

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

**РЕПЕТИТОР ПО ФИЗИКЕ  
КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

Учебное пособие

Новосибирск 2016

УДК 537.2 (075)  
ББК 22.33, Я 73  
Р 411

Кафедра теоретической и прикладной физики

Составители: канд. техн. наук, доц. *В. Я. Чечуев*;  
д-р техн. наук, проф. *С. В. Викулов*

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. *М. П. Синюков* (СГУВТ)

**Репетитор по физике. Квантовая оптика:** учеб. пособие / Новосибир. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост.: В. Я. Чечуев, С. В. Викулов. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2016. – 35 с.

Учебное пособие содержит материал, изучаемый, согласно программе, в курсе общей физики.

Предназначено для студентов всех форм обучения и всех направлений подготовки, реализуемых в НГАУ.

Утверждено и реализовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол № 7 от 1 марта 2016 г.)

## **ВВЕДЕНИЕ**

В учебном пособии рассмотрены три темы: «Тепловое излучение», «Фотоэффект», «Эффект Комптона. Давление света».

Материал тем изложен следующим образом. Даны определения основных вводимых в теме физических величин и приведены соотношения между ними. Приведены примеры решения типовых задач и 12 вариантов индивидуальных заданий.

Пособие может быть использовано на практических и контрольных занятиях, при выполнении домашних заданий, а также при самостоятельном изучении курса физики.

# 1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## 1.1. Характеристики теплового излучения

Излучение телами электромагнитных волн (свечение тел) может осуществляться за счёт различных видов энергии. Самым распространённым является тепловое излучение, т.е. испускание электромагнитных волн за счёт внутренней энергии тел. Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счёт любого вида энергии, кроме внутренней энергии, объединяются под общим названием «люминесценция».

Тепловое излучение имеет место при любой температуре, однако при невысоких температурах излучаются практически лишь длинные (инфракрасные) электромагнитные волны.

Поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям, назовём **энергетической светимостью тела**  $R$ . Энергетическая светимость является функцией температуры. При малом интервале частот  $d\omega$

$$dR_{\omega,T} = r_{\omega,T} d\omega. \quad (1.1)$$

Величина  $r_{\omega,T}$  называется **спектральной плотностью энергетической светимости (испускательной способностью) тела**. Она – функция частоты и температуры.

Из соотношения (1.1) следует, что энергетическая светимость связана с испускательной способностью соотношением

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega. \quad (1.2)$$

Излучение вместо частоты можно характеризовать длиной волны:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}. \quad (1.3)$$

Связь между определяющими один и тот же участок спектра величинами  $d\omega$  и  $d\lambda$  находится путём дифференцирования соотношения (1.3):

$$d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega. \quad (1.4)$$

Знак минус в этом выражении не имеет существенного значения, он лишь указывает на то, что с возрастанием одной из величин,  $\omega$  или  $\lambda$ , другая величина убывает.

Если интервалы  $d\omega$  и  $d\lambda$  относятся к одному и тому же участку спектра, то

$$r_{\omega,T} d\omega = r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (1.5)$$

Подставив в (1.5) (1.4), получим:

$$r_{\omega,T} \cdot d\omega = r_{\lambda,T} \cdot \frac{2\pi c}{\omega^2} \cdot d\omega = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega,$$

откуда

$$r_{\omega,T} = r_{\lambda,T} \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{2\pi c}. \quad (1.6)$$

С помощью (1.6) можно перейти от  $r_{\lambda,T}$  к  $r_{\omega,T}$  и наоборот.

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток  $d\Phi_{\omega}$ , обусловленный электромагнитными волнами, частота которых заключена в интервале  $d\omega$ . Часть этого потока  $d\Phi'_{\omega}$  будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$a_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}. \quad (1.7)$$

называется **поглощательной способностью тела**. Поглощательная способность зависит от частоты и температуры.

Для тела, полностью поглощающего упавшее на него излучение всех частот,  $a_{\omega,T} = 1$ . Такое тело называется **абсо-**

**лотно чёрным.** Тело, для которого  $a_{\omega,T} = \text{const} < 1$ , называют **серым**.

## 1.2. Законы теплового излучения

**Закон Кирхгофа.** Между излучательной и поглощательной способностями любого тела имеется связь. Она устанавливается законом Кирхгофа: *отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры:*

$$\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} = f(\omega, T). \quad (1.8)$$

Для абсолютно чёрного тела по определению  $a_{\omega,T} = 1$ . Следовательно,  $r_{\omega,T} = f(\omega, T)$ . Таким образом, универсальная функция Кирхгофа  $f(\omega, T)$  есть не что иное, как испускательная способность абсолютно чёрного тела.

Абсолютно чёрных тел в природе нет. Однако можно создать устройство (модель), сколь угодно близкое по своим свойствам к абсолютно чёрному телу. Такое устройство представляет собой почти замкнутую полость, снабжённую малым отверстием (рис. 1.1). Излучение, проникшее внутрь через отверстие, прежде чем выйти обратно, претерпевает многократные отражения. При каждом отражении часть энергии поглощается, в результате чего практически всё излучение любой частоты поглощается такой полостью.

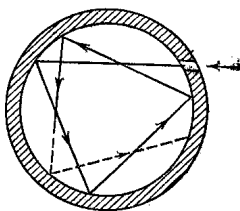


Рис. 1.1

Согласно закону Кирхгофа, испускательная способность такого устройства очень близка по спектральному составу к излучению абсолютно чёрного тела при той же температуре. Разлагая это излучение в спектр по длинам волн с помощью дифракционной решётки и измеряя интенсивность различных участков спектра, можно найти экспериментально вид функции  $f(\lambda, T)$  (рис. 1.2).

