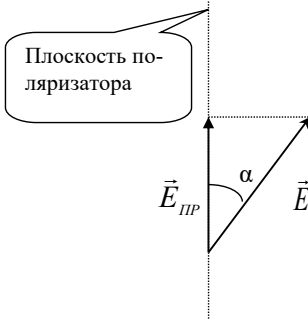
$$E_{\text{ПР}} = E \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью поляризации падающей волны и плоскостью поляризатора.

Учитывая, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды вектора напряженности  $E$  (формула 1.9) для интенсивности прошедшей поляризатор и уже поляризованной волны ( $I_{\text{ПР}}$ ) можно записать **закон Малюса**:

$$I_{\text{ПР}} = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.2)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающей линейно-поляризованной волны.



При прохождении естественного неполяризованного света через поляризатор среднее значение  $\langle \cos^2 \alpha \rangle = 1/2$ , и закон Малюса приводит к результату:

$$I_{\text{ПР}} = I_0/2 \quad (2.3)$$

Таким образом, после прохождения через поляризатор естественный свет становится линейно-поляризованным с вдвое меньшей интенсивностью (рис. 2.4).

Рис. 2.3. Компонента вектора  $E$  линейно-поляризованного света, прошедшего через поляризатор ( $E_{\text{ПР}}$ )

При прохождении через поляризатор света круговой поляризации на выходе также получаем линейно-поляризованный свет вдвое меньшей интенсивности, чем у падающего света.

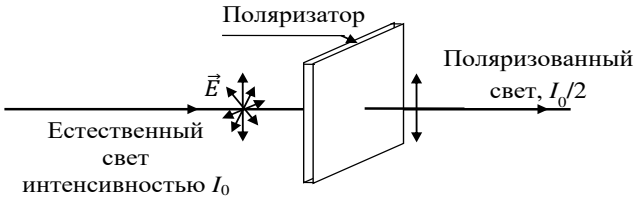


Рис. 2.4. Прохождение линейно-поляризованного света через поляризатор

Поляризатор, задерживающий перпендикулярные его плоскости колебания частично, будем называть несовершенным. Такой прибор даст частично поляризованный свет.

Принцип действия большинства используемых поляризаторов основан на явлении двойного лучепреломления света в кристаллах (подробнее см. [1, 2]).

### Пример решения задач

При прохождении естественного света через систему из двух поляризаторов его интенсивность уменьшилась в два раза. Когда между поляризаторами на пути луча поместили кварцевую пластинку, интенсивность уменьшилась еще в два раза. На какой угол повернулась плоскость поляризации луча в кварцевой пластине? Поглощением света в пластине пренебречь.

*Решение:*

После прохождения естественного света через первый поляризатор его интенсивность уменьшилась в два раза  $I_1 = \frac{I_0}{2}$ , и свет стал линейно-поляризованным в плоскости первого поляризатора. Согласно условию, до **размещения** кварцевой пластины интенсивность на выходе как раз и была равна половине исходной величины  $I_0$ . Следовательно, второй поляризатор не изменил интенсивность света, а это означает, что плоскости обоих поляризаторов параллельны (их направления обозначены пунктирными вертикальными линиями на рис. 2.5).

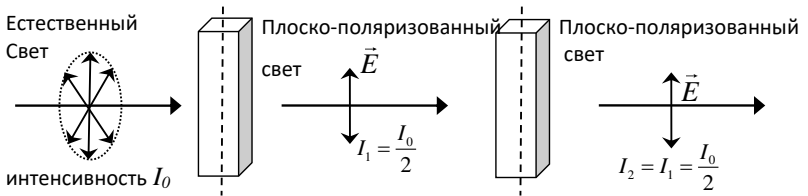


Рис. 2.5. Прохождение естественного света через систему из двух поляризаторов с параллельными плоскостями

Теперь рассмотрим ситуацию, когда между поляризаторами разместили кварцевую пластину (в результате чего интенсивность на выходе уменьшилась в 2 раза). Пластина приводит к повороту плоскости поляризации прошедшего через нее света на угол  $\alpha$  без изменения его интенсивности: интенсивность света за пластиной по-прежнему равна  $I_2 = I_0/2$  (рис. 2.6). Далее свет падает на второй поляризатор так, что вектор  $E$  уже составляет с его разрешенным направлением угол  $\alpha$ , и интенсивность света за вторым поляризатором по закону Малюса уменьшается:

$$I_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{I_0}{2} \right) = \frac{I_0}{4} = \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha .$$

Тогда

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}, \quad \cos \alpha = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Этому результату удовлетворяют значения:

$$\alpha = \pm \frac{\pi}{4} \pm n\pi, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots$$

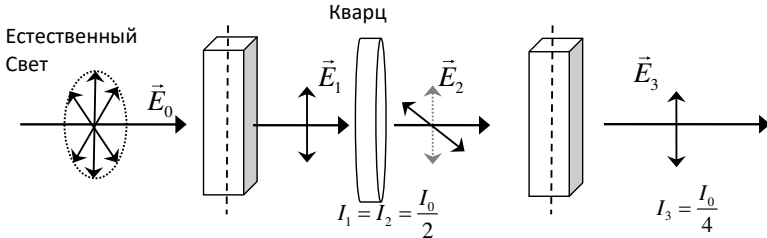


Рис. 2.6. Прохождение естественного света через систему из двух поляризаторов с параллельными плоскостями и кварцевой пластинки между ними

### Тема 3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

**Интерференцией** называется явление наложения волн, при котором происходит **устойчивое во времени** их взаимное усиление в одних точках пространства и ослабление в других в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Такое перераспределение интенсивности в пространстве называют **интерференционной картиной**.

Основным условием для интерференции является **когерентность** – постоянство во времени разности фаз складываемых волн в области регистрации. Для этого необходимо, чтобы частота обеих волн была одинаковой. Кроме того, интерферировать могут только те когерентные электромагнитные волны, в которых колебания  $\vec{E}$  происходят в одной плоскости (то есть поляризованные в одной плоскости).

Рассмотрим две бегущие плоские гармонические волны, распространяющиеся в среде, свойства которой одинаковы во всех точках и не зависят от направления (то есть однородной и **изотропной**).

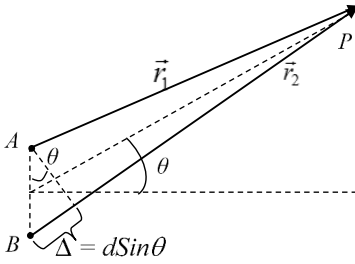


Рис. 3.1. Интерференция волн от двух источников.

Пусть два источника А и В (рис. 3.1), находящиеся на расстоянии  $d$  друг от друга, излучают когерентные плоскополяризованные в одном направлении волны. Накладываясь друг на друга в некоторой точке пространства, эти волны возбуждают колебания  $E$  (или  $H$ )

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t + \varphi_2).$$

Интенсивность результирующей волны будет равна (вывод см. в [1], §144, 172):

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi, \quad (3.1)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности интерферирующих волн, а  $\Delta \varphi$  – это разность фаз этих волн в точке их наложения, которая зависит как от начальных фаз, так и от разности хода волн:

$$\Delta \varphi = k \Delta r + (\varphi_{02} - \varphi_{01}). \quad (3.2)$$

Согласно (3.1) результирующая интенсивность  $I$  принимает максимальное значение, когда  $\cos \Delta \varphi = 1$ . Для этого должно выполняться условие

$$k \Delta r + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) = 2n\pi, \quad \text{где } n = (0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (3.3)$$

которое называется **условием максимумов интерференции**. Соответственно **условию минимумов** является соотношение

$$k \Delta r + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) = (2n + 1)\pi, \quad \text{где } n = (0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (3.4)$$

Так в пространстве возникает чередование максимумов и минимумов интенсивности, называемое интерференционной картиной.

При равенстве начальных фаз **условие максимумов** при интерференции от двух источников запишется в виде:  $k \Delta r = 2n\pi$ . С учетом того, что  $k = 2\pi/\lambda$ , получим условие максимумов интерференции, выраженное через разность хода:

$$\Delta r = n\lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.3 \text{ а})$$

Аналогично получим **условие минимума интерференции**:

$$\Delta r = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.4 \text{ а})$$

Для рассмотренного случая на рис. 3.1. максимум интерференции будет наблюдаться в точках пространства, для которых  $\Delta r = d \sin \theta = n\lambda$ , а **условие минимума**:  $d \sin \theta = (2n + 1) \lambda / 2$ .

### Пример решения задачи

Плоская монохроматическая световая волна (длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм) падает нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, отстоящими друг от друга на расстояние  $d = 2,5$  мм. На экране, расположенном за диафрагмой на расстоянии  $L = 1$  м, образуется система интерференционных полос. Определить ширину интерференционных полос.

*Решение:*

В данной задаче узкие щели можно рассматривать как два вторичных линейных источника когерентных волн, интерферирующих на экране. Ширина интерференционной полосы  $\Delta x$  равна расстоянию между двумя последовательными максимумами на экране (или двумя последовательными минимумами)  $\Delta x = x_{n+1} - x_n$  (рис. 3.2). С учетом свойств прямоугольных треугольников можно записать:

$$x_{n+1} = L \cdot \operatorname{tg}\theta_{n+1} \quad \text{и} \quad x_n = L \cdot \operatorname{tg}\theta_n.$$

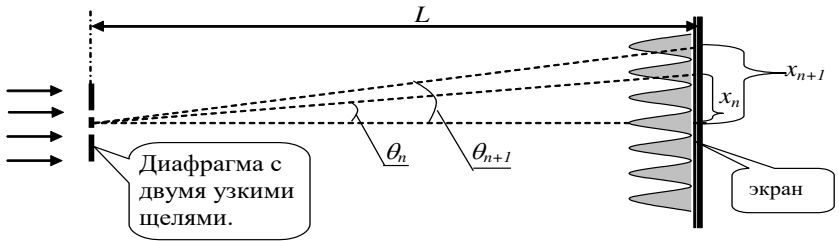


Рис. 3.2. Интерференция света после прохождения двух узких щелей

По условию эксперимента  $L \gg d$  и тогда выполняется приближенное равенство для малых углов  $\sin\theta \approx \operatorname{tg}\theta \approx x/L$ . С учетом этого условия для  $n$ -го максимума на экране (3.4):

$$\Delta r_n = d \cdot \sin\theta_n = d \frac{x_n}{L} = n\lambda,$$

$$x_n = n \frac{\lambda L}{d}.$$

Тогда расстояние между двумя ближайшими максимумами:

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n = (n+1) \frac{\lambda L}{d} - n \frac{\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d}.$$

Отметим, что ширина интерференционной полосы  $\Delta x$  не зависит от номера максимума. Выполним вычисления:

$$\Delta x = \frac{1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-3}} \text{ м} = 0,2 \text{ мм} .$$

## Тема 4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

### 4.1. Основные теоретические сведения

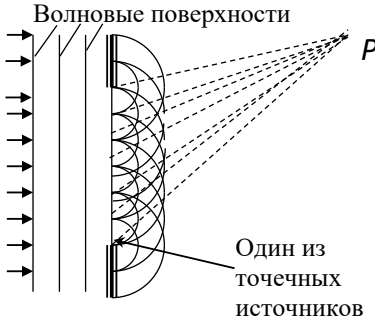


Рис. 4.1. К принципу Гюйгенса – Френеля

В настоящее время под дифракцией подразумевают целый ряд явлений при распространении света в среде, при которых наблюдаются отклонения от законов геометрической оптики и проявляются волновые свойства света. **Дифракция** в узком смысле рассматривается как огибание волнами препятствий и проникновение в область геометрической тени.

Дифракция приводит к устойчивому перераспределению интенсивности в пространстве за препятствием. Это, так называемая, дифракционная картина, ее общий вид и причина образования аналогичны интерференционной картине. Этот эффект наблюдается наиболее выражено при условии, что длина волны  $\lambda$  сопоставима с характерным размером препятствия ( $\lambda \approx d$ ).

Для объяснения ее закономерностей используется **принцип Гюйгенса-Френеля**, согласно которому каждый элемент волновой поверхности служит источником вторичных когерентных волн, а результирующее колебание в некоторой точке  $P$  (рис. 4.1) является суперпозицией (интерференцией) колебаний, дошедших до этой точки от вторичных источников.

Различают два случая дифракции света – дифракция Френеля (при падении на препятствие сферической волны) и дифракция Фраунгофера (в параллельных лучах).

Расчет дифракционной картины в общем случае – очень сложная задача. Однако в ряде простейших случаев это можно сделать, применяя принцип Гюйгенса-Френеля.

## 4.2. Дифракция Френеля

Если источник света  $A$  точечный и монохроматический (излучение только с одной частотой, или длиной волны), а среда, в которой распространяется свет, изотропна (то есть ее свойства не зависят от направления), то волновые фронты в произвольный момент времени будут иметь форму сфер радиусом  $AO = ct$  (см. рис. 4.2 а), где  $c$  - скорость света.

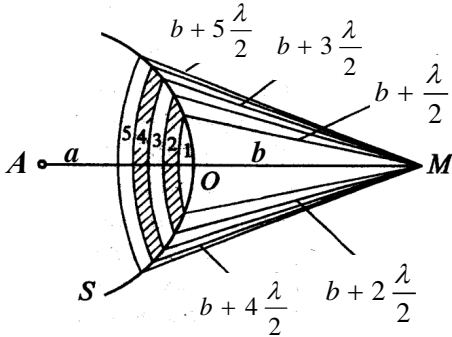


Рис. 4.2. Схема разбиения волнового фронта на зоны Френеля

симметрией волнового фронта относительно  $OM$ , разобьем его на кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краев каждой зоны до точки  $M$  отличаются на полволны падающего света. Тогда расстояние от внешнего края  $m$ -й зоны до точки  $M$  равно  $b_m = b + m \cdot \lambda/2$ .

Волны, приходящие в точку наблюдения от краев двух соседних зон (так же как и от центров этих зон, и от других аналогичных пар точек), находятся в противофазе. Тогда излучения каждой пары соседних зон будут гасить друг друга.

Теперь поставим на пути волнового фронта диафрагму с круглым отверстием, открывающим часть волнового фронта (и соответственно некоторое количество зон Френеля) - рис. 4.2.

Тогда при четном количестве открытых зон Френеля в точке  $M$  будет минимум интенсивности или темное пятно. При нечетном числе открытых отверстий зон излучение от одной из зон останется нескомпенсированным, и в точке  $M$  будет максимум интенсивности или светлое пятно.

Можно показать также (подробнее см. [1, 2]), что радиусы внешних границ зон Френеля с номером  $m$  при падении света на экран с круглым отверстием при сферическом фронте определяются по формуле:

Каждая точка на этой сферической поверхности является источником вторичных волн. Для нахождения результата их интерференции Френель предложил метод разбиения волнового фронта на зоны, называемые **зонами Френеля**.

Обозначим расстояние от точки  $M$  до ближайшей точки волновой поверхности  $b = OM$ , а расстояние от источника до волновой поверхности  $AO = a$ .

Воспользовавшись



$$\rho_m = \sqrt{\frac{a \cdot b}{a + b}} m \lambda, \quad (4.1)$$

### 4.3. Дифракция Фраунгофера

Дифракцию Фраунгофера (в параллельных лучах) можно наблюдать на длинной узкой щели шириной  $b$  (рис. 4.3). Монохроматический свет длины волны  $\lambda$  падает нормально к поверхности щели (пунктирные стрелки на рис. 4.3) так, что колебания во всех точках щели совершаются в одной фазе. Дифракционная картина наблюдается на экране, установленном в фокальной плоскости собирающей линзы. Параллельные лучи, идущие от краев щели  $A$  и  $B$  под углом дифракции  $\varphi$  к направлению падающего света, собираются линзой в ее побочном фокусе – точке  $K$  на экране. Поскольку линза не вносит дополнительной разности хода лучей, то результат интерференции в точке  $K$  всех параллельных лучей, идущих от *всех* точек щели под углом  $\varphi$ , будет зависеть от разности хода  $CB = b \sin \varphi$ .

Щель можно разбить по ширине на зоны Френеля, имеющие вид параллельных границе щели полосок. Разность хода от краев соседних зон до точки наблюдения равна  $\lambda/2$ .

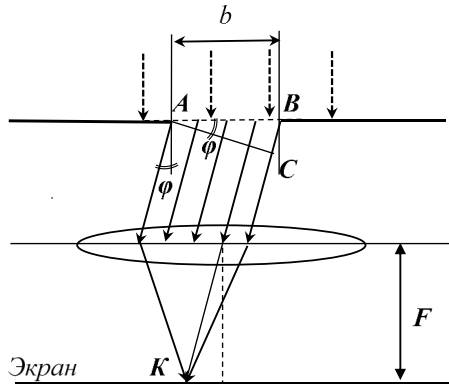


Рис. 4.3. Дифракция Фраунгофера на узкой щели шириной  $b$

Колебания, возбуждаемые в точке  $x$  двумя соседними зонами, равны по амплитуде и противоположны по фазе. Поэтому, если число зон четное, то наблюдается дифракционный минимум (полная темнота). При этом разность хода  $CB$  для лучей, пришедших в точку наблюдения от краев щели, равна:

$$b \sin \varphi = \pm 2 m \lambda / 2, \text{ где } m = 1, 2, \dots,$$

Если число зон нечетное, то наблюдается дифракционный максимум, определяемым выражением

$$b \sin \varphi = \pm (2m+1) \lambda/2, \text{ где } m= 1, 2, \dots,$$

соответствующий действию одной (нескомпенсированной) зоны Френеля. Самый яркий центральный максимум наблюдается в главном фокусе линзы ( $\varphi=0$ ). С ростом  $m$  ширина зон Френеля и интенсивность максимумов быстро уменьшаются.

Число зон Френеля, укладывающихся в щели, равно

$$n = \frac{b \cdot \sin \varphi}{\lambda / 2} \quad (4.2)$$

#### 4.4. Дифракционная решетка

Большой интерес для практической деятельности представляет дифракция Фраунгофера на **дифракционной решетке**. Она представляет собой систему из большого числа одинаковых и параллельных друг другу щелей в экране ширины  $b$ , разделенных непрозрачными промежутками одинаковой ширины  $a$ . Величина  $d = a+b$  называется **постоянной, или периодом дифракционной решетки**.

При расчете дифракционной картины на экране необходимо учитывать интерференцию вторичных источников как от разных участков одной щели, так и от разных щелей решетки. Излучения от соседних щелей когерентны, так как порождены одной волной. Характер дифракционной картины на удаленном от решетки экране показан на рис. 4.4.

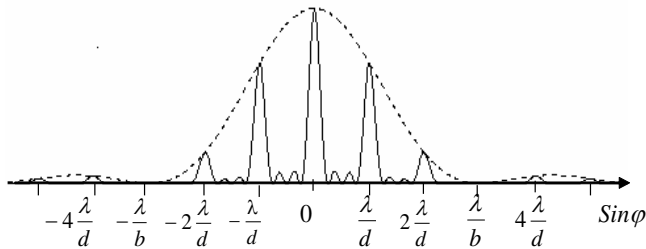


Рис. 4.4. Распределение интенсивности монохроматического света на экране за дифракционной решеткой ( $\varphi$  - угол дифракции)

Главным максимумам соответствуют углы дифракции, удовлетворяющие условию максимума интерференции от соседних щелей:

$$d \sin \varphi = \pm n \lambda, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.3)$$

где  $n$  – порядок главного максимума.

Распределение интенсивности света, наблюдаемое за дифракционной решеткой, является наложением интерференционных картин от соседних щелей и дифракционных картин от каждой отдельной щели.

### Пример решения задач

**Задача 1.** Дифракционная решетка с круглым отверстием расположена посередине между точечным источником монохроматического света ( $\lambda = 500$  нм) и экраном. Расстояние между источником и экраном  $L = 4$  м. При каком радиусе отверстия центр дифракционных колец на экране будет наиболее темным?

*Решение:*

При дифракции Френеля на круглом отверстии в центре дифракционной картины на экране темное пятно наблюдается при четном числе открытых зон Френеля. Увеличение радиуса отверстия ведет к ослаблению эффекта (*размер отверстия становится существенно больше длины волны  $\lambda$* ) и в пределе дифракционная картина пропадает. Следовательно, первый дифракционный минимум (темное круглое пятно в центре картины) будет в том случае, если число открытых зон равно двум и радиус отверстия  $r$  совпадает с радиусом второй зоны Френеля. Используя формулу (4.1) при  $m = 2$ ,  $a + b = L$ ,  $a = b = L/2$ , получим

$$r = \rho_2 = \sqrt{\frac{L^2 / 4}{L} k \lambda} = \sqrt{\frac{L \lambda}{2}}.$$

$$\text{Выполним расчет: } r = \sqrt{\frac{4 \cdot 500 \cdot 10^{-9}}{2}} \text{ м} = 10^{-3} \text{ м} = 1 \text{ мм}.$$

**Задача 2.** На дифракционную решетку, имеющую  $n_0 = 500$  щелей на одном миллиметре ширины, нормально падает свет от газоразрядной трубки, наполненной гелием. Найти:

1. Наибольший порядок дифракционного максимума, который дает эта решетка для фиолетового участка спектра с длиной волны  $\lambda = 410$  нм.

2. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается синяя линия  $\lambda_c = 447$  нм спектра третьего порядка?

*Решение:*

1. Из формулы (4.7) следует, что наибольший порядок дифракционного максимума  $n$  получается при максимальном значении синуса. Так как синус не может быть больше единицы, то должно выполняться неравенство:

$$d \geq n \cdot \lambda, \text{ или } n \leq \frac{d}{\lambda}.$$

Период решетки, как расстояние между соседними щелями, найдем из формулы  $h = \frac{1}{n_0}$ . Тогда  $n \leq \frac{1}{n_0 \cdot \lambda}$ .

Подставив заданные значения, получим  $n \leq 4,88$ . Если учесть, что порядок максимума является целым числом, то  $n_{max} = 4$ .

2. При наложении спектральных линий условие максимума выполняется для каждой из них:

$$d \sin \varphi = 3\lambda_c \quad \text{и} \quad d \sin \varphi = 2\lambda_x.$$

Тогда  $3\lambda_c = 2\lambda_x$  и после расчета получаем  $\lambda_x = 670$  нм.

## Тема 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ВЕЩЕСТВЕ

### 5.1. Поглощение электромагнитных волн

Поглощение ЭМВ (например, света) - это уменьшение энергии волны при ее распространении в среде вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества. Поглощение света описывается законом Бугера-Ламберта (законом Бугера):

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (5.1)$$

где  $I_0$  и  $I$  – значения интенсивности света на входе и выходе из слоя вещества толщиной  $x$ , а  $\alpha$  - натуральный линейный показатель поглощения вещества, зависящий от длины волны света и от свойств среды.

### Пример решения задач

**Задача.** Линейный коэффициент ослабления меняется в зависимости от плотности поглотителя, даже если материал поглотителя одинаков. Поэтому широко используется *массовый коэффициент ослабления*  $\kappa = \alpha/\rho$ , где  $\alpha$  – линейный коэффициент ослабления, а  $\rho$  – плотность поглотителя. Во сколько раз уменьшится интенсивность узкого пучка рентгеновского излучения с длиной волны 20 пм при прохождении свинцовой пластинки толщиной  $d = 1$  мм, если массовый коэффициент ослабления для данной длины волны  $\alpha/\rho = 3,6$  см<sup>2</sup>/г?

*Решение:*

Плотность свинца  $\rho = 11,3$  г/см<sup>3</sup> и, следовательно:

$$\alpha = 3,6 \cdot 11,3 = 40,68 \text{ см}^{-1}.$$

Показатель экспоненты в формуле (5.1) равен  $40,68 \cdot 0,1 \text{ см}^{-1} \text{ см} = 4,068$ .