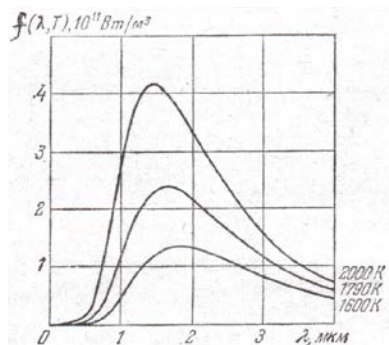


Рис. 1.2

**Закон Стефана-Больцмана.** Стефан, анализируя экспериментальные данные, пришёл к выводу, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвёртой степени температуры. Больцман, исходя из термодинамических соображений, показал, что этот результат справедлив только для абсолютно чёрных тел. В итоге закон

$$R^* = \sigma T^4 \quad (1.9)$$

получил название закона Стефана-Больцмана, а постоянную

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

называют постоянной Стефана-Больцмана.

**Законы Вина.** Вин, воспользовавшись, кроме термодинамики, электромагнитной теорией, показал, что функция спектрального распределения должна иметь вид

$$f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right). \quad (1.10)$$

И хотя вид функции Вину не удалось установить, формула (1.10) позволила ему получить два закона:

1. *Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре (закон смещения):*

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (1.11)$$

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

2. *Максимум спектральной плотности энергетической светимости пропорционален пятой степени абсолютной температуры (закон максимума):*

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = C T^5, \quad (1.12)$$

где  $C = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} / (\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$  – вторая постоянная Вина.

**Формула Рэлея-Джинса.** Из многочисленных попыток получения вида функции Кирхгофа остановимся только на результатах исследования Рэлея и Джинса. Они рассмотрели равновесное (чёрное) излучение в замкнутой полости с зеркальными стенками как совокупность пространственных стоячих электромагнитных волн. Применив теорему Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы, им удалось получить формулу, которая имеет вид

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot kT \quad \text{или} \quad r(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \cdot kT. \quad (1.13)$$

Эта формула удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными лишь при больших длинах волн и резко расходится с опытом для малых длин волн.

С классической точки зрения вывод формулы Рэлея-Джинса является безупречным. Поэтому расхождение этой формулы с опытом указывало на существование каких-то



закономерностей, несовместимых с представлениями классической физики. Невозможность отыскания методами классической теоретической физики такого выражения для функций Кирхгофа, которое согласовывалось бы с данными экспериментов во всём интервале частот от 0 до  $\infty$ , получило образное название *«ультрафиолетовой катастрофы»*.

**Формула Планка.** Выход из трудностей, возникших в проблеме теплового излучения абсолютно чёрного тела, был предложен Планком в 1900 г. Ему удалось подобрать эмпирическое выражение

$$r(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}, \quad (1.14)$$

которое согласовывалось с экспериментальными данными при любой частоте и температуре.

Осуществив преобразование выражения (1.14) по формуле (1.6), формулу Планка можно записать в следующем виде:

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi \hbar c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar c}{\lambda kT}} - 1}. \quad (1.15)$$

Для теоретического же обоснования этой формулы Планку пришлось сделать предположение, совершенно чуждое классическим представлениям, а именно, допустить, что электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon = \hbar \omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.16)$$

где  $h, \hbar = \frac{h}{2\pi}$  — коэффициенты пропорциональности, получившие название постоянной Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с,  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с).

С использованием выражения (1.14) легко выводятся законы Стефана-Больцмана и Вина.

## 2. ФОТОЭФФЕКТ

### 2.1. Внешний фотоэффект

**Внешний фотоэффект** – это явление испускания электронов веществом под действием света.

Экспериментальные исследования внешнего фотоэффекта у металлов показали, что он зависит не только от химической природы металла, но и от состояния его поверхности. Даже ничтожные загрязнения поверхности металла существенно влияют на эмиссию электронов под действием света. Поэтому в современных условиях для изучения фотоэффекта пользуются вакуумной трубкой (рис. 2.1).

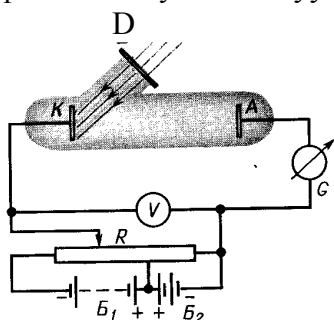


Рис. 2.1

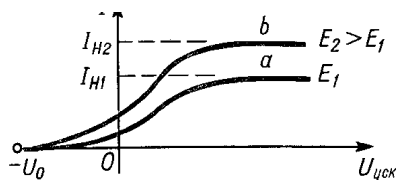


Рис. 2.2

Катод  $K$ , покрытый исследуемым металлом, освещается монохроматическим светом, проходящим в трубку через окно  $D$ . Напряжение  $U$  между анодом и катодом регулируется потенциометром  $R$  и измеряется вольтметром  $V$ . Две аккумуляторные батареи  $B_1, B_2$ , включённые «навстречу друг другу», позволяют с помощью потенциометра изменять значение и знак напряжения  $U$ . Сила фототока измеряется гальванометром  $G$ .

На рис. 2.2 изображены кривые зависимости силы фототока от напряжения  $U_{\text{уск}}$ , соответствующие различным потокам света  $\Phi$ . Частота света в обоих случаях одинакова.