Изменение интенсивности ЭМВ, прошедшей через слой поглотителя, согласно закону (5.1) равно:

$$\frac{I_0}{I} = e^{\alpha x} = 0,58 \cdot 10^2.$$

Ответ: Интенсивность рентгеновского излучения уменьшится в 58 раз.

## 5.2. Дисперсия света

Дисперсией света называют зависимость фазовой скорости света в среде от его частоты.

$$v = \frac{c}{n(v)},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, а  $n(v)$  – показатель преломления, зависящий от частоты ЭМВ.

Зависимость показателя преломления от частоты – нелинейная и немонотонная. Если  $n$  увеличивается с ростом  $v$  (то есть  $\frac{dn}{dv} > 0$ ), то дисперсию называют нормальной, а если  $n$  с ростом частоты убывает ( $\frac{dn}{dv} < 0$ ), то – аномальной.

Среда, в которой наблюдается дисперсия, называется диспергирующей.

Любую несинусоидальную волну можно заменить на эквивалентную ей суперпозицию (сумму, или пакет) синусоидальных волн с разными частотами (так называемое разложение Фурье). Совокупность значений этих частот называется спектром этой волны. Если такая волна (группа синусоидальных волн) распространяется в диспергирующей среде, то отдельные синусоидальный слагаемые в этой сумме будут распространяться с разными фазовыми скоростями. В результате такая группа волн при распространении будет «расплываться»: некоторые компоненты «уйдут вперед», другие - отстанут. Для приближенной характеристики скорости распространения такой группы вводят понятие групповой скорости. **Групповая скорость  $u$**  равна скорости переноса энергии этим волновым пакетом и в случае небольшой дисперсии и узкого спектра определяется выражением:

$$u = \frac{d\omega}{dk},$$

где  $\omega$  – круговая частота ( $\omega = 2\pi\nu$ ),  $k$  – волновое число (модуль волнового вектора  $k = 2\pi/\lambda$ ).

## Тема 6. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

### 6.1. Основные теоретические сведения, примеры решения задач и контрольные задания

Опыты по интерференции, дифракции и поляризации свидетельствуют о волновой природе света. Вместе с тем было установлено, что свет излучается, движется в пространстве и поглощается в виде отдельных дискретных квантов электромагнитного излучения – фотонов. Все фотоны монохроматического све-

та (и электромагнитного излучения вообще) частоты  $\nu$  движутся со скоростью света  $c$  и имеют одинаковую энергию

$$E_{\phi} = h\nu \quad (6.1)$$

и импульс

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad (6.2)$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - **постоянная Планка**.

Здесь и далее  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в вакууме.

С помощью квантовых представлений о свете оказалось возможным успешно истолковать закономерности явления фотоэффекта, тормозного рентгеновского излучения и эффекта Комптона.

Волновой и квантовый (корпускулярный) способы описания света не противоречат, а взаимно дополняют друг друга, так как свет одновременно обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами. Квантовой оптикой рассматриваются явления, в которых проявляются квантовые свойства света.

**Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией)** называется явление испускания электронов веществом под действием света. Электроны, вылетающие из вещества при фотоэффекте, называют **фотоэлектронами**, а электрический ток, образуемый этими электронами, называется **фототоком**.

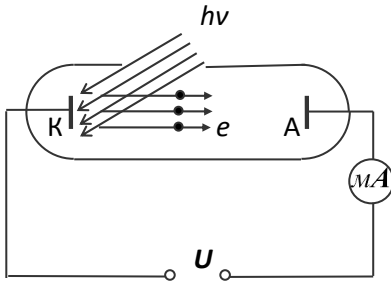


Рис. 6.1. Схема опытов для наблюдения и изучения внешнего фотоэффекта

Схема экспериментальной установки, с помощью которой наблюдается фотоэффект, приведена на рис. 6.1. При облучении светом металлической пластины  $K$  (катода), помещенной внутри откачанного стеклянного баллона, из этой пластины вылетают электроны, которые, попадая на пластину  $A$  (анод), приводят к возникновению электрического тока в цепи. При фотоэффекте электрон проводимости металла, поглощая фотон, получает его энергию  $h\nu$ .

Для выхода из металла электрон должен затратить энергию на работу выхода  $A_e$ . Если  $h\nu > A_e$ , то электрон сможет выйти из металла, а оставшаяся часть энергии кванта преобразуется в кинетическую энергию фотоэлектрона. Поэтому закон сохранения энергии при фотоэффекте имеет вид:

$$E_{\phi} = h\nu = A_e + \frac{mv_m^2}{2}. \quad (6.3)$$

Это выражение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**, где последнее слагаемое – максимальная (поскольку в любой реальной системе существуют потери энергии) кинетическая энергия фотоэлектрона.

С помощью (6.3) можно объяснить все законы фотоэффекта. Так, максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, а, следовательно, и его максимальная начальная скорость зависят от частоты света и работы выхода, но не зависят от интенсивности света. Далее, из этого же уравнения следует, что внешний фотоэффект возможен лишь при условии, что  $h\nu \geq A_\phi$ . Энергии фотона должно, по меньшей мере, хватить на то, чтобы вырвать электрон из металла. Наименьшая частота, при которой возможен фотоэффект  $h\nu_{\min} = A_\phi$ . Отсюда максимальная (граничная) длина волны при которой еще возможен фотоэффект:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{hc}{A_\phi}.$$

Ее также называют красной границей фотоэффекта. Красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, а значит - от природы металла и состояния его поверхности.

Наконец, общее число  $N$  фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность металла, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за это время на поверхность, то есть – интенсивности света.

Из (6.3) можно определить максимально возможную кинетическую энергию  $T_{\max}$  вылетевшего электрона. Опытным путем найти  $T$  можно, приложив для прекращения фототока между пластинами К и А запирающее (задерживающее) напряжение  $U_3$ . Тогда  $T = eU_3$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

### Пример решения задачи

Фототок, вызываемый падением электромагнитного излучения с длиной волны  $\lambda_1 = 0,44$  мкм на катод, прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U_3 = 0,95$  В. Определить работу выхода для материала катода и максимальную скорость фотоэлектронов. Какой станет максимальная скорость фотоэлектронов, если у падающего излучения длина волны уменьшится в два раза?

*Решение:*

Для расчета работы выхода напишем формулу (6.3), используя выражение для энергии фотонов (5.1)  $E_\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  и равенство  $T = eU_3$ :

$$\frac{hc}{\lambda_1} = A_\phi + eU_3,$$

далее получаем

$$A_g = \frac{hc}{\lambda_1} - eU_3.$$

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления:

$$A_g = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,44 \cdot 10^{-6}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,95 = 3,00 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,87 \text{ эВ}.$$

Скорость фотоэлектрона определим через кинетическую энергию, равную в первом случае  $T_1 = eU_3 = 0,95$  эВ. Эта величина значительно меньше энергии покоя электрона ( $m_0c^2 = 0,511$  МэВ). Следовательно, в данном случае можно использовать нерелятивистское выражение для кинетической энергии:

$$T_1 = \frac{m_0 v_{m1}^2}{2}$$

Тогда  $v_{m1} = \sqrt{\frac{2T_1}{m_0}}$ .

Произведем вычисления:

$$v_{m1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,95}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 5,8 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

При замене падающего излучения на излучение с длиной волны  $\lambda_2 = \lambda_1/2 = 0,22$  мкм энергия фотона увеличится в два раза, а кинетическая энергия фотоэлектрона увеличится в соответствии с формулой (6.3):

$$T_2 = \frac{hc}{\lambda_2} - A_g.$$

Учитывая, что  $v_{m2} = \sqrt{\frac{2T_2}{m_0}}$ , получим:

$$v_{m2} = \sqrt{\frac{2}{m_0} \left( \frac{hc}{\lambda_2} - A_g \right)}.$$

Произведем вычисления:

$$v_{m2} = \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left( \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,22 \cdot 10^{-6}} - 3 \cdot 10^{-19} \right)} \approx 1,15 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $A_g = 1,87$  эВ (цезий),  $v_{m2} = 1,15 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ,  $v_{m1} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ .

### 6.3. Эффект Комптона

Представление о фотонах было окончательно подтверждено при изучении их рассеяния на свободных электронах (**эффект Комптона** - 1922 г.).

Комптон обнаружил, что если рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda$  рассеивается веществом, то в рассеянном потоке, наряду с излучением с той же длиной волны, наблюдается излучение с большей длиной волны  $\lambda'$ :



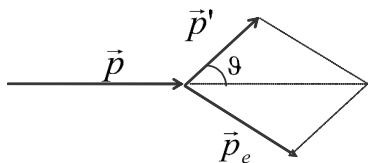
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\vartheta) = \lambda_c (1 - \cos\vartheta). \quad (6.4)$$

где:  $m_e$  - масса покоя электрона,  $\vartheta$  - угол рассеяния фотона, а величина называется **комптоновской длиной волны электрона**.

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} \quad (6.5)$$

Объяснить эффект Комптона можно, рассматривая упругое соударение фотона и свободного (или слабо связанного с ядром атома) электрона.

Векторная диаграмма закона сохранения импульса в процессе соударения налетающего фотона с импульсом  $\vec{p}$  с покоящимся электроном приведена на рис. 6.2.



После удара у фотона остается импульс  $\vec{p}'$ , а электрон приобретает импульс  $\vec{p}_e$ . Используя законы сохранения энергии и импульса, можно получить формулу взаимосвязи длин волн налетающего  $\lambda$  и рассеянного  $\lambda'$  фотонов (6.4).

Рис. 6.2. Упругое соударение фотона со свободным электроном при эффекте Комптона

### Пример решения задачи

Фотон с импульсом  $p = 1,02$  МэВ/с, где  $c$  - скорость света, рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего импульс фотона стал равным  $p' = 0,255$  МэВ/с. Под каким углом рассеялся фотон и какая доля энергии первичного фотона приходится на кинетическую энергию электрона отдачи?

*Решение:*

Для расчетов применим формулу (6.4). Запишем ее, выразив длины волн исходного  $\lambda$  и рассеянного  $\lambda'$  фотонов через импульсы с помощью формулы (6.2):

$$\frac{h}{p} - \frac{h}{p'} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\vartheta).$$

После преобразований получим

$$m_e c \left( \frac{p - p'}{p \cdot p'} \right) = 1 - \cos\vartheta.$$

Тогда

$$\vartheta = \pm \arccos\left(1 - m_e c \frac{p - p'}{pp'}\right).$$

Для облегчения расчетов представим эту формулу в виде:

$$\vartheta = \pm \arccos\left(1 - m_e c^2 \frac{pc - p'c}{pc \cdot p'c}\right),$$

где:  $m_e c^2 = 0,511$  МэВ - энергия покоя электрона;  $pc = 1,02$  МэВ,  $p'c = 0,255$  МэВ. После подстановки этих значений получаем:

$$\vartheta = \pm \arccos\left[1 - 0,511 \left(\frac{1,02 - 0,255}{1,02 \cdot 0,255}\right)\right] \approx \pm \arccos(-0,5) = \pm \frac{2}{3} \pi.$$

Для ответа на второй вопрос задачи используем закон сохранения энергии:

$$E_\phi + m_e c^2 = E_\phi' + m_e c^2 + T,$$

где  $T$  - кинетическая энергия электрона отдачи,  $E_\phi = pc$ ,  $E_\phi' = p'c$ .

Тогда можно рассчитать искомое отношение:

$$\frac{T}{E_\phi} = \frac{E_\phi - E_\phi'}{E_\phi} = \frac{p - p'}{p} = 0,75.$$

Ответ: угол рассеяния  $\theta = 120^\circ$ , на кинетическую энергию электрона отдачи приходится 75% энергии первичного фотона.