Существование фототока в области отрицательных напряжений от 0 до  $-U$  объясняется тем, что фотоэлектроны, выбитые светом из катода, обладают отличной от нуля начальной кинетической энергией. За счёт уменьшения этой энергии электроны могут совершать работу против сил задерживающего электрического поля в трубке и достигать анода. Очевидно, что максимальная начальная скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов связана с  $U_0$  соотношением

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_0, \quad (2.1)$$

где  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл и  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – абсолютные значения заряда и массы электрона. При  $U \leq -U_0$  фототок  $I = 0$ .

По мере увеличения  $U$  фототок  $I$  постепенно возрастает, так как всё большее число фотоэлектронов достигает анода. Максимальное значение силы тока  $I_n$  называется **фототоком насыщения** и соответствует таким значениям  $U$ , при которых все электроны, выбиваемые из катода, достигают анода:

$$I_n = en, \quad (2.2)$$

где  $n$  – число фотоэлектронов, вылетающих из катода за 1с.

## 2.2. Законы внешнего фотоэффекта

Опытным путём установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$  света, при которой ещё возможен внешний фотоэффект ( $\nu_0$  зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности).

3. Число фотоэлектронов  $n$ , вырываемых из катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света.

Кроме того, опыты показывают, что фотоэффект практически безынерционен.

При объяснении первого и второго законов встретились серьёзные трудности. В самом деле, согласно электромагнитной теории, вырывание свободных электронов из металла должно являться результатом их «раскачивания» в электрическом поле световой волны. Однако в таком случае совершенно непонятно, почему максимальная начальная скорость и кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов зависят от частоты света, а не от амплитуды колебаний вектора напряжённости электрического поля волны и связанной с ней интенсивности волны. Трудности в истолковании первого и второго законов фотоэффекта вызвали сомнения в универсальной применимости волновой теории света.

### **2.3. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**

В 1905 г. А. Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта легко объясняются, если предположить, что свет поглощается такими же порциями  $\hbar\omega$  (квантами), какими он, по предположению Планка, испускается. По мысли Эйнштейна, энергия, полученная электроном, доставляется ему в виде кванта  $\hbar\omega$ , который усваивается им целиком. Часть этой энергии, равная работе выхода  $A$ , затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Если электрон освобождается светом не у самой поверхности, а на некоторой глубине, то часть энергии, равная  $E'$ , может быть потеряна вследствие случайных столкновений в веществе. Остаток энергии образует кинетическую энергию  $E_k$  электрона, покинувшего вещество. Энергия  $E_k$  бу-

дет максимальна, если  $E' = 0$ . В этом случае должно выполняться соотношение

$$\hbar\omega = h\nu = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + A, \quad (2.3)$$

называемое *формулой Эйнштейна*.

Уравнение (2.3) позволяет легко объяснить все основные законы внешнего фотоэффекта для металлов. Действительно, из него следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона зависит не от интенсивности, а от частоты света и работы выхода  $A$ . Внешний фотоэффект возможен только в том случае, когда энергия фотона  $\hbar\omega (h\nu)$  больше или, в крайнем случае, равна  $A$ . Следовательно, соответствующая красной границе фотоэффекта частота

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (2.4)$$

Она зависит только от работы выхода электрона, т.е. от химической природы металла и состояния его поверхности.

Наконец, из явления внешнего фотоэффекта ясно, что общее число  $n$  фотоэлектронов, вылетающих за единицу времени, пропорционально числу фотонов  $n'$ , падающих за то же время на поверхность вещества, которое, в свою очередь, пропорционально интенсивности света.

С изобретением лазеров были получены недостижимые до тех пор мощности световых пучков. Это дало возможность осуществить многофотонные процессы. В частности, был наблюден многофотонный фотоэффект, в ходе которого электрон, вылетающий из металла, получает энергию не от одного, а от  $N$  фотонов ( $N = 2, 3, 4, 5$ ). Формула Эйнштейна в случае многофотонного эффекта выглядит следующим образом:

$$N h\nu = N h \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + A. \quad (2.5)$$

Соответственно красная граница фотоэффекта смещается в сторону более длинных волн ( $\lambda$  увеличивается в  $N$  раз).

На основе соотношений (2.1) и (2.4) уравнение (2.3) можно переписать в виде:

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0). \quad (2.6)$$

Это уравнение подтверждено многократными экспериментальными проверками.

### 3. ЭФФЕКТ КОМПТОНА. ФОТОНЫ

#### 3.1. Эффект Комптона

Особенно отчётливо корпускулярные свойства света проявляются в явлении, которое получило название *эффекта Комптона*. Комптон, исследуя рассеяние рентгеновских лучей различными веществами, обнаружил, что в рассеянных лучах, наряду с излучением первоначальной длины волны  $\lambda$  содержатся также лучи большей длины волны  $\lambda'$ . Разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  оказалась зависящей только от угла  $\vartheta$ , образуемого направлением рассеянного излучения с направлением первичного пучка. От длины волны  $\lambda$  и от природы рассеивающего вещества  $\Delta\lambda$  она не зависит.

При рассеивании веществами с малым атомным номером (Li, Be, B) практически всё рассеянное излучение имеет смещённую длину волны. По мере увеличения атомного номера всё большая часть рассеивается без изменения длины волны.

Все особенности эффекта Комптона можно объяснить, рассматривая рассеяние как процесс упругого столкновения рентгеновских фотонов с практически свободными электронами. Свободными можно считать слабее всего связанные с атомами электроны, энергия связи которых значительно

меньше той энергии, которую фотон может передать электрону при соударении. Соответствующий расчёт даёт

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \vartheta), \quad (2.7)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{mc} = \frac{h}{mc}. \quad (2.8)$$

Определяемая выражением (2.8) величина  $\lambda_c$  называется **комптоновской длиной волны** той частицы, масса  $m$  которой имеется в виду. В рассматриваемом нами случае  $\lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12}$  м – комптоновская длина волны электрона.

При рассеянии фотонов на электронах, связь которых с атомом велика, обмен энергией и импульсом происходит с атомом как целым. Поскольку масса атома намного превосходит массу электрона, комптоновское смещение в этом случае ничтожно и  $\lambda'$  практически совпадает с  $\lambda_c$ . По мере роста атомного номера увеличивается относительное число электронов с сильной связью, чем обуславливается ослабление смещённой линии.

### 3.2. Фотоны

Итак, чтобы объяснить распределение энергии в спектре равновесного теплового излучения, достаточно, как показал Планк, допустить, что свет только испускается порциями  $\hbar\omega$ . Для объяснения фотоэффекта достаточно предположить, что свет поглощается такими же порциями. Эйнштейн пошёл дальше. Он выдвинул гипотезу, что свет и распространяется в виде дискретных частиц, названных первоначально световыми квантами, а затем – фотонами. Существование фотонов экспериментально было доказано в опыте **Боте**.

Из теории относительности следует, что:

- 1) масса покоя фотона равна нулю;
- 2) фотон всегда движется со скоростью света  $c$ ;

3) энергия фотона  $\varepsilon = \hbar\omega = h\nu = mc^2$ ;

4) импульс фотона

$$p_\gamma = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k, \quad (2.9)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число. Фотон летит в направлении электромагнитной волны.

Пусть на поглощающую свет поверхность падает поток фотонов, летящих по нормали к поверхности. Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает  $N$  фотонов, то при коэффициенте отражения  $\rho$  света от поверхности тела  $\rho N$  фотонов отразится, а  $(1 - \rho)N$  – поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс  $p_\gamma = h\nu / c$ , а каждый отраженный –  $2p_\gamma = 2h\nu / c$  (при отражении импульс фотона изменяется на  $-p_\gamma$ ). Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности в 1 с  $N$  фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho)N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N.$$

$N h\nu = E_e$  есть энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т.е. энергетическая освещенность поверхности, а  $E_e / c = w$  – объемная плотность энергии излучения. Поэтому давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho). \quad (2.10)$$

Формула (2.10), полученная на основе квантовых представлений, совпадает с выражением, получаемым из электромагнитной (волновой) теории Максвелла.

Итак, мы рассмотрели ряд явлений, в которых свет ведёт себя как поток частиц (фотонов). Однако не надо забывать, что такие явления, как интерференция и дифракция



света, могут быть объяснены только на основе волновых представлений. Таким образом, свет обнаруживает **корпускулярно-волновой дуализм** (двойственность): в одних явлениях проявляется его волновая природа, и он ведёт себя как электромагнитная волна, в других явлениях проявляется корпускулярная природа света, и он ведёт себя как поток фотонов.

### 3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Температура абсолютно чёрного тела понизилась с 1000 до 850 К. Определить, как и насколько при этом изменилась длина волны, отвечающая максимуму распределения энергии.

*Решение*

В соответствии с законом смещения Вина длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости,

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

Исходя из этого, запишем:

$$\lambda_{1\max} = \frac{b}{T_1}; \quad \lambda_{2\max} = \frac{b}{T_2};$$

$$\Delta\lambda_{\max} = \frac{b}{T_2} - \frac{b}{T_1} = b \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2} \right) = 2,9 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1000 - 850}{1000 \cdot 850} \right) = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Следовательно, длина волны возросла на 0,51 мкм.

**Задача 2.** Максимум энергии излучения абсолютно чёрного тела приходится на длину волны 450 нм. Определить температуру и энергетическую светимость тела.

### Решение

По закону смещения Вина

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

Отсюда

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-7}} = 6420 \text{ К}.$$

В соответствии с законом Стефана-Больцмана

$$R = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 6,42 \cdot 10^3 = 3,64 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2.$$

Следовательно, длина волны возросла на 0,51 мкм.

**Задача 3.** Исследование спектра излучения Солнца показало, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$ . Принимая Солнце за абсолютно чёрное тело, определить:

- 1) энергетическую светимость Солнца;
- 2) поток энергии, излучаемый Солнцем;
- 3) массу электромагнитных волн всех длин, излучаемых Солнцем за 1 с.