## Тема 7. РАВНОВЕСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### 7.1. Основные теоретические сведения, примеры решения задач и контрольные задания

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется тепловым. Все тела излучают электромагнитные волны (ЭМВ). При этом спектр излучения зависит от температуры тела. Например, сильно нагретые тела светятся (излучают ЭМВ оптического диапазона), а при обычных температурах являются источниками только невидимого инфракрасного излучения.

**Радиационный теплообмен** – это самопроизвольный процесс передачи энергии в форме теплоты от более нагретого тела к менее нагретому, осуществляющийся путем излучения и поглощения ЭМВ этими телами.

Тепловое излучение – это единственное излучение, которое может находиться в термодинамическом равновесии с веществом. При тепловом равновесии расход энергии тела на излучение компенсируется за счет поглощения телом такого же количества падающего на него излучения. **Равновесное излучение** устанавливается в замкнутой системе, при этом все находящиеся в ней тела имеют одну и ту же температуру.

Спектральной характеристикой равновесного излучения служит **спектральная плотность излучения**:

$$u(\omega, T) = \frac{dW}{dV d\omega} \quad (7.1)$$

где  $dW(\omega)$  – энергия равновесного излучения с частотами от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , заключенная в объеме  $dV$  поля излучения. Таким образом,  $u(\omega, T)$  – это энергия излучения в диапазоне частот  $(\omega, \omega + d\omega)$ , заключенная в единице объема.

**Энергетическая светимость**  $R$  – это энергии ЭМВ всевозможных частот, излучаемых за единицу времени с единицы площади поверхности тела:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega} d\omega = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda, \quad (7.2)$$

где  $r_{\omega}$  (или  $r_{\lambda}$ ) – **испускательная способность тела** (или спектральная плотность энергетической светимости), которая равна энергии, излучаемой с  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела за 1 секунду в узком спектральном диапазоне  $(\omega, \omega + d\omega)$  или  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ , соответственно. Обратная связь этих величин:

$$r_{\omega} = r(\omega, T) = \frac{dR(\omega, T)}{d\omega} \quad \text{или} \quad r_{\lambda} = r(\lambda, T) = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}. \quad (7.3)$$

Испускательная способность тела связана с его объемной плотностью излучения следующим выражением:

$$r_{\lambda} = \frac{c}{4} u(\lambda), \quad r_{\omega} = \frac{c}{4} u_{\omega} \quad (7.4)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

**Поглощательная способность** тела – это безразмерная величина  $a_{\omega}$ , показывающая, какая доля энергии ЭМВ с частотами от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$ , падающей на поверхность тела, поглощается им

$$a_{\omega} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \leq 1. \quad (7.5)$$

**Абсолютно черным телом (АЧТ)** называется тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение независимо от направления излучения, его спектрального состава и поляризации:  $(a_{\omega})^{\text{АЧТ}} = 1$ . Моделью АЧТ может служить замкнутая полость с небольшим отверстием (рис. 7.1). Свет, попадающий внутрь полости через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок. При этом энергия падающего света практически полностью поглощается стенками независимо от материала.

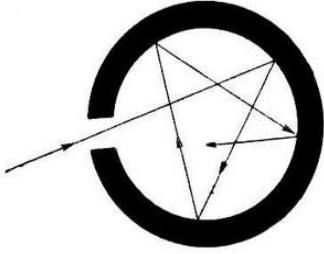


Рис. 7.1. Модель АЧТ

Серым телом называется тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от частоты света.

Правильное выражение для **спектральной объемной плотности энергии электромагнитного излучения АЧТ** удалось найти Максиму Планку после принятия квантовой гипотезы. В качестве теоретической модели АЧТ он рассмотрел систему гармонических осцилляторов, каждому из которых

соответствует монохроматическая компонента излучения.

При этом энергия каждого осциллятора может принимать лишь определенные дискретные значения (подробнее – см. [1, 3]). В результате им была получена формула, определяющая объемную спектральную плотность излучения АЧТ, называемую формулой **Планка**:

$$u(\omega) = \frac{\hbar \cdot \omega^3}{\pi^2 \cdot c^3} \cdot \frac{1}{\frac{\hbar\omega}{kT} - 1}, \quad (7.6)$$

где:  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - это так называемая, приведенная постоянная Планка (или постоянная Дирака);  $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

Учитывая взаимосвязь частоты  $\omega$  с длиной волны  $\lambda$ , эту формулу можно преобразовать к виду:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi h \cdot c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{\lambda kT} - 1}. \quad (7.7)$$

Соответствующая формула для испускательной способности АЧТ имеет вид:

$$r(\lambda) = \frac{2\pi h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{\lambda kT} - 1}. \quad (7.8)$$

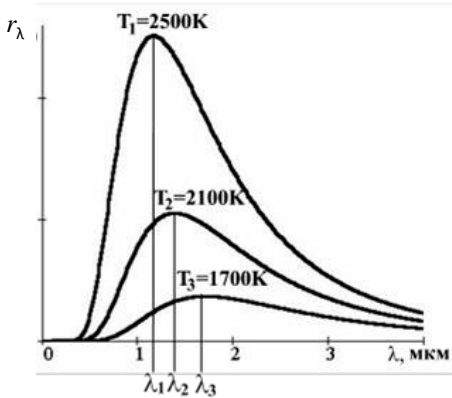


Рис. 7.2. Зависимость испускательной способности АЧТ от длины волны излучения

На рис. 7.2 приведен график зависимости  $r_\lambda$  для АЧТ от длины волны при разных температурах тела. Интегрирование этого выражения с учетом формулы Планка по всему спектру приводит к **формуле Стефана-Больцмана** для энергетической светимости абсолютно черного тела  $R^*$ :

$$R^* = \int_0^\infty r_\lambda \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (7.9)$$

где величина  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> называется постоянной Стефана-Больцмана.

Положение максимума на рис. 7.2 спектральной плотности энергии электромагнитного излучения АЧТ можно определить **по формуле Вина**:

$$T \cdot \lambda_{max} = b, \quad (7.10)$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  мК. Обращаем внимание, что максимум кривой испускательной способности АЧТ смещается в область меньших длин волн (больших частот) при увеличении температуры (рис. 7.2).

Величина максимума спектральной плотности энергетической светимости зависит от температуры:

$$r_{max} = c_0 \cdot T^5, \quad (7.11)$$

где  $c_0 = 1,30 \cdot 10^{-5}$  Вт/м<sup>3</sup>К<sup>5</sup>.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** При какой температуре с каждого квадратного сантиметра поверхности абсолютно черного тела вылетает ежесекундно в среднем по 10 фотонов в диапазоне длин волн от  $\lambda_1 = 549$  нм до  $\lambda_2 = 551$  нм?

*Решение:*

Используя определение спектральной плотности энергетической светимости (7.1) и (7.6), можно найти энергию, испускаемую единицей поверхности абсолютно черного тела в интервале длин волн  $d\lambda$ :

$$dR = r_\lambda \cdot d\lambda = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda.$$

Учитывая малое значение величины  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , это выражение можно записать в виде:

$$\Delta R = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \Delta\lambda,$$

где  $\lambda = 550$  нм - средняя длина волны в заданном диапазоне. Тогда среднее количество фотонов  $N_0$ , покидающих каждую секунду единицу поверхности абсолютно черного тела, можно определить по формуле:

$$N_0 = \frac{\Delta R}{E_\phi} = \frac{2\pi \cdot c}{\lambda^4} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \Delta\lambda.$$

Здесь  $N_0 = N/S$ ,  $S = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ . Из этой формулы можно выразить искомую температуру:

$$e^{\frac{hc}{\lambda kT}} = 1 + \frac{2\pi \cdot c \cdot \Delta\lambda \cdot S}{\lambda^4 \cdot N},$$

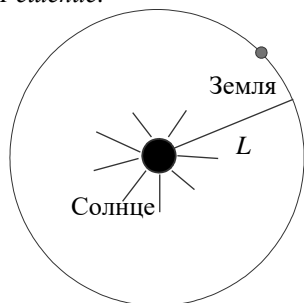
а затем

$$T = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot \ln\left(1 + \frac{2\pi c \cdot \Delta\lambda \cdot S}{\lambda^4 \cdot N}\right)}.$$

Произведя вычисления, получим  $T = 550$  К.

**Задача 2.** Максимум испускательной способности поверхности Солнца приходится на длину волны  $\lambda_{\text{max}} = 0,5$  мкм. Определить температуру солнечной поверхности, считая, что она по своим свойствам близка к абсолютно черному телу. Найти значение солнечной постоянной - интенсивности солнечного излучения вблизи Земли за пределами ее атмосферы.

*Решение:*



Температуру солнечной поверхности определим с помощью закона Вина (6.10)  $T = b/\lambda_{\text{max}}$ . Произведя вычисления, получим  $T = 5800$  К. Значение солнечной постоянной  $S$  можно найти, разделив поток энергии  $\Phi_E$ , излучаемый Солнцем по всем направлениям, на площадь поверхности сферы, радиус которой равен среднему расстоянию от Земли до Солнца  $L = 1,5 \cdot 10^{11}$  м (см. рис.).

В свою очередь, поток энергии  $\Phi_E$  равен произведению энергетической светимости Солнца  $R^*$  на площадь его поверхности  $\Phi_E = R^* \cdot 4\pi \cdot r_C^2$ , где  $r_C \approx 7 \cdot 10^8$  м - радиус Солнца. Тогда:

$$C = \frac{4\pi \cdot r_C^2}{4\pi \cdot L^2} \cdot R^* = \frac{r_C^2}{L^2} \cdot \sigma \cdot T^4.$$

Произведя вычисления, получим  $C = 1400$  Дж/м<sup>2</sup>·с.

## 8. Задачи к контрольной работе

*Варианты (наборы) задач для решения см. в таблицах, размещенных на сайте университета, на вкладке заочного факультета (раздел «Контрольные задания и консультации»).*

**1.1.** Найти угол между плоскостями двух поляризаторов, если интенсивность прошедшего через них естественного света уменьшилась в 4 раза. (Ответ:  $\pi/4$ )

**1.2.** Плоско-поляризованный монохроматический луч света падает на поляризатор и полностью им гасится. Когда на пути луча поместили кварцевую пластину, интенсивность луча после поляризатора стала равна половине интенсивности луча, падающего на поляризатор. На какой угол повернулась плоскость поляризации луча в кварцевой пластине? (Ответ:  $\pi/4$ )

**1.3.** Два поляризатора расположены так, что угол между их плоскостями составляет  $\varphi = 30^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через оба поляризатора. (Ответ: в  $8/3$  раза)

**1.4.** Во сколько раз уменьшится интенсивность поляризованного по кругу луча света, проходящего через два поляризатора, угол между плоскостями которых равен  $60^\circ$ , если между ними поместить кварцевую пластинку, поворачивающую плоскость поляризации света на угол  $\varphi = 30^\circ$ ? (Ответ: в  $8/3$  раза)

**1.5.** При прохождении поляризованного монохроматического света через пластинку кварца его плоскость поляризации поворачивается на угол  $\varphi = 22,5^\circ$  на каждом миллиметре толщины. Какой наименьшей толщины необходимо взять кварцевую пластину, помещенную между двумя одинаково направленными поляризаторами, чтобы свет не прошел через эту систему? (Ответ: 4 мм)

**1.6.** Поляризованный по кругу свет падает на систему из трех поляризаторов. Плоскости первого и последнего взаимно перпендикулярны, а плоскость среднего поляризатора образует угол  $\varphi = 30^\circ$  с плоскостью первого. Как изменится интенсивность света на выходе из системы? (Ответ: уменьшится в  $32/3$  раза)

**1.7.** Интенсивность циркулярно-поляризованного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением, определить угол между плоскостями поляризации николей. (Ответ:  $\arccos 0,35 = \pi/3$ )

**1.8.** Пучок естественного света падает на систему из 6 николей, плоскость пропускания каждого из которых повернута на угол  $\varphi = 30^\circ$  относительно плоскости пропускания предыдущего николя. Какая часть светового потока проходит через эту систему? (Ответ: 0,12)