### Решение

1) Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела выражается формулой Стефана-Больцмана:

$$R^* = \sigma T^4, \quad (1)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Температура в (1) может быть определена из закона смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$R^* = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 6,4 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

2) Поток энергии  $\Phi$ , излучаемой Солнцем, равен произведению энергетической светимости на площадь поверхности Солнца  $S$  ( $r_c = 7 \cdot 10^8$  м):

$$\Phi = R_s \cdot S = R_s \cdot 4\pi r_c^2 = 6,4 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (7 \cdot 10^8)^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

3) Массу электромагнитных волн найдём, применив закон пропорциональности массы и энергии  $E = m \cdot c^2$ . Энергия электромагнитных волн, излучаемых за время  $t$ , равна произведению потока энергии на время  $E = \Phi \cdot t$ , т.е.  $\Phi t = mc^2$ , откуда

$$m = \frac{\Phi t}{c^2} = \frac{3,9 \cdot 10^{26} \cdot 1}{(3 \cdot 10^8)^2} \approx 4 \cdot 10^9 \text{ кг} = 4 \cdot 10^6 \text{ т}.$$

**Задача 4.** Во сколько раз увеличится мощность излучения  $N$  чёрного тела, если максимум энергии излучения сместится от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

#### *Решение*

В соответствии с законом смещения Вина длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости,

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}. \quad (1)$$

Исходя из этого, запишем:

$$T_{\kappa} = \frac{b}{\lambda_{\kappa}}; \quad T_{\phi} = \frac{b}{\lambda_{\phi}}. \quad (2)$$

Мощность излучения равна:

$$N = R^* S; \quad (3)$$

$$R^* = \sigma T^4. \quad (4)$$

Для температур  $T_{\kappa}$  и  $T_{\phi}$  имеем:

$$N_{\kappa} = \sigma T_{\kappa}^4 S \text{ и } N_{\phi} = \sigma T_{\phi}^4 S. \quad (5)$$

Из (5) находим

$$\frac{N_{\phi}}{N_{\kappa}} = \left( \frac{T_{\phi}}{T_{\kappa}} \right)^4. \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{\max} = \frac{b}{T_2} - \frac{b}{T_1} = b \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2} \right) = 2,9 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1000 - 850}{1000 \cdot 850} \right) = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

С учётом (2) имеем:

$$\frac{N_{\phi}}{N_{\kappa}} = \left( \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_{\phi}} \right)^4 = \left( \frac{0,76}{0,38} \right)^4 = 16.$$

**Задача 5.** Красная граница фотоэффекта для никеля равна 0,257 мкм. Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной 1,5 В.

*Решение*

Согласно уравнению Эйнштейна,

$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_{\kappa_{\max}}. \quad (1)$$

Красная граница фотоэффекта определяется из условия равенства энергии фотона  $E = \frac{hc}{\lambda}$  работе выхода электронов  $A$ :

$$\frac{hc}{\lambda} = A. \quad (2)$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов может быть определена через задерживающую разность потенциалов  $U$ :

$$E_{\kappa_{\max}} = eU, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона.

Подставляя (2) и (3) в (1), получим:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_r} + eU,$$

откуда

$$\lambda = \left( \frac{1}{\lambda_r} + \frac{eU}{hc} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{2,57 \cdot 10^{-7}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \right)^{-1} =$$

$$= 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,196 \text{ мкм.}$$

**Задача 6.** Поверхность металла освещается светом с длиной волны  $\lambda = 350 \text{ нм}$ . При некотором задерживающем потенциале фототок становится равным нулю. При изменении длины волны на  $50 \text{ нм}$  задерживающую разность потенциалов пришлось увеличить на  $0,59 \text{ В}$ . Считая постоянную Планка и скорость света известными, определить заряд электрона.

### *Решение*

Если при изменении длины волны света, вызывающего фототок, пришлось увеличить запирающий потенциал, значит, длина волны уменьшилась. Учитывая это и принимая во внимание, что  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_s$ , запишем уравнение Эйнштейна для обеих ситуаций:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_s, \quad (1)$$

$$\frac{hc}{\lambda - \Delta\lambda} = A + e(U_s + \Delta U). \quad (2)$$

Вычитая из (2) уравнение (1), получим:

$$hc \left( \frac{1}{\lambda - \Delta\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) = e\Delta U, \quad (3)$$

откуда

$$e = \frac{hc}{\Delta U} \cdot \left( \frac{1}{\lambda - \Delta\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) =$$

$$= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,59} \cdot \left[ \frac{1}{(350 - 50) \cdot 10^{-9}} - \frac{1}{350 \cdot 10^{-9}} \right] = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

**Задача 7.** Найти величину задерживающего потенциала  $U_z$  для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого  $\lambda = 330$  нм. Работа выхода электрона из калия  $A = 2$  эВ ( $1$  эВ  $= 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж).

*Решение*

Из уравнения Эйнштейна найдём начальную максимальную энергию электрона:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A. \quad (1)$$

В нём

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_z; \quad (2)$$

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим:

$$eU_z = \frac{hc}{\lambda} - A,$$

$$\text{откуда } U_z = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A}{e} = \frac{\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,3 \cdot 10^{-7}} - 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,75 \text{ В.}$$

**Задача 8.** Фотон с импульсом  $5,44 \cdot 10^{-22}$  кг · м/с был рассеян на свободном электроне на угол  $30^\circ$  в результате эффекта Комптона. Определить импульс рассеянного фотона.