**1.9.** Два поляризатора расположены так, что угол между их плоскостями составляет  $30^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через оба поляризатора, если между ними поместить кварцевую пластинку, поворачивающую плоскость поляризации на угол  $\alpha = 45^\circ$ . (Ответ: в 2,14 или 29,9 раз)

**1.10.** Плоско-поляризованный свет падает на стопку из трех поляризаторов. Плоскость первого поляризатора параллельна плоскости поляризации падающего света, плоскость второго составляет угол  $\varphi = 45^\circ$  с плоскостью первого, а плоскость третьего перпендикулярна плоскости первого. Как изменится интенсивность света на выходе из системы? (Ответ: уменьшится в 4 раза)

**1.11.** Анализатор в 2 раза уменьшает интенсивность линейно поляризованного света, приходящего к нему от поляризатора. Когда между поляризатором и анализатором поместили кварцевую пластину, свет перестал проходить совсем. На какой угол повернулась плоскость поляризации света в кварцевой пластине? (Ответ:  $\pi/4$ )

**1.12.** Угол между плоскостями двух поляризаторов равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, проходящего через эту систему, если угол увеличить до  $60^\circ$ ? (Ответ: 2)

**1.13.** Луч света образует на экране светлое пятно. Когда на его пути поместили систему из двух поляризаторов, пятно на экране исчезло. Если же между поляризаторами поместить кварцевую пластину, то интенсивность падающего на экран света станет равной 12,5% от первоначальной интенсивности. На какой угол поворачивается плоскость поляризации света в этой кварцевой пластине? (Ответ:  $\pi/6$ )

**1.14.** Интенсивность циркулярно-поляризованного света, прошедшего систему из двух плоских поляризаторов, уменьшилась в 8 раз. Найти угол между плоскостями поляризаторов. (Ответ:  $\pi/3$ )

**1.15.** Во сколько раз уменьшится интенсивность поляризованного по кругу луча света, проходящего через два поляризатора, если между ними поместить кварцевую пластинку, поворачивающую плоскость поляризации света на угол  $\alpha = +15^\circ$ ? Плоскость второго поляризатора повернута по отношению к плоскости первого на угол  $\beta = -45^\circ$ . (Ответ: 8)

**1.16.** Луч света падает на систему из 4 поляризаторов, плоскости которых повернуты по отношению к плоскости первого на соответствующие углы



$\alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\alpha_3 = 60^\circ$ ,  $\alpha_4 = 30^\circ$ . Как изменится его интенсивность после прохождения системы? (Ответ: уменьшится в 4,74 раза)

**1.17.** Во сколько раз уменьшится интенсивность поляризованного по кругу луча света, проходящего через два поляризатора, и размещенную между ними кварцевую пластину. Угол между плоскостями поляризаторов равен  $90^\circ$ . Кварцевая пластинка поворачивает плоскость поляризации света на угол  $\beta = 30^\circ$ . (Ответ: уменьшится в 8 раз)

**1.18.** Между двумя поляризаторами, плоскости которых взаимно перпендикулярны, помещены еще два, плоскости которых повернуты по отношению к плоскости первого на углы  $\alpha_2 = 30^\circ$  и  $\alpha_3 = -30^\circ$ . Как изменится интенсивность поляризованной по кругу световой волны, проходящей через эту систему? (Ответ: Уменьшится в 42,7 раза)

**1.19.** При прохождении поляризованного монохроматического света через пластинку кварца его плоскость поляризации поворачивается на  $\beta = 22,5^\circ$  на каждом миллиметре толщины. Какой наименьшей толщины необходимо взять кварцевую пластинку, помещенную между двумя одинаково направленными поляризаторами, чтобы интенсивность прошедшего через эту систему света была максимальной? (Ответ: 8 мм)

**1.20.** Пластинка кварца, поворачивающая плоскость поляризации света на угол  $\alpha = 30^\circ$ , помещена между двумя николями, плоскости которых взаимно перпендикулярны. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего эту систему? (Ответ: 8)

**1.21.** Между двумя николями помещена кварцевая пластинка, поворачивающая плоскость поляризации монохроматического света на угол  $\alpha = 120^\circ$ . Как изменится интенсивность поляризованного по кругу света, прошедшего эту систему, если плоскость второго поляризатора составляет с плоскостью первого угол  $\beta = 30^\circ$ ? (Ответ: 0 или 3/8)

**1.22.** Естественный свет падает на систему из трех последовательно расположенных поляризаторов, причем плоскость среднего поляризатора составляет угол  $\varphi = 60^\circ$  с плоскостями двух других поляризаторов. Во сколько раз уменьшится интенсивность света после прохождения этой системы? (Ответ: В 32 раза)

**1.23.** Два поляризатора расположены так, что угол между их плоскостями составляет  $30^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность циркулярно-поляризованного света при прохождении через систему, если между поляризаторами поместить кварцевую пластинку, поворачивающую плоскость поляризации на угол  $\alpha = 90^\circ$ ? (Ответ: 8)

**1.24.** Четыре поляризатора уложены в стопку так, что плоскость каждого последующего образует угол  $\alpha = 30^\circ$  с плоскостью предыдущего. На первый падает свет, плоскость поляризации которого совпадает с плоскостью первого поляризатора. На сколько процентов интенсивность света прошедшего через

эту систему поляризаторов меньше интенсивности падающего света? (Ответ: 57,8%)

**1.25.** Естественный свет проходит через два поляризатора, поставленные так, что угол между их плоскостями равен  $\alpha$ . Интенсивность прошедшей световой волны оказалась равной 37,5% от интенсивности падающей на первый поляризатор. Найти угол  $\alpha$ . (Ответ:  $\pi/6$ )

**2.1.** Угол между зеркалами в установке Френеля (рис.8.1)  $\varphi = 12^\circ$ , расстояния  $r = 10$  см и  $b = 130$  см. Длина волны света  $\lambda = 0,55$  мкм. Определить ширину интерференционной полосы на экране. (Ответ: 18,5 или 1,1 мм)

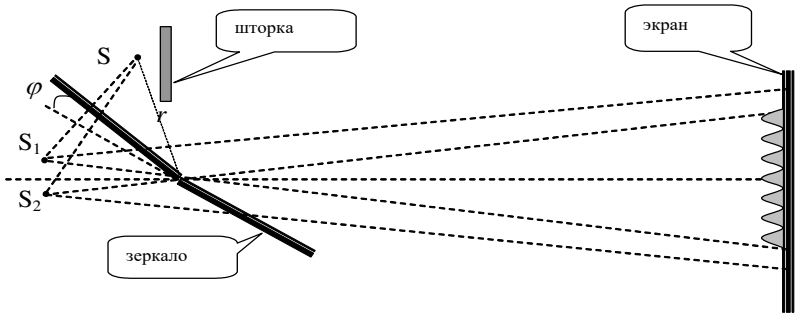


Рис. 8.1. Зеркала Френеля. (Светящаяся щель  $S$  образует в двух соприкасающихся краях зеркалах мнимые изображения (источники)  $S_1$  и  $S_2$ , которые дают интерференционную картину на экране. Подбирая угол между зеркалами  $\varphi$ , можно регулировать расстояние  $d = 2r \cdot \sin \varphi$  между  $S_1$  и  $S_2$ )

Две линейные антенны  $a$  и  $b$  расположены на расстоянии  $d = 1$  м друг от друга (рис. 8.2). Антенны излучают когерентные электромагнитные волны на частоте 150 МГц. Начальная фаза излучения первой антенны  $\varphi_{a0} = 0$ , второй  $\varphi_{b0} = \pi$ . В каких направлениях  $\theta$  в удаленных точках будут наблюдаться максимумы интенсивности излучения? (Ответ:  $\sin \theta = 1$ , и  $\sin \theta = 4$ )

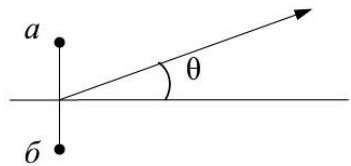


Рис. 8.2.

**2.3.** Найти все длины волн видимого света (от  $\lambda_1 = 380$  нм до  $\lambda_2 = 760$  нм), которые будут максимально ослаблены при оптической разности хода интерферирующих волн, равной 1,8 мкм. (Ответ: 400 нм, 514 нм, 720 нм)

**2.4.** В опыте Ллойда (рис. 8.3) расстояние от источника до экрана  $L = 100$  см. При некотором положении источника ширина интерференционной полосы на экране равна  $0,25$  мм, а после того как источник отодвинули от плоскости зеркала еще на  $\Delta h = 0,6$  мм, ширина полос уменьшилась в  $1,5$  раза. Найти длину волны света. (Ответ:  $600$  нм)

**2.5.** Плоская монохроматическая световая волна падает нормально на диафрагму с двумя узкими щелями, отстоящими друг от друга на расстояние  $d = 2,5$  мм. На экране, расположенном за диафрагмой на расстоянии  $L = 100$  см, образуется система интерференционных полос (рис. 8.4). На каком расстоянии от ее центра находится второй максимум, если длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм? (Ответ:  $0,4$  мм)

**2.6.** Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга (рис. 8.4), если зеленый светофильтр ( $\lambda_1 = 0,5$  мкм) заменить красным ( $\lambda_2 = 0,65$  мкм)? (Ответ:  $1,3$ )

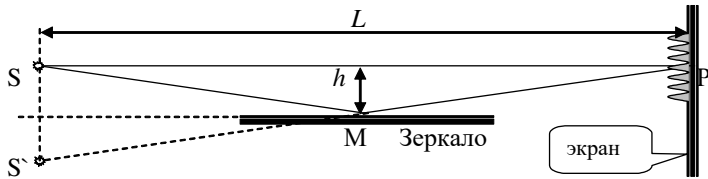


Рис. 8.3. Опыт Ллойда. (Световая волна от светящейся щели  $S$  интерферирует на экране с волной, отразившейся от зеркала ( $S'$  - мнимый источник). Подбирая расстояние от щели до зеркала  $h$ , можно регулировать расстояние между  $S$  и  $S'$ )

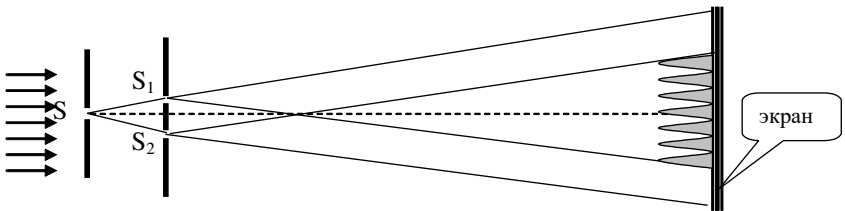


Рис. 8.4. Опыт Юнга. (Световая волна падает на экран с узкой щелью  $S$ . Прошедший щель свет попадает на второй экран с двумя узкими щелями  $S_1$  и  $S_2$ , которые служат вторичными когерентными источниками света)

**2.7.** Две когерентные плоские световые волны, угол между направлениями распространения которых  $\varphi = 6^\circ$ , падают на экран. Направление распростра-

нения одной из волн перпендикулярно экрану. Амплитуды волн одинаковы. Определить расстояние между соседними максимумами на экране, если длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм. (Ответ: 4,8 мкм или 0,286 мм)

**2.8.** Плоская световая волна падает на бизеркала Френеля (рис. 8.1), угол между которыми  $\varphi = 2^\circ$ . Отраженные волны падают почти нормально на экран. Определить длину волны света, если ширина интерференционной полосы на экране равна 0,55 мм. (Ответ: 38,4 мкм или 640 нм)

**2.9.** Две линейные антенны, расположены на расстоянии  $d = 1$  м друг от друга параллельно оси  $OZ$  (рис. 8.2). Антенны излучают когерентные электромагнитные волны на частоте 150 МГц. При какой наименьшей разности фаз излучения антенн в направлении  $\theta$  будет наблюдаться максимум интенсивности? (Ответ:  $\pi$ )

**2.10.** Источник света  $S$  ( $\lambda = 0,6$  мкм) и плоское зеркало расположены как показано на рис. 8.3 (зеркало Ллойда). Что будет наблюдаться в точке  $P$  экрана, максимум или минимум, если  $L = 2$  м,  $h = 0,55$  мм,  $|SM| = |MP|$ ? Учесть, что в точке  $M$  при отражении от оптически более плотной среды фаза волны изменится на  $\pi$ . (Ответ: Мах)

**2.11.** Расстояние между двумя когерентными источниками света равно 0,1 мм. Расстояние между интерференционными полосами на экране в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние от источников до экрана, если длина волны  $\lambda = 0,5$  мкм. (Ответ: 2 м)

**2.12.** В схеме, предложенной Ллойдом (рис. 8.3), расстояние от светящейся щели до экрана  $L = 1$  м, от щели до плоскости зеркала  $h = 1$  мм, длина световой волны  $\lambda = 500$  нм. Определить ширину интерференционных полос. (Ответ: 0,25 мм)

**2.13.** В опыте Юнга (рис. 8.4) отверстия освещались монохроматическим светом ( $\lambda = 0,6$  мкм). Расстояние между отверстиями  $d = 1$  мм, расстояние от них до экрана  $L = 3$  м. Найти положение второй светлой полосы на экране, считая от центра интерференционной картины. (Ответ: 3,6 мм)

**2.14.** В опыте с зеркалами Френеля (рис. 8.1) расстояние между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние до экрана  $L = 3$  м. Длина волны  $\lambda = 500$  нм. Определить ширину полос интерференции на экране. (Ответ: 3 мм)

**2.15.** В схеме Ллойда (рис. 8.3) расстояние от светящейся щели до плоскости зеркала равно 1 мм, расстояние от щели до экрана  $L = 100$  см, ширина интерференционных полос на экране равна 0,25 мм. Определить длину волны света. (Ответ: 500 нм)

**2.16.** Две линейные антенны  $a$  и  $b$  расположены на расстоянии  $d = 2$  м друг от друга параллельно оси  $OZ$  (рис. 8.2). Антенны излучают когерентные электромагнитные волны на частоте 150 МГц. Начальная фаза излучения первой антенны  $\varphi_{a0} = 0$ , второй  $\varphi_{b0} = \pi$ . Под каким углом  $\theta_k$  направлению  $z$  (рис.

7.1) в удаленных точках будет наблюдаться максимум интенсивности излучения? (Ответ:  $\pm\pi/6$ ;  $\pm 5\pi/6$ )

**2.17.** Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 1 мм (рис. 8.4), расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить длину волны, испускаемой источником монохроматического света, если ширина полос интерференции равна 1,5 мм. (Ответ: 500 нм)

**2.18.** Определить, во сколько раз изменится ширина интерференционных полос на экране в опыте с зеркалами Френеля (рис. 8.1), если фиолетовый светофильтр ( $\lambda_1 = 400$  нм) заменить красным ( $\lambda_2 = 700$  нм). (Ответ: Увеличится в 1,75 раз)

**2.19.** Пучок лазерного излучения с  $\lambda = 632,8$  нм падает нормально на преграду с двумя узкими щелями, расстояние между которыми равно 1 мм. На экране, установленном на расстоянии  $L = 100$  см за преградой, наблюдается система интерференционных полос. На каком расстоянии от ее центра находится третий максимум? (Ответ: 1,9 мм)

**2.20.** В опыте с зеркалами Френеля (рис. 8.1) расстояние между мнимыми изображениями источника света  $d = 0,5$  мм, расстояние от них до экрана  $L = 5$  м. В зеленом свете на экране получились интерференционные полосы, расположенные на расстоянии равном 5 мм друг от друга. Найти длину волны зеленого света. (Ответ: 500 нм)

**2.21.** Две линейные антенны, расположены на расстоянии  $d = 1$  м друг от друга параллельно оси  $OZ$  (рис. 8.2). Антенны излучают когерентные электромагнитные волны на частоте 150 МГц. Какова разность фаз излучения антенн, если в направлении 2, составляющем с лучом 3 угол  $\theta = 30^\circ$ , будет наблюдаться максимум интенсивности? (Ответ:  $\pi/2$ )

**2.22.** В опыте Юнга (рис. 8.4) расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на расстоянии 4,5 мм. (Ответ:  $5 \cdot 10^{-4}$  рад или  $0,029^\circ$ )

**2.23.** В опыте Юнга (рис. 8.4) расстояние между щелями равно 0,8 мм. На каком расстоянии от щелей следует расположить экран, чтобы ширина интерференционной полосы при  $\lambda = 700$  нм оказалась равной 2 мм? (Ответ: 2,3 м)

**2.24.** Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга (рис. 8.4) равно 1 м. Определить расстояние между щелями, если при длине волны  $\lambda = 600$  нм ширина интерференционных полос на экране равна 1,2 мм. (Ответ: 0,5 мм)

**2.25.** В установке с бизеркалами Френеля (рис. 8.1) расстояние от линии пересечения зеркал до источника света равно 0,1 м, до экрана - 1 м. Определить значение угла между зеркалами, при котором для света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм ширина интерференционных полос на экране будет равна 1 мм. (Ответ:  $9,5'$ )

**3.1.** На диафрагму с круглым отверстием радиусом  $r = 1$  мм падает нормально параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. На пути лучей, прошедших через отверстие помещают экран. Определить максимальное расстояние от центра отверстия до экрана, при котором в центре дифракционной картины еще будет наблюдаться темное пятно. (Ответ: 1 м)

**3.2.** Свет от точечного источника света  $\lambda = 500$  нм падает на плоскую диафрагму с круглым отверстием радиусом  $r = 1,00$  мм (рис. 4.2 б). Расстояние от источника до диафрагмы  $a = 1$  м. Определить расстояние  $b$  от диафрагмы до экрана, если отверстие открывает для точки наблюдения Р три зоны Френеля. (Ответ: 2 м)

**3.3.** Плоская световая волна ( $\lambda = 500$  нм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром  $d = 0,4$  см. На каком расстоянии от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстие открывало только одну зону Френеля? (Ответ: 8 м)

**3.4.** Точечный источник света с длиной волны  $\lambda = 550$  нм помещен на расстоянии  $a = 1$  м перед непрозрачной преградой с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия для любой точки наблюдения, находящейся на оси отверстия, будет открыто не менее одной зоны Френеля? (Ответ:  $r \geq 0,74$  мм)

**3.5.** Плоская световая волна с длиной волны  $\lambda = 500$  нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиуса  $r = 0,70$  мм. Найти расстояние между двумя наиболее удаленными от диафрагмы точками на оси отверстия, в которых наблюдаются минимумы интенсивности. (Ответ: 24,5 см)

**3.6.** Определить радиус третьей зоны Френеля, если расстояния от разбиваемой на зоны волновой поверхности до точечного источника света и до точки наблюдения одинаковы и равны 1,5 м. Длина волны света  $\lambda = 600$  нм. (Ответ: 1,2 мм)

**3.7.** Плоская монохроматическая световая волна падает нормально на круглое отверстие в диафрагме. На расстоянии  $b = 9,0$  м от нее находится экран, где наблюдается дифракционная картина. Диаметр отверстия уменьшили в 3 раза. Найти новое расстояние от экрана до диафрагмы, при котором число открытых зон Френеля останется прежним. (Ответ: 1 м)

**3.8.** Вычислить радиус пятой зоны Френеля для плоского волнового фронта, если построение делается для точки наблюдения, находящейся на расстоянии  $b = 1$  м от фронта волны и  $\lambda = 500$  нм. (Ответ: 1,6 мм)

**3.9.** На диафрагму с круглым отверстием диаметром  $d = 0,5$  см падает нормально плоская световая волна ( $\lambda = 500$  нм). На каком расстоянии от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстие открывало только две зоны Френеля? (Ответ: 6,25 м)

**3.10.** Точечный источник света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм помещен на расстоянии  $a = 50$  см перед непрозрачной преградой с круглым отверстием радиуса  $r = 0,50$  мм. Определить расстояние от преграды до точки, для которой отверстие открывает только 5 полных зон Френеля. (Ответ: 12,5 см)

**3.11.** Плоская световая волна с длиной волны  $\lambda = 500$  нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиуса  $r = 1,20$  мм. Найти расстояние между двумя точками на оси отверстия, для которых отверстие открывает четыре и шесть зон Френеля. (Ответ: 24 см)

**3.12.** Найти наименьший радиус круглого отверстия в диафрагме, чтобы при освещении его плоской монохроматической волной в центре дифракционной картины на экране наблюдалось темное пятно. Известно, что радиус третьей зоны Френеля при таком расположении диафрагмы и экрана равен 2 мм. (Ответ: 1,6 мм)

**3.13.** Между точечным источником света и экраном поместили диафрагму с круглым отверстием, радиус которого  $r$  можно менять в процессе опыта. Расстояния от диафрагмы до источника и до экрана равны  $a = 100$  см и  $b = 125$  см. Определить длину волны света, если максимум освещенности в центре дифракционной картины на экране наблюдается при  $r_1 = 1,00$  мм и следующий максимум при  $r_2 = 1,29$  мм. (Ответ: 598 нм)

**3.14.** Радиус четвертой зоны Френеля для плоского волнового фронта для некоторой точки наблюдения Р равен 3 мм. Определить радиус шестой зоны для той же точки. (Ответ: 3,7 мм)

**3.15.** Точечный источник света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм расположен на расстоянии  $a = 100$  см перед диафрагмой с круглым отверстием радиуса  $r = 1$  мм. Найти расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, для которой число полностью открытых зон Френеля равно трем. (Ответ: 2 м)

**3.16.** Определить отношение площадей пятой и шестой зон Френеля для плоского волнового фронта с длиной волны равной 0,5 мкм, если экран расположен на расстоянии  $b = 1$  м от диафрагмы с отверстием. (Ответ: 1)

**3.17.** Плоская световая волна с длиной волны  $\lambda = 700$  нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиуса  $r = 1,4$  мм. Определить расстояния от диафрагмы до трех наиболее удаленных от нее точек на оси отверстия, в которых наблюдаются минимумы интенсивности. (Ответ: 1,4 м, 0,7 м, 0,47 см)

**3.18.** Точечный источник света с длиной волны  $\lambda = 550$  нм помещен на расстоянии  $a = 1$  м перед непрозрачной преградой с отверстием радиуса  $r = 2$  мм. Какое минимальное число открытых зон Френеля может наблюдаться при этих условиях? (Ответ: 7)

**3.19.** Плоская световая волна с длиной волны  $\lambda = 600$  нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиуса  $r = 1,73$  мм. Найти расстояние между двумя наиболее удаленными от диафрагмы точками на оси отверстия, в которых наблюдаются максимумы интенсивности. (Ответ: 3,3 м)

**3.20.** На диафрагму с круглым отверстием диаметром  $d = 4$  мм падает нормально параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 500$  нм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии  $b = 1$  м от него. Сколько

зон Френеля открывает отверстие? Будет ли освещена точка наблюдения? (Ответ: 8; нет)

**3.21.** Точечный источник света ( $\lambda = 550$  нм) расположен на расстоянии  $a = 1$  м перед диафрагмой с круглым отверстием диаметра  $d = 2$  мм. Определить расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, если отверстие открывает три зоны Френеля. (Ответ: 1,5 м)

**3.22.** На непрозрачную преграду с круглым отверстием радиуса  $r = 1,0$  мм падает плоская монохроматическая световая волна. Когда расстояние от преграды до установленного за ней экрана равно  $b_1 = 0,575$  м, в центре дифракционной картины наблюдается максимум интенсивности. При увеличении расстояния до значения  $b_2 = 0,862$  м максимум интенсивности сменяется минимумом. Определить длину волны света. (Ответ: 579 нм)

**3.23.** На круглое отверстие радиуса  $r = 2,0$  мм падает плоская монохроматическая волна. Найти ее длину, если отверстие открывает 4 зоны Френеля для точки наблюдения, из которой отверстие видно под углом  $\varphi = 4'$ . (Ответ: 1164 нм)