*Решение*

Импульсы фотона

$$p_1 = \frac{h}{\lambda_1}; \quad p_2 = \frac{h}{\lambda_2},$$

$$\text{отсюда } \lambda_1 = \frac{h}{p_1}, \quad \lambda_2 = \frac{h}{p_2}.$$

Изменение длины волны  $\Delta\lambda$  при эффекте Комптона равно

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \vartheta), \text{ или } \frac{h}{p_2} - \frac{h}{p_1} = \frac{h}{mc}(1 - \cos \vartheta),$$

отсюда

$$\begin{aligned} p_2 &= \frac{1}{\frac{1}{mc}(1 - \cos \vartheta) + \frac{1}{p_1}} = \frac{p_1 mc}{p_1(1 - \cos \vartheta) + m_0 c} = \\ &= \frac{0,544 \cdot 10^{-21} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,44 \cdot 10^{-22} \cdot 0,134 + 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} = 4,3 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}. \end{aligned}$$

**Задача 9.** Давление света с длиной волны 0,55 мкм, нормально падающего на зеркальную поверхность, равно 9 мкПа. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

### *Решение*

Давление света  $p$  при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения  $r$  определяется соотношением

$$p = w(1 + \rho), \quad (1)$$

где  $w$  – объёмная плотность энергии излучения,  $w$  равна произведению концентрации фотонов  $n$  на энергию одного фотона:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}, \text{ т.е. } w = \frac{nhc}{\lambda}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$p = \frac{nhc}{\lambda}(1 + \rho),$$

откуда 
$$n = \frac{\lambda p}{hc(1 + \rho)} = \frac{5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 (1 + 1)} \approx 1,24 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}.$$

**Задача 10.** Длина волны рентгеновского излучения, падающего на вещество со свободными электронами,  $\lambda_0 = 0,003 \text{ нм}$ . Какую энергию приобретает комптоновский электрон отдачи при рассеянии электрона под углом  $60^\circ$ ?

### *Решение*

Энергия электрона из закона сохранения энергии определяется как разность между энергиями падающего и улетающего фотонов:

$$E_{\text{эл}} = \hbar \frac{2\pi c}{\lambda_0} - \hbar \frac{2\pi c}{\lambda_0 + \Delta\lambda} = \frac{2\pi c \hbar \Delta\lambda}{\lambda_0 (\lambda_0 + \Delta\lambda)}. \quad (1)$$

По формуле Комптона

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} (1 - \cos \vartheta) = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} (1 - 0,5) = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$E_{\text{эл}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 1,2 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 10^{-12} (3 \cdot 10^{-12} + 1,2 \cdot 10^{-12})} = 1,92 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 120 \text{ эВ}.$$

## **4. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

### *Вариант 1*

1. Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела равна  $R = 3 \text{ Вт/см}^2$ . Определить длину волны, отвечающую максимуму испускательной способности этого тела.

2. Считая Солнце абсолютно чёрным телом, для которого максимум испускательной способности приходится на длину волны  $\lambda = 0,48 \text{ мкм}$ , найти массу, теряемую Солнцем за 1 с. Оценить время, за которое масса Солнца уменьшится на 1 %.



3. Фотон с импульсом  $5,44 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с был рассеян на свободном электроны на угол  $30^\circ$  в результате эффекта Комптона. Определить импульс рассеянного фотона.

4. Световой поток, состоящий из  $n = 5 \cdot 10^4$  фотонов света, обладающих энергией, соответствующей длине волны  $\lambda = 300$  нм, падает на светочувствительный слой, чувствительность которого  $k = 4,5$  мА/Вт. Найти количество фотоэлектронов, освобождаемых таким импульсом света.

5. Определить красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырывааемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм (работа выхода равна  $A = 6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж).

6. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона, длина волны которого  $\lambda = 0,5$  мкм?

### **Вариант 2**

1. Какое количество энергии излучает Солнце за 1 мин? Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно чёрного тела. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

2. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре звезды, равна  $\lambda = 96$  нм. Определить температуру звезды.

3. Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_0 = 310$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\max}$  фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падают лучи с длиной волны  $\lambda = 200$  нм.

4. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроны был рассеян на угол  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ . Определить импульс  $p$  (МэВ/с), приобретённый электроном, если энергия фотона до рассеяния была  $\varepsilon_1 = 1,02$  МэВ.

5. Фотон с энергией  $\varepsilon = 10$  эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс  $p$ , полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластин.

6. Импульс электрона равен импульсу фотона с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм. Какова кинетическая энергия электрона?

### **Вариант 3**

1. Мощность излучения абсолютно чёрного тела равна 10 кВт. Найти величину излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности его энергетической светимости, равна  $7 \cdot 10^{-5}$  см.

2. Приняв температуру Солнца равной 6000 К, определить: 1) мощность, излучаемую с  $1 \text{ м}^2$ ; 2) длину волны  $\lambda_{\text{max}}$ , соответствующую максимуму излучаемой способности. Считать Солнце абсолютно черным телом.

3. На поверхность калия падают лучи с длиной волны  $\lambda = 150$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\text{max}}$  фотоэлектронов.

4. В результате эффекта Комптона фотон с энергией  $\varepsilon_1 = 1,02$  МэВ был рассеян на свободных электронах на угол  $\vartheta = 150^\circ$ . Определить энергию  $\varepsilon_2$  рассеянного фотона.

5. Электрон движется со скоростью  $1,45 \cdot 10^3$  м/с. Определить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона.

6. Определить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего разность потенциалов  $U = 9,8$  В.

### **Вариант 4**

1. Найти температуру печи, если известно, что из отверстия в ней размером  $6,1 \text{ см}^2$  излучается в 1 с 35 Дж. Из-

лучение считать близким к излучению абсолютно чёрного тела.

2. Найти конечную температуру АЧТ, если длина волны, соответствующая максимуму его излучения, увеличилась на 1 мкм, и при этом определили, что температура изменилась в 2 раза.

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

4. Определить максимальное изменение длины волны  $(\Delta\lambda)_{\max}$  при комптоновском рассеянии света на свободных электронах и свободных протонах.

5. При какой температуре кинетическая энергия молекулы двухатомного газа будет равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-4}$  мм ?