**3.24.** Точечный источник света с длиной волны  $\lambda = 550$  нм помещен на расстоянии  $a = 1$  м перед непрозрачной преградой с отверстием радиуса  $r = 2$  мм. При каком значении расстояния от преграды до точки наблюдения получается минимально возможное число открытых зон? (Ответ:  $>10$  м)

**3.25.** Плоская световая волна с длиной волны  $\lambda = 600$  нм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиуса  $r = 0,60$  мм. Найти расстояние между двумя точками на оси отверстия, для которых отверстие открывает две и три зоны Френеля. (Ответ: 10 см)

**4.1.** На щель шириной  $b = 0,05$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Определить угол между первоначальным направлением пучка света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу. (Ответ:  $2,75^\circ$ )

**4.2.** На дифракционную решетку, содержащую 400 щелей на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 600$  нм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. (Ответ: 9)

**4.3.** Дифракционная решетка освещена падающим нормально монохроматическим светом. В дифракционной картине главный максимум второго порядка отклонен на угол  $\varphi = 14^\circ$ . На какой угол отклонен главный максимум третьего порядка? (Ответ:  $21,3^\circ$ )

**4.4.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Дифракционная картина наблюдается на экране, удаленном от решетки на расстояние  $L = 1$  м. Расстояние между двумя максимумами интенсивности первого порядка равно 20 см. Определить постоянную дифракционной решетки. (Ответ: 5 мкм)



**4.5.** На щель шириной  $b = 0,1$  мм падает нормально параллельный пучок света от монохроматического источника ( $\lambda = 600$  нм). Определить ширину центрального максимума в дифракционной картине на экране, отстоящем от линзы на расстоянии  $L = 1$  м. (Ответ: 1,2 см)

**4.6.** Дифракционная решетка содержит 200 щелей на 1 мм. На решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка? (Ответ: 8)

**4.7.** На дифракционную решетку длиной  $l = 1,5$  мм, содержащей 3000 щелей, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 550$  нм. Определить число главных максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки. (Ответ: 1)

**4.8.** Сколько щелей на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении дифракции Фраунгофера в монохроматическом свете ( $\lambda = 600$  нм) максимум пятого порядка отклонен на угол  $\varphi = 18^\circ$ ? (Ответ:  $103 \text{ мм}^{-1}$ )

**4.9.** На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения света, соответствующий второй светлой дифракционной полосе, равен  $1^\circ$ . Сколько длинам волн падающего света равна ширина щели? (Ответ: 28 или 86 или 143)

**4.10.** Параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 550$  нм падает на дифракционную решетку нормально к ее поверхности. Дифракционная картина наблюдается на экране, удаленном от решетки на расстоянии  $L = 1$  м. Расстояние между двумя максимумами интенсивности первого порядка равно 20 см. Определить число щелей на 1 см ширины решетки. (Ответ:  $1800 \text{ см}^{-1}$ )

**4.11.** Определить число щелей на 1 мм дифракционной решетки, если углу  $\varphi = 30^\circ$  соответствует максимум четвертого порядка для монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. (Ответ:  $250 \text{ мм}^{-1}$ )

**4.12.** На дифракционную решетку с периодом  $d = 2,5$  мкм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 600$  нм). Определить угол дифракции, соответствующий последнему максимуму. (Ответ:  $74^\circ$ )

**4.13.** На щель шириной  $b = 0,1$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Максимум или минимум будет наблюдаться на экране, расположенном вдали за щелью, если угол дифракции Фраунгофера равен: 1)  $17^\circ$ ; 2)  $43^\circ$ ? (Ответ: 1-min; 2-max)

**4.14.** Монохроматический свет падает нормально на дифракционную решетку. Определить угол дифракции Фраунгофера, соответствующий главному максимуму четвертого порядка, если максимум третьего порядка отклонен на угол  $\varphi = 18^\circ$ . (Ответ:  $24,3^\circ$ )

**4.15.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 700$  нм. Дифракционная картина наблюдается на экране, удаленном от решетки на расстояние  $L = 1$  м. Первый главный максимум находится на расстоянии  $l = 10$  см от центрального. Опреде-

лить число главных максимумов, которое при этом дает дифракционная решетка. (Ответ: 21 или 23)

**4.16.** На дифракционную решетку, содержащую  $n = 500$  щелей на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Определить угол дифракции Фраунгофера, соответствующий третьему главному максимуму. (Ответ: 66 см)

**4.17.** На щель шириной  $b = 2$  мкм падает нормально параллельный пучок света от монохроматического источника ( $\lambda = 589$  нм). Под каким максимальным углом будет наблюдаться минимум света при дифракции Фраунгофера? (Ответ: 62°)

**4.18.** При нормальном падении света на дифракционную решетку угол дифракции для линии  $\lambda_1 = 650$  нм во втором порядке равен 45°. Найти угол дифракции для линии  $\lambda_2 = 500$  нм в третьем порядке. (Ответ: 55°)

**4.19.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок монохроматического света. В спектре, полученном с помощью этой дифракционной решетки, некоторая спектральная линия наблюдается в первом порядке под углом  $\varphi = 11^\circ$ . Определить наивысший порядок спектра, в котором может наблюдаться эта линия. (Ответ: 5)

**4.20.** На дифракционную решетку с периодом  $d = 10$  мкм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Определить угол дифракции Фраунгофера, соответствующий второму главному максимуму. (Ответ: 6,9°)

**4.21.** На узкую щель шириной  $b = 0,05$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 694$  нм. Определить направление света на вторую светлую полосу при дифракции Фраунгофера (по отношению к первоначальному направлению света). (Ответ: 2°)

**4.22.** На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Дифракционная картина наблюдается на экране, удаленном от решетки на расстояние  $L = 1$  м. Расстояние между двумя максимумами интенсивности первого порядка равно 20 см. Определить максимальный угол отклонения лучей, соответствующих последнему главному дифракционному максимуму. (Ответ: 84,3°)

**4.23.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет. Определить угол дифракции для линии  $\lambda_1 = 550$  нм в четвертом порядке, если угол для линии  $\lambda_2 = 600$  нм в третьем порядке составляет 30°. (Ответ: 37,7°)

**4.24.** При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница спектра третьего порядка ( $\lambda = 0,4$  мкм). (Ответ: 600 нм)

**4.25.** На щель шириной  $b = 0,1$  мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Дифракционная картина наблюдается на уда-

ленном экране, расположенном параллельно щели. Определить расстояние от щели до экрана, если ширина центрального дифракционного максимума равна 1 см. (Ответ: 1 м)

**5.1.** Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вылетающих из медного электрода, освещаемого монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 250$  нм. Работа выхода электрона из меди  $A = 4,17$  эВ. (Ответ:  $0,5 \cdot 10^6$  м/с)

**5.2.** Ток насыщения, протекающий через вакуумный фотоэлемент при его освещении, равен  $I = 3 \cdot 10^{-10}$  А. Найти число  $N$  электронов, вырываемых светом из катода фотоэлемента в одну секунду. (Ответ:  $1,875 \cdot 10^9$  электронов)

**5.3.** Максимальная скорость фотоэлектронов при освещении цезиевого электрода монохроматическим светом оказалась равной  $V_{\max} = 5,5 \cdot 10^7$  см/с. Работа выхода электрона из цезия составляет  $A = 1,89$  эВ. Вычислить длину волны света, применявшегося для освещения этого электрода. (Ответ: 452 нм)

**5.4.** Уединенный цинкованный шарик облучается ультрафиолетовым светом с длиной волны 250 нм. До какого максимального потенциала зарядиться шарик? Работа выхода электрона для цинка  $A = 3,74$  эВ. (Ответ: 1,21 В)

**5.5.** При каких длинах волн облучающего света шарик в условиях предыдущей задачи заряжаться не будет? (Ответ: 330 нм)

**5.6.** На фотоэлемент с литиевым катодом падает свет с длиной волны  $\lambda = 200$  нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок. (Ответ: 3,8 эВ)

**5.7.** Фотон с энергией  $E_{\phi} = 10$  эВ падает на серебряную пластинку и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластины. (Ответ: 2,4 кэВ/с)

**5.8.** Определить максимальную скорость фотоэлектрона, вырванного с поверхности золота фотоном с энергией  $E_{\phi} = 9,3$  эВ. (Ответ: 1326 км/с)

**5.9.** Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} = 310$  нм, а максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна 4 эВ? (Ответ: 0,5)

**5.10.** Электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda = 207$  нм вырывает с поверхности титана фотоэлектроны, которые попадают в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Найти радиус окружности, по которой начнут двигаться фотоэлектроны, если их скорость перпендикулярна линиям магнитного поля. (Ответ: 0,5 мм)

**5.11.** При освещении катода светом с длиной волны равной сначала 207 нм, а затем 270 нм обнаружили, что задерживающее напряжение изменилось в 2 раза. Определить красную границу фотоэффекта. (Ответ: 388 нм)

**5.12.** Определить постоянную Планка по результатам эксперимента с фотоэффектом, в котором электроны, вырываемые из металла светом с частотой

$\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, полностью задерживались разностью потенциалов  $U = 6,6$  В, а вырываемые светом с частотой  $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$  Гц - разностью потенциалов  $U = 16,5$  В. (Ответ:  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж с)

**5.13.** Фотоэлемент освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 0,2$  мкм. Найти работу выхода электронов из металла, если максимальная кинетическая энергия электронов  $T = 1,6$  эВ. (Ответ: 4,59 эВ)

**5.14.** Найти частоту света, вырывающего из металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов  $U = 3$  В. Фотоэффект начинается при частоте света  $\nu = 6 \cdot 10^{14}$  Гц. Определить работу выхода электронов из этого металла. (Ответ: 2,5 эВ)

**5.15.** Какой максимальный заряд приобретет удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda = 140$  нм? Электроемкость шарика  $C = 1$  пФ. (Ответ: 4,5 пКл)

**5.16.** При исследовании фотоэффекта с поверхности цинка установлено, что при изменении длины волны падающего света в 1,4 раза для прекращения фотоэффекта необходимо увеличить задерживающее напряжение в 2 раза. Определить длину волны излучения в первом эксперименте. (Ответ: 176 нм)

**5.17.** При освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_1 = 0,4$  мкм он заряжается до разности потенциалов  $U = 2$ В. Определить, до какой разности потенциалов зарядится фотоэлемент при освещении его монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_2 = 0,3$  мкм. (Ответ: 3 В)

**5.18.** Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 310$  нм. При ее изменении на 25% задерживающее напряжение уменьшилось на 0,8 В. Рассчитать по этим экспериментальным данным постоянную Планка. (Ответ: )

**5.19.** Плоский серебряный электрод освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 183$  нм. Определить, на какое максимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода имеется задерживающее однородное электрическое поле напряженностью  $E = 0,5$  кВ/м. (Ответ: 5 мм)

**5.20.** Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла светом ной волны  $\lambda = 311$  нм полностью задерживаются напряжением  $U_3 = 1,5$  В. Каково будет задерживающее напряжение, если этот металл облучать светом с длиной волны  $\lambda = 249$  нм? (Ответ: 2,5 В)

**5.21.** Определить максимальную скорость фотоэлектрона, вырванного с поверхности золота фотоном с энергией  $E_\phi = 9,3$  эВ. (Ответ: 1326 км/с)

**5.22.** Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_{кр} = 310$  нм, а максимальная кинетическая энергия электронов равна 4 эВ. (Ответ: 0,5)

**5.23.** При облучении платиновой пластины ультрафиолетовым светом задерживающая разность потенциалов была равна 4,7 В. Когда платиновую пластину заменили на другую, то пришлось увеличить задерживающую разность

потенциалов до 6,0 В. По данным, приведенным в табл. 2, определить материал второй пластины. (Ответ: титан)

**5.24.** При освещении катода светом с длиной волны равной сначала 207 нм, а затем 270 нм, обнаружили, что задерживающее напряжение изменилось в 2 раза. Определить красную границу фотоэффекта. (Ответ: 388 нм)

**5.25.** Металлическую пластину освещают монохроматическим светом с длиной волны 531 нм. Каков максимальный импульс фотоэлектронов, если работа выхода электронов из данного металла  $A = 1,73 \cdot 10^{-19}$  Дж. (Ответ:  $6 \cdot 10^{-25}$  кг м/с)

Работа выхода электронов из металлов

Таблица 2

Металл	Работа выхода, эВ	Металл	Работа выхода, эВ
Алюминий	4,25	Платина	5,32
Золото	4,30	Серебро	4,30
Литий	2,38	Титан	3,95
Медь	4,40	Цезий	1,81
Никель	4,50	Цинк	4,24

**6.1.** Определить изменение длины волны при эффекте Комптона, если наблюдение ведется перпендикулярно к направлению первичного пучка излучения. (Ответ: 0)

**6.2.** В результате комптоновского рассеяния длина волны фотона с энергией  $E_\phi = 0,5$  МэВ увеличилась  $\Delta\lambda = \alpha\lambda$ , где  $\alpha = 0,25$ . Определить кинетическую энергию  $T_e$  электрона отдачи. (Ответ: 0,1 МэВ)

**6.3.** Фотон рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол  $\alpha$ . Определить энергию рассеянного фотона  $E_\phi$  и импульс  $P_e$  электрона отдачи. Дать численный ответ для  $\lambda = 0,02$  нм и  $\alpha = 90^\circ$ . (Ответ: 55 кэВ,  $55 \cdot 10^{-7}$  кг м/с)

**6.4.** По условию предыдущей задачи определить угол  $\alpha$  между направлением первичного фотона и направлением движения электрона отдачи. (Ответ:  $\text{tga} = 0,892$ )

**6.5.** Во сколько раз изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии на свободном электроне превосходит аналогичное изменение при рассеянии на свободном протоне при одинаковых углах рассеяния?

(Ответ: в 1846 раз)

**6.6.** Определить максимальное изменение длины волны при рассеянии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения на свободном протоне. (Ответ:  $2,6 \cdot 10^{-15}$  м)

**6.7.** Фотон с энергией 20 кэВ рассеивается назад на электроне, движущемся ему навстречу. Определить длину волны фотона после рассеяния. (Ответ: 11,05 пм)

**6.8.** Фотон рассеивается на покоящемся протоне. Энергия рассеянного фотона равна кинетической энергии отдачи, а угол разлета между рассеянным фотоном и протоном отдачи равен  $90^\circ$ . Найти энергию падающего фотона. (Ответ:  $4,095 \cdot 10^{-14}$  Дж)

**6.9.** Фотон с энергией  $E_\phi = 2m_0 c^2$  при рассеянии на покоящемся электроне теряет половину своей энергии, где  $m_0$  – масса покоя электрона. Найти угол разлета  $\alpha$  между рассеянным фотоном и электроном отдачи. (Ответ:  $60^\circ$ )

**6.10.** Фотон с длиной волны  $\lambda = 0,0024$  нм после рассеяния на электроне движется в противоположном направлении. Определить длину волны рассеянного фотона. (Ответ: 7,26 пм)

**6.11.** Фотон с энергией 20 кэВ рассеивается назад на электроне, движущемся ему навстречу с энергией  $E$  (включая энергию покоя). Определить энергию фотона после рассеяния. (Ответ: 11,2 кэВ)

**6.12.** Фотон с энергией равной энергии покоя электрона рассеялся на свободном электроне на угол  $\vartheta = 120^\circ$ . Определить энергию рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи. (Ответ: 0,2 МэВ и 0,3 МэВ)

**6.13.** Фотон при эффекте Комптона на свободном электроне был рассеян на угол  $\vartheta = 90^\circ$ . Определить импульс, приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была  $E_\phi = 1,02$  МэВ. (Ответ:  $5,7 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с)

**6.14.** Рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda = 1$  нм рассеивается свободными электронами. Определить максимальную длину волны рентгеновского излучения в рассеянном пучке. (Ответ: 5,86 пм)

**6.15.** Какая доля энергии падающего фотона приходится на электрон отдачи, если рассеяние фотона при эффекте Комптона происходит на угол  $\vartheta = 90^\circ$ ? Энергия фотона до рассеяния  $E_\phi = 0,51$  МэВ. (Ответ: 0,5)

**6.16.** Определить максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии света на свободных электронах и свободных протонах. (Ответ: 4,86 пм и 0,0026 пм)

**6.17.** В результате эффекта Комптона фотон с энергией  $E_\phi = 1,02$  МэВ рассеян на свободном электроне на угол  $\vartheta = 150^\circ$ . Определить энергию рассеянного фотона. (Ответ: 0,22 мэВ)

**6.18.** На какой угол был рассеян фотон с энергией  $E_\phi = 1,53$  МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи  $T = 0,51$  МэВ? (Ответ:  $33,6^\circ$ )

**6.19.** Определить энергию электрона отдачи, если фотон с энергией  $E_\phi = 40$  КэВ при комптоновском рассеянии на свободном электроне изменяет направление на угол  $\vartheta = 90^\circ$ . (Ответ: 37 кэВ)

**6.20.** Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на рассеивающее вещество. При этом длины волн излучения, рассеянного под углами  $\vartheta_1 = 60^\circ$  и  $\vartheta_2 = 120^\circ$ , отличаются друг от друга в 2 раза. Считая, что рассеяние происходит на свободных электронах, найти длину волны падающего излучения. (Ответ: 1,22 пм)

**6.21.** Рентгеновский фотон с энергией  $E_\phi = 20$  кэВ претерпевает комптоновское рассеяние на свободном электроне на угол  $\vartheta = 90^\circ$ . Чему равна энергия электрона отдачи? (Ответ: 0,75 кэВ)

**6.22.** Фотон с энергией  $E_\phi = 0,75$  МэВ рассеялся на свободном электроне под углом  $\vartheta = 60^\circ$ . Определить направление движения электрона отдачи. Принять, что до соударения с фотоном электрон покоился. (Ответ:  $35^\circ$ )

**6.23.** Определить энергию рассеянного фотона, если в результате эффекта Комптона фотон с длиной волны  $\lambda = 10$  пм был рассеян на угол  $\alpha = 60^\circ$ . (Ответ: 110 кэВ)

**6.24.** Рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda = 2$  нм рассеивается свободными электронами на угол  $\alpha = 90^\circ$ . Найти энергию электронов отдачи. (Ответ: 0,75 эВ)

**6.25.** На какой угол рассеивается фотон с энергией  $E = 1,02$  МэВ, если энергия рассеянного фотона  $E = 0,51$  МэВ. (Ответ:  $60^\circ$ )

**7.1.** Найти длину волны в спектре теплового излучения черного тела с энергетической светимостью  $R^* = 5,7$  Вт/см<sup>2</sup>, которой соответствует максимум испускательной способности этого тела. (Ответ: 2,9 мкм)

**7.2.** В результате расширения Вселенной после Гигантского взрыва возникшее электромагнитное излучение начало остывать. В настоящее время это излучение (его называют реликтовым) имеет вид теплового излучения с максимумом испускательной способности при длине волны  $\lambda_{max} = 1,07$  мм. Какова температура этого излучения? (Ответ: 2,7 К)

**7.3.** На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при температуре  $t = 0^\circ$  С? (Ответ: 10,6 мкм)

**7.4.** При изменении температуры абсолютно черного тела площадь под графиком спектральной плотности энергетической светимости увеличилась в 16 раз. Как изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности этого тела? (Ответ: уменьшится в 2 раза)

**7.5.** Длина волны  $\lambda_{max}$ , на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела, равна 0,58 мкм. Определить максимальную спектральную плотность энергетической светимости. (Ответ:  $4 \cdot 10^{13}$  Вт/м<sup>3</sup>)

**7.6.** Поток энергии, излучаемый из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт. Определить температуру печи, если площадь отверстия окошка  $S = 6$  см<sup>2</sup>. (Ответ: 1000 К)

**7.7.** Температура поверхности Солнца равна 5300 К. Считая Солнце черным телом, определить длину волны, которой соответствует максимум испускательной способности Солнца. (Ответ: 547 нм)

**7.7.** При изменении температуры абсолютно черного тела длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности, увеличилась в два раза. Как изменится при этом величина максимума испускательной способности? (Ответ: уменьшится в 32 раза)

**7.9.** Определить температуру абсолютно черного тела, при которой максимум спектральной плотности его энергетической светимости приходится на красную границу видимого спектра  $\lambda_{кр} = 750$  нм. (Ответ: 3867 К)

**7.10.** Температура верхних слоев звезды Сириус равна 10 кК. Определить поток энергии, излучаемый с поверхности этой звезды площадью  $S = 1$  км<sup>2</sup>. (Ответ:  $5,7 \cdot 10^{14}$  Вт)

**7.11.** Вследствие изменения температуры черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с  $\lambda_1 = 2,4$  мкм на  $\lambda_2 = 0,8$  мкм. Во сколько раз изменилась энергетическая светимость тела? (Ответ: увеличится в 81 раз)

**7.12.** Определить относительное увеличение  $\Delta R^*/R$  энергетической светимости черного тела при увеличении его температуры на 1%. (Ответ: 0,04)

**7.13.** Максимум спектральной плотности энергетической светимости яркой звезды Арктур приходится на длину волны  $\lambda_{max} = 580$  нм. Принимая, что звезда излучает как черное тело, определить температуру поверхности этой звезды. (Ответ: 5000 К)

**7.14.** Во сколько раз надо увеличить температуру черного тела, чтобы его энергетическая светимость возросла в два раза? (Ответ:  $\approx 1,2$ )

**7.15.** Муфельная печь потребляет мощность  $P = 1$  кВт. Температура ее внутренней поверхности при открытом отверстии площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup> равна 1200 К. Считая, что отверстие печи излучает как черное тело, определить, какая часть мощности рассеивается стенками. (Ответ: 70%)

**7.16.** После изменения температуры черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости сместился с  $\lambda_1 = 0,8$  мкм на  $\lambda_2 = 2,4$  мкм. Во сколько раз изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости? (Ответ: уменьшится в 243 раза)

**7.17.** Определить энергию, излучаемую из смотрового окошка плавильной печи площадью  $S = 6$  см<sup>2</sup>, если температура печи  $T = 1200$  К. (Ответ: 70,5 Вт)

**7.18.** При увеличении термодинамической температуры черного тела в два раза длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 400$  нм. Определить начальную температуру тела. (Ответ: 3625 К)

**7.19.** Энергетическая светимость черного тела  $R^* = 10$  кВт/м<sup>2</sup>. Определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости этого тела. (Ответ: 810 К)

**7.20.** До какого значения необходимо уменьшить температуру черного тела, чтобы величина максимума спектральной плотности энергетической светимости уменьшилась в 16 раз, если начальная температура  $T = 1410$  К? (Ответ: увеличится в 10,5 раз)



**7.21.** Как изменится мощность излучения черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, уменьшилась от  $\lambda_1 = 0,72$  мкм до  $\lambda_2 = 0,4$  мкм? (Ответ: 612 К)

**7.22.** Мощность излучения шара радиусом  $r = 10$  см равна 1 кВт. Найти температуру поверхности шара, считая его черным телом. (Ответ: 304 К)

**7.23.** Начальная температура теплового излучения  $T = 2000$  К. На сколько градусов изменилась эта температура, если длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости в спектре излучения, увеличилась на  $\Delta\lambda = 260$  нм? (Ответ: уменьшится до 1000 К)

**7.24.** Температура абсолютно черного тела  $T = 2000$  К. Как нужно ее изменить, чтобы энергетическая светимость уменьшилась в 16 раз? (Ответ: 290 К)

**7.25.** Максимум спектра излучения абсолютно черного тела приходится на длину волны  $\lambda_{max} = 10$  мкм. Какова температура тела? (Ответ: 290 К)