6. Кванты света с энергией  $E = 4,97$  эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода  $A = 4,5$  эВ . Найти максимальный импульс, передаваемой поверхности металла при вылете каждого электрона.

### ***Вариант 5***

1. Мощность излучения абсолютно чёрного тела равна 34 кВт . Найти температуру этого тела, если известно, что поверхность его равна  $0,6$  м<sup>2</sup> .

2. На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны  $\lambda = 0,1$  мкм . Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0 = 0,3$  мкм . Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

3. Определить красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм (работа выхода равна  $A = 6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж ).

4. Рентгеновские лучи ( $\lambda = 1 \text{ нм}$ ) рассеиваются электронами, которые можно считать практически свободными. Определить максимальную длину волны  $\lambda_{\text{max}}$  рентгеновских лучей в рассеянном пучке.

5. Найти массу фотона, количество движения которого равно количеству движения молекулы водорода при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Скорость молекулы считать равной средней квадратичной скорости.

6. Давление монохроматического света длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$  на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно  $0,12 \text{ мкПа}$ . Определить число фотонов, падающих каждую секунду на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

### **Вариант 6**

1. Принимая коэффициент черноты угля при температуре  $600^\circ\text{C}$  равным  $0,8$ , определить энергию, излучаемую с поверхности угля  $5 \text{ см}^2$  за  $10 \text{ мин}$ .

2. Найти величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого равна  $0,33 \text{ мкм}$ .

3. При фотоэффекте с платиновой поверхности задерживающий потенциал оказался равным  $U_z = 0,8 \text{ В}$ . Найти длину волны применяемого облучения (работа выхода электрона из платины равна  $A = 6,3 \text{ эВ}$ ).

4. Какая доля энергии фотона приходится при эффекте Комптона на электрон отдачи, если рассеяние фотона происходит на угол  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ ? Энергия фотона до рассеяния  $\varepsilon_1 = 0,51 \text{ МэВ}$ .

5. Лазерной установкой в течение  $10 \text{ мин}$  облучаются семена огурцов. Длина волны излучаемого света  $\lambda = 632 \text{ нм}$ . Интенсивность излучения  $I = 6 \text{ Вт/м}^2$ . Сколько фотонов про-

шло через перпендикулярную площадку  $S = 1 \text{ м}^2$  за 10 мин работы излучателя?

6. При определённых условиях сетчатка глаза человека может регистрировать всего лишь 5 фотонов голубовато-зелёного света ( $\lambda = 5 \cdot 10^7 \text{ м}$ ). Чему равно соответствующее количество энергии, попадающее на сетчатку, в джоулях и электрон-вольтах, если каждую секунду в глаз попадают и поглощаются пять таких фотонов? Чему будет равна передаваемая при этом энергия в ваттах?

### ***Вариант 7***

1. Определить температуру Солнца, принимая его за абсолютно черное тело, если известно, что максимум интенсивности спектра Солнца лежит в зеленой области  $\lambda_m = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Какова его энергетическая светимость?

2. Найти величину задерживающего потенциала для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого равна  $0,33 \text{ мкм}$  ( $A_{\text{вых}} = 2 \text{ эВ}$ ), ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

3. Красной границе фотоэффекта для алюминия соответствует длина волны  $\lambda_0 = 332 \text{ нм}$ . Найти: а) работу выхода электрона для этого металла; б) длину световой волны  $l$ , при которой задерживающий потенциал  $U_s = 1 \text{ В}$ .

4. Фотон с длиной волны  $\lambda_1 = 15 \text{ нм}$  рассеялся на свободном электроне. Длина волны рассеянного фотона  $\lambda_2 = 16 \text{ нм}$ . Определить угол  $\vartheta$  рассеяния.

5. Для предпосевного облучения семян свеклы применена лазерная установка, излучающая волны длиной  $\lambda = 632 \text{ нм}$ . Определить частоту излучения и энергию кванта.

6. Вычислить длину волны  $\lambda$  фотона, импульс которого равен импульсу электрона, обладающего скоростью  $v = 10^4 \text{ км/с}$ .

### **Вариант 8**

1. Температура АЧТ изменилась при нагревании от 1000 до 3000 К. Во сколько раз увеличилась его максимальная спектральная плотность энергетической светимости?

2. Определить постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла светом частотой  $2,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ , полностью задерживаются обратным потенциалом 6,6 В, а вырываемые светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  – потенциалом 16,5 В.

3. Фотон с энергией  $\varepsilon_1 = 0,51 \text{ МэВ}$  был рассеян при эффекте Комптона на свободном электроном на угол  $\vartheta = 180^\circ$ . Определить кинетическую энергию  $T$  электрона отдачи.

4. Для дезинфекции воздуха в помещении инкубатора применено излучение длиной волны  $\lambda = 280 \text{ нм}$ . Интенсивность излучения  $I = 6 \text{ Вт/м}^2$ . Сколько фотонов прошло через перпендикулярную площадку  $S = 1 \text{ м}^2$  за 10 мин работы излучателя?

5. С какой скоростью  $v$  должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda = 520 \text{ нм}$ ?

6. Определить температуру, при которой средняя энергия молекул трехатомного газа равна энергии фотонов, соответствующих излучению  $\lambda = 600 \text{ нм}$ .

### **Вариант 9**

1. АЧТ находится при температуре  $T_1 = 1500 \text{ К}$ . В результате остывания этого тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 9 \text{ мкм}$ . До какой температуры  $T_2$  охладилось тело?

2. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной электрической лампочке равна 2450 К. Отношение ее энергетической светимости к энергетической светимости АЧТ

при данной температуре равно 0,3. Найти величину излучающей поверхности спирали.

3. На металлическую пластинку направлен пучок ультрафиолетовых лучей с длиной волны 0,2 мкм. Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов 2,2 В. Определить работу выхода электронов из металла.

4. Какова должна быть длина волны  $\lambda$  лучей, падающих на платиновую пластинку, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была  $r_{\max} = 3$  мм/с ?

5. В течение 15 мин облучаются семена моркови. Длина волны излучаемого света  $\lambda = 632$  нм, интенсивность излучения  $I = 300$  Вт/м<sup>2</sup>. Сколько фотонов попало на семя площадью 0,25 мм<sup>2</sup> ?

6. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона длиной волны  $\lambda = 600$  нм ?

### **Вариант 10**

1. Насколько уменьшится масса Солнца за год вследствие излучения? Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

2. На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны  $\lambda = 150$  нм. Красная граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} = 200$  нм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрона кинетической энергии?

3. Красная граница фотоэффекта для цезия  $\lambda_{\text{кр}} = 640$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, если на цезий падают лучи с длиной волны  $\lambda = 200$  нм (работа выхода  $A = 1,9$  эВ).

4. Фотон с энергией 10 эВ падает на серебряную пластинку и вызывает фотоэффект. Определить импульс, полученный пластинкой, если принять, что направление дви-

жения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластины.

5. Найти энергию  $E$ , импульс  $p$  фотона, если соответствующая ему длина волны  $\lambda = 1,6$  пм.

6. Определить энергию фотона, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего разность потенциалов  $U = 9,8$  В.

### **Вариант 11**

1. В результате остывания АЧТ до температуры  $T_2 = 266$  К длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 9$  мкм. При какой температуре  $T_1$  находилось тело до охлаждения?

2. На фотоэлемент с катодом из рубидия падают лучи с длиной волны 100 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок (работа выхода равна  $A = 3,4 \cdot 10^{-19}$  Дж).

3. На пластинку падает монохроматический свет с длиной волны 0,42 мкм, фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 0,95 В. Определить работу выхода электрона с поверхности пластинки.

4. Фотоактивирование семян производят излучением гелий-неонового лазера мощностью 25 МВт. Какое число фотонов падает на поверхность семени в минуту? Длина волны излучения 630 нм.

5. На расстоянии  $r = 5$  м от точечного монохроматического ( $\lambda = 0,5$  мкм) изотропного источника расположена площадка ( $S = 8$  мм<sup>2</sup>) перпендикулярно падающим лучам. Определить число  $N$  фотонов, ежесекундно падающих на площадку. Мощность излучения  $P = 100$  Вт.



6. Давление света, производимое на зеркальную поверхность,  $p = 4$  мПа . Определить концентрацию  $n_0$  фотонов вблизи поверхности если длина волны света, падающего на поверхность  $\lambda = 0,5$  мкм .

### **Вариант 12**

1. Рассчитать максимальную спектральную плотность энергетической светимости Солнца, спектральный состав излучения которого близок к составу излучения АЧТ при температуре 5800 К.

2. Чёрное тело находится при температуре  $T_1 = 2900$  К. . При его остывании длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 9$  мкм . Определить температуру  $T_2$ , до которой охладилось тело.

3. На поверхность лития падают лучи с длиной волны 250 нм. Определить максимальную скорость фотоэлектронов (работа выхода электрона равна  $A = 3,7 \cdot 10^{-19}$  Дж).

4. Фотон с длиной волны 100 пм рассеялся под углом  $180^\circ$  на свободном электроне. Определить кинетическую энергию электрона отдачи.

5. Давление света с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм на зачёрнённую поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,1 мкПа. Определить число фотонов, падающих на поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$  за 1 с.

6. Свет с длиной волны  $\lambda = 600$  нм нормально падает на зеркальную поверхность и производит на неё давление  $p = 4$  мкПа . Определить число  $N$  фотонов, падающих за время  $t = 10$  с на площадь  $S = 1 \text{ мм}^2$  этой поверхности.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3  |
| 1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.....                            | 4  |
| 1.1. Характеристики теплового излучения .....         | 4  |
| 1.2. Законы теплового излучения.....                  | 6  |
| 2. ФОТОЭФФЕКТ.....                                    | 10 |
| 2.1. Внешний фотоэффект .....                         | 10 |
| 2.2. Законы внешнего фотоэффекта.....                 | 11 |
| 2.3. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта ... | 12 |
| 3. ЭФФЕКТ КОМПТОНА. ФОТОНЫ .....                      | 14 |
| 3.1. Эффект Комптона.....                             | 14 |
| 3.2. Фотоны .....                                     | 15 |
| 3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....                         | 17 |
| 4. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ.....           | 24 |

Составители:  
Владимир Яковлевич Чечуев  
Станислав Викторович Викулов

**РЕПЕТИТОР ПО ФИЗИКЕ.  
КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

Учебное пособие

Редактор *Т. К. Коробкова*  
Компьютерная верстка *В. Н. Зенина*

Подписано в печать 3 августа 2016 г. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ .  
Объем 1,7 уч.-изд. л., 2,2 усл. печ. л. Тираж 100 экз.  
Изд. № 24 Заказ № 1636.

---

Отпечатано в Издательском центре НГАУ «Золотой колос»  
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.  
Тел. (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru