

ОПТИКА

Сборник задач

для студентов технических специальностей

1. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ.

Основные формулы.

Циркуляция вектора напряженности электрического поля \vec{E} , возбуждаемого переменным магнитным полем с индукцией \vec{B}

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Плотность тока смещения

$$\vec{j}_{ci} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t},$$

где \vec{D} - электрическая индукция, $\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ - плотность тока смещения в вакууме,

$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ - плотность тока поляризации.

Плотность полного тока

$$\vec{j}_{полн} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

где \vec{j} - плотность тока проводимости.

Обобщенная теорема о циркуляции вектора \vec{H}

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

Уравнения Максвелла:

- в интегральной форме

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

где ρ - объемная плотность заряда,

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}, \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0,$$

- в дифференциальной форме

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{D} = \rho,$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0,$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где ε_0, μ_0 - электрическая и магнитная постоянные соответственно, ε, μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости, γ - удельная проводимость вещества.

Фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{n},$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ - скорость распространения света в вакууме, $n = \sqrt{\varepsilon \mu}$ - показатель

преломления среды.

Связь между мгновенными значениями напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H.$$

Волновое уравнение электромагнитной волны

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2},$$

где $\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ — оператор Лапласа.

Уравнения плоской электромагнитной волны

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

где E_0 и H_0 - соответственно амплитуды напряженности электрического и магнитного полей волны; $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ - круговая частота; $k = \omega/v = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; φ — начальная фаза колебаний в точке с координатой $x = 0$, T — период колебаний, ν - частота, λ — длина волны, t — текущее время.

Объемная плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$$

Вектор плотности потока электромагнитной энергии - вектор Умова - Пойнтинга

$$\vec{S} = [\vec{E} \cdot \vec{H}].$$

Примеры решения задач

1. Электромагнитная волна с частотой $\nu = 5 \text{ МГц}$ переходит из немагнитной среды с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$ в вакуум. Определить изменение ее длины волны.

Дано	Решение
$\nu = 5 \text{ МГц} = 5 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ $\varepsilon = 2, \mu = 1$ $\Delta\lambda = ?$	$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}, \quad \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{c}{\nu\sqrt{\varepsilon\mu}},$ $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda = \frac{c}{\nu} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right).$

Ответ: $\Delta\lambda = 17,6 \text{ м}$

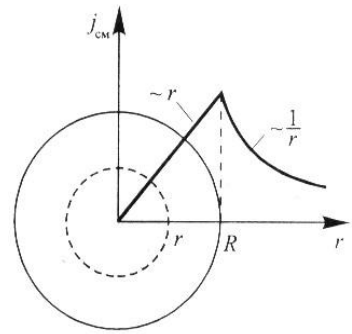
2. Определить длину электромагнитной волны в вакууме, на которую настроен колебательный контур, если максимальный заряд на пластинах конденсатора $Q_m = 50 \text{ нКл}$, а максимальная сила тока в контуре $I_m = 1,5 \text{ А}$. Активным сопротивлением контура пренебречь.

Дано	Решение
$Q_m = 50 \text{ нКл} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ $I_m = 1,5 \text{ А}$ $\lambda = ?$	$Q = Q_m \cos \omega t, \quad I = \frac{dQ}{dt} = -\omega Q_m \sin \omega t,$ $I_m = \omega Q_m, \quad \omega = 2\pi\nu,$ $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi Q_m c}{I_m}.$

Ответ: $\lambda = 62,8 \text{ м}$.

3. Ток, проходящий по обмотке длинного прямого соленоида радиусом R , изменяют так, что магнитное поле внутри соленоида растет со временем по закону $B = At^2$, где A некоторая постоянная. Определите плотность тока смещения как функцию расстояния r от оси соленоида. Постройте график зависимости $j_{см}(r)$.

Дано	Решение
R $B = At^2$ $A = \text{const}$ $j_{см}(r) = ?$	$j_{см} = \frac{\partial D}{\partial t}, \quad \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS, \quad B = At^2, \quad \frac{\partial B}{\partial t} = 2At;$ <p>внутри соленоида $r < R$ $2\pi r E = \pi r^2 2At, \quad E = Atr, \quad j_{см} = -\varepsilon_0 Ar;$</p> <p>вне соленоида $r > R$ $2\pi r E = \pi R^2 2At, \quad E = \frac{R^2 At}{r}, \quad j_{см} = \frac{\varepsilon_0 AR^2}{r};$</p> <p>в точке $r = R$ $E = AtR, \quad j_{см} = \varepsilon_0 AR.$</p>



$$j_{cm} = -\varepsilon_0 A r \quad (r < R);$$

Ответ:
$$j_{cm} = \frac{\varepsilon_0 A R^2}{r} \quad (r > R); \quad j_{cm} = \varepsilon_0 A R \quad (r = R).$$

4. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны равна 10 В/м . Определить амплитуду напряженности магнитного поля волны.

Дано	Решение
$E_0 = 10 \text{ В/м}$	$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H,$
$\varepsilon = 1$	$E = E_0 \cos(\omega t - kx), \quad H = H_0 \cos(\omega t - kx).$
$\mu = 1$	При $\varepsilon = 1$ и $\mu = 1 \quad \sqrt{\varepsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu_0} H_0, \quad H_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0$
$H_0 = ?$	

Ответ: $H_0 = 26,5 \text{ мА/м}$.

5. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны составляет 50 мВ/м . Определить интенсивность волны I .

Дано	Решение
$E_0 = 50 \text{ мВ/м} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$	$I = \langle S \rangle,$
$\varepsilon = 1$	$S = EH = E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kx),$
$\mu = 1$	$\langle \cos^2(\omega t - kx) \rangle = \frac{1}{2}, \quad \langle S \rangle = \frac{1}{2} E_0 H_0,$
$I = ?$	$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu \mu_0} H_0, \quad H_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0, \quad I = \langle S \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$

Ответ: $I = 3,32 \text{ мкВт/м}^2$.

Задачи для самостоятельного решения

Ток смещения

1. В точке среды с $\varepsilon = 3$ напряженность электрического поля изменяется в соответствии с функцией $E(t) = i \cdot E_m \cos(100 \pi t)$; $E_m = 100 \text{ В/м}$. Определите в этой точке плотность тока смещения.
2. Определите частоту ν электромагнитной волны, при которой амплитуды тока смещения и тока проводимости равны. Волна распространяется в среде с параметрами: а) $\varepsilon = 80$; $\gamma = 4 \text{ См/м}$ (морская вода); б) $\varepsilon = 6$; $\gamma = 10^{-13} \text{ См/м}$.
3. К плоскому вакуумному конденсатору, расстояние между пластинами которого $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, приложено гармоническое напряжение с частотой $4 \cdot 10^2 \text{ Гц}$ и амплитудой $U_m = 50 \text{ В}$. Определите максимальную плотность тока смещения в конденсаторе и укажите для произвольной точки в нем направления векторов \vec{E}, \vec{H} и $\vec{j}_{см}$.
4. Определите плотность тока смещения в диэлектрике с $\varepsilon = 6$ в случае, когда диэлектрик перемещается со скоростью $v = 10 \text{ м/с}$ в неоднородном электростатическом поле на расстояние $\Delta x = 10^{-2} \text{ м}$ из области с напряженностью $E_1 = 10^5 \text{ В/м}$ в область с $E_2 = 4 \cdot 10^4 \text{ В/м}$.
5. Определите диэлектрическую проницаемость длинного цилиндрического стержня из диэлектрика радиусом $r = 10^{-2} \text{ м}$, если он пронизывается в осевом направлении однородным электрическим полем, напряженность которого монотонно изменяется на $\Delta E = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ за время $\Delta t = 10^{-7} \text{ с}$, и на расстоянии $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ от оси стержня возникает магнитное поле напряженностью $H = 0,8 \text{ А/м}$.

Электромагнитные волны.

Перенос энергии электромагнитным полем.

6. Вычислите амплитуду напряженности электрического поля электромагнитной волны, распространяющейся в среде ($\varepsilon = 2$; $\mu = 1$), в точке с амплитудой напряженности магнитного поля равной 200 А/м .

7. Источником электромагнитных волн в радиодиапазоне являются токи проводимости или токи смещения в излучателе. Что является источником электромагнитных волн в световом диапазоне?
8. Определите среднее значение объемной плотности энергии в падающей электромагнитной волне с амплитудой напряженности электрического поля E_m на площадку, полностью поглощающую излучение. Волна падает по нормали к площадке.
9. На пути плоской электромагнитной волны мысленно выделим плоскую площадку Δs , ориентированную под углом α к направлению распространения волны. Определите средний по времени поток энергии через эту площадку, если средняя по времени объемная плотность энергии волны равна $\langle w \rangle$.
10. В современных лазерных установках достигается напряженность электрического поля $E_m = 1 \text{ ГВ/м}$. Оцените объемную плотность энергии в такой электромагнитной волне и интенсивность лазерного излучения.
11. Определите энергию W , переносимую электромагнитной волной за время Δt через единичную воображаемую площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.
12. Плоская гармоническая электромагнитная волна падает по нормали на абсолютно поглощающую площадку площадью $0,70 \text{ м}^2$. Вычислите амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в волне, если во внутреннюю энергию площадки в единицу времени превращается $0,42 \text{ Дж/с}$.
13. Плоская монохроматическая электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме с амплитудным значением напряженности электрического поля $2 \cdot 10^{-4} \text{ В/м}$, падает на площадку площадью $0,4 \text{ м}^2$. Угол падения 60° . Вычислите модуль вектора Пойнтинга для этой волны и поток мощности через площадку.
14. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна и падает по нормали на поверхность тела, полностью ее поглощающего. Амплитуда напряженности магнитного поля волны равна $0,15 \text{ А/м}$. Определить давление, оказываемое волной на тело. Воспользуйтесь результатом теоремы Максвелла о том, что если тело полностью поглощает падающую на него энергию, то давление численно равно среднему значению объемной плотности энергии в падающей электромагнитной волне.
15. Плоская монохроматическая электромагнитная волна распространяется в вакууме вдоль оси x . Амплитуда напряженности электрического поля волны $E_0 = 5 \text{ мВ/м}$, амплитуда напряженности магнитного поля волны $H_0 = 1 \text{ мА/м}$. Определите энергию, перенесенную

волной за время $t=10 \text{ мин}$ через площадку, расположенную перпендикулярно оси x , площадью поверхности $S=15 \text{ см}^2$. Период волны $T \ll t$.

16. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны $0,1 \text{ А/м}$. Определите амплитуду напряженности электрического поля волны и среднюю по времени плотность энергии волны.

17. В однородной и изотропной среде с $\epsilon=2$ и $\mu=2$ распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны 50 В/м . Найти амплитуду напряженности магнитного поля и фазовую скорость волны.

18. Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с $\mu=1$, имеет вид $E=10 \cdot \sin(2\pi 10^8 t - 4,19x)$. Определить диэлектрическую проницаемость среды и длину волны.

19. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны 100 В/м . Какую энергию переносит эта волна через площадку 50 см^2 , расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, за время $t=1 \text{ мин}$. Период волны $T \ll t$.

20. В среде ($\epsilon=3$, $\mu=3$) распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны $0,5 \text{ А/м}$. На ее пути перпендикулярно направлению распространения расположена поглощающая поверхность, имеющая форму круга радиусом $0,1 \text{ м}$. Чему равна энергия, поглощенная этой поверхностью за время $t=30 \text{ с}$? Период волны $T \ll t$.

21. В однородной и изотропной среде с $\epsilon=3$ и $\mu=3$ распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля $E_m=10 \text{ В/м}$. Найти: а) амплитуду напряженности магнитного поля волны H_m ; б) фазовую скорость волны.

22. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны $H_m=0,05 \text{ А/м}$. Определить а) амплитуду напряженности электрического поля волны E_m ; б) среднюю по времени плотность энергии волны $\langle w \rangle$

23. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны составляет 50 мВ/м . Определите интенсивность волны I .

24. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны составляет 5 мА/м . Определите интенсивность волны I .

25. Скорость распространения электромагнитной волны в веществе на 63% меньше, чем в вакууме. Определите диэлектрическую восприимчивость вещества.
26. Электромагнитная волна с частотой $\nu=5,0$ МГц переходит из немагнитной среды с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=2$ в вакуум. Определите изменение ее длины волны.
27. Плоская монохроматическая электромагнитная волна падает по нормали на абсолютно поглощающую площадку площадью $0,70$ м². Вычислите амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в волне, если на площадке в единицу времени превращается во внутреннюю энергию $0,42$ Дж/с.
28. Плоская монохроматическая электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме с амплитудой напряженности электрического поля $2 \cdot 10^{-4}$ В/м, падает на площадку площадью $0,4$ м². Угол падения 60° . Вычислить модуль вектора Пойнтинга этой волны и поток мощности через площадку.
29. Для некоторой длины волны показатель преломления прозрачной плоскопараллельной пластины изменяется от значения $n_1=1,40$ на одной поверхности до $n_2=1,60$ на другой. Толщина пластинки $d=10,0$ мм. а) Какое время t затрачивает свет на прохождение пластины в перпендикулярном к ней направлении? б) С какой средней скоростью $\langle v \rangle$ распространяется свет в пластинке (выразить ее через скорость света в вакууме)?
30. В некоторой среде ($\epsilon=2,0$ и $\mu=1,0$) распространяется электромагнитная волна частоты ω . Найти вектор Пойнтинга \vec{S} в той точке, в которой электрический вектор изменяется по закону $E=10 \cdot \cos(\omega t + \alpha)$ В/м. Вектор \vec{E} направлен вдоль оси z , а вектор \vec{H} – вдоль оси x .

2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Основные формулы

Фазовая скорость света в среде

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

где c - скорость распространения света в вакууме; n - абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути

$$L = ns,$$

где s — геометрическая длина пути световой волны в среде; n — показатель преломления этой среды.

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1,$$

где L_1 и L_2 - соответственно оптические длины путей, пройденных волнами.

Временная когерентность некогерентных волн — когерентность колебаний, совершающихся в одной и той же точке пространства, но в разные моменты времени.

Время когерентности некогерентной волны

$$t_{\text{коз}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda},$$

где $\Delta\omega$ - ширина спектра циклических частот, λ -длина световой волны, $\Delta\lambda$ - ширина спектра длин волн в источнике света.

Длина когерентности (длина гармонического цуга, соответствующего рассматриваемой некогерентной волне)

$$l_{\text{коз}} = ct_{\text{коз}} = \frac{\pi c}{\Delta\omega} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}.$$

Пространственная когерентность некогерентных волн - когерентность колебаний, совершающихся в один и тот же момент времени в различных точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Длина пространственной когерентности (радиус когерентности)

$$\rho_k = \frac{\lambda}{\varphi} = \frac{\lambda r}{D},$$

где $\varphi = \frac{D}{r}$ - угловой размер источника света, D - линейный размер источника света,

r - расстояние до источника, λ - длина волны источника света.

Размер пространственной когерентности S_k - площадь круга радиуса ρ_k

$$S_k = \pi \frac{\lambda^2}{\varphi^2} = \pi \frac{\lambda^2 r^2}{D^2}.$$

Объем когерентности V_k – объем цилиндра с основанием S_k и образующей, равной длине гармонического цуга (длине временной когерентности) l_k

$$V_k = S_k \cdot l_k = \frac{\pi \lambda^2}{\varphi^2} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} = \frac{\pi \lambda^2 r^2}{D^2} \frac{\pi c}{\Delta \omega} = \frac{\pi \lambda^4 r^2}{D^2 \Delta \lambda}.$$

Разность фаз двух когерентных волн

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где λ_0 — длина волны в вакууме; Δ — оптическая разность хода двух световых волн.

Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m \lambda_0,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$; λ_0 — длина волны в вакууме.

Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$; λ_0 — длина волны в вакууме.

Ширина интерференционной полосы

$$b = \frac{l}{d} \lambda_0,$$

где d — расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии l от экрана ($l \gg d$).

Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой плоскопараллельной пленки, находящейся в воздухе ($n_0 = 1$),

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0,$$

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2},$$

где d — толщина пленки; n — ее показатель преломления; i — угол падения; r — угол преломления; $m = 0, 1, 2, \dots$. Слагаемое $\pm \frac{\lambda_0}{2}$ обусловлено возможной потерей полуволны при отражении света от границы с оптически более плотной средой.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{(2m+1)\frac{\lambda_0 R}{2n}},$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ — номер кольца; R — радиус кривизны линзы; λ_0 — длина волны в вакууме, n — показатель преломления среды между линзой и стеклянной пластинкой.

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)

$$r_m^* = \sqrt{\frac{m\lambda_0 R}{n}},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ — номер кольца; R — радиус кривизны линзы; λ_0 — длина волны в вакууме, n — показатель преломления среды между линзой и стеклянной пластинкой.

Для «просветленной оптики» интерферирующие лучи гасят друг друга в отраженном свете при условии

$$n = \sqrt{n_c}, \quad nd = (2m+1)\frac{\lambda_0}{4},$$

где n_c — показатель преломления стекла; n — показатель преломления пленки; nd — оптическая толщина пленки; $m = 0, 1, 2, \dots$; λ_0 — длина волны в вакууме.

Примеры решения задач

1. В опыте Юнга расстояние l от щелей до экрана равно 3 м (рис. 1). Определить угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на расстоянии $4,5\text{ мм}$.

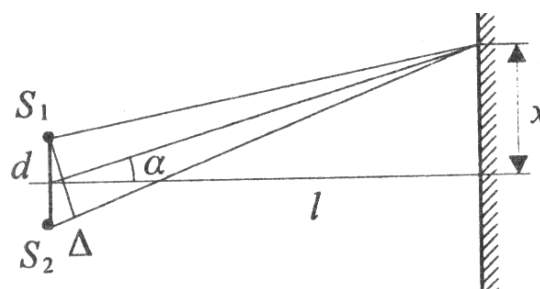


Рис 1

Дано	Решение
$l=3\text{ м}$	$\Delta_{\max} = \pm m\lambda, \quad \Delta_{\max} = \frac{xd}{l}, \quad m\lambda = \frac{xd}{l} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$ $\alpha \approx \text{tg } \alpha = \frac{x}{l} = \frac{m\lambda}{d},$ $\Delta\alpha = \frac{m\lambda}{d} - \frac{(m-1)\lambda}{d} = \frac{\lambda}{d} = \frac{x}{ml}$
$m=3$	
$x=4,5\text{ мм}$	
$=4,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$	
$\Delta\alpha=?$	

Ответ: $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-4}\text{ рад}$.

2. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ($n = 1,5$), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны $\lambda = 0,5\text{ мкм}$. Определить толщину пластинки.

Дано	Решение
$n=1,5$	$\Delta = n \cdot d - d = d(n - 1)$ $\Delta = m\lambda, \quad m\lambda = d(n - 1),$ $d = \frac{m\lambda}{n - 1}$
$m=5$	
$\lambda=0,5\text{ мкм}$	
$=5 \cdot 10^{-7}\text{ м}$	
$d=?$	

Ответ: $d = 5\text{ мкм}$.

3. На плоскопараллельную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ под углом $i = 45^\circ$ падает параллельный пучок белого света (рис. 2). Определить, при какой наименьшей толщине пленки зеркально отраженный свет наиболее сильно окрасится в желтый свет ($\lambda = 0,6\text{ мкм}$).

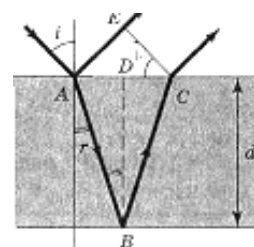


рис 2

Дано	Решение
$n=1.33$ $i=45^{\circ}$ $\lambda=0.6 \text{ мкм}$ $=6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $d=?$	$\Delta_{\max} = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad \Delta = (AB + BC)n - (AE - \lambda), \quad AB = BC = \frac{d}{\cos r},$ $AE = 2d \cdot \operatorname{tgr} \cdot \sin i, \quad \Delta = \frac{2d \cdot n}{\cos r} - 2d \cdot \operatorname{tgr} \cdot \sin i + \frac{\lambda}{2}, \quad \frac{\sin i}{\sin r} = n, \quad \operatorname{tgr} = \frac{\sin r}{\cos r},$ $\frac{2d}{\cos r} \left(n - \sin^2 r \frac{\sin i}{\sin r} \right) = \frac{\lambda}{2}, \quad \frac{2d \cdot n}{\cos r} (1 - \sin^2 r) = \frac{\lambda}{2},$ $2d \cdot n \cdot \cos r = \frac{\lambda}{2}, \quad d = \frac{\lambda}{4n \cdot \cos r}, \quad \cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r} = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2 i},$ $d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$

Ответ: $d = 133 \text{ нм}$.

4. На стеклянный клин ($n = 1,5$) с преломляющим углом $\alpha = 40''$ нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 600 \text{ нм}$ (рис. 3). Определить в интерференционной картине расстояние между двумя соседними минимумами.

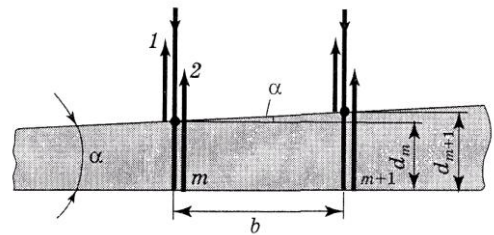


рис 3

Дано	Решение
$n=1.5$ $\alpha=40''=1,94 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ $\lambda=600 \text{ нм}$ $=6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $b=?$	$\Delta_{\min} = 2d \cos r + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$ $r = 0, \quad 2dn = m\lambda,$ $d = \frac{m\lambda}{2n}, \quad \sin \alpha = \frac{d_{m+1} - d_m}{b}, \quad \sin \alpha \approx \alpha, \quad \alpha = \frac{(m+1)\lambda - m\lambda}{2bn} = \frac{\lambda}{2bn}$ $b = \frac{\lambda}{2\alpha \cdot n} \quad (\alpha - \text{в радианах})$

Ответ: $b = 1,03 \text{ мм}$.

5. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, падающим нормально (рис. 4). Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью, наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы $R = 4 \text{ м}$. Определить показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца $r = 1,8 \text{ мм}$.

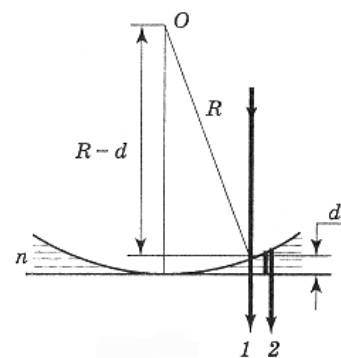


Рис 4

Дано	Решение
$m=2$ $R=4 \text{ м}$ $\lambda=6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $r=1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $n=?$	$r = \sqrt{R^2 - (R - d)^2} \approx \sqrt{2Rd}, \quad d = \frac{r^2}{2R}, \quad \Delta = 2dn, \quad n = \frac{\Delta}{2d},$ <p>усл. max : $\Delta = m\lambda$,</p> $2dn = m\lambda, \quad n = \frac{m\lambda}{2d}, \quad n = \frac{m\lambda \cdot 2R}{2r^2} = \frac{m\lambda R}{r^2}.$

Ответ: $n = 1,48$.

6. Для уменьшения потерь света из-за отражения от поверхности стекла осуществляют «просветление оптики»: на свободную поверхность линз наносят тонкую пленку с показателем преломления $n = \sqrt{n_c}$.

В этом случае амплитуды отраженных лучей 1', 2' (рис. 5) от обеих поверхностей такой пленки одинаковы. Определить толщину d слоя, при которой отражение для света с длиной волны λ от стекла в направлении нормали минимально.

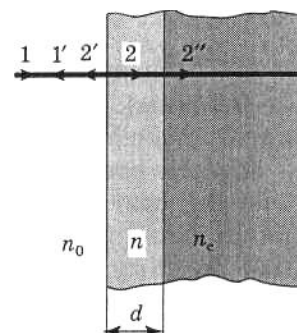


Рис 5

Дано	Решение
$n = \sqrt{n_c}$ λ $d=?$	$\Delta = 2dn, \quad \text{усл. min : } \Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad 2dn = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$ $d = \frac{(2m + 1)\lambda}{4n} = \frac{(2m + 1)\lambda}{4\sqrt{n_c}}.$

Ответ: $d = \frac{(2m + 1)\lambda}{4\sqrt{n_c}} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$.

7. На рис. 6 показана схема интерференционного рефрактометра, применяемого для измерения показателя преломления прозрачных веществ. S — узкая щель, освещаемая монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 589 \text{ нм}$; 1 и 2 — кюветы длиной $l = 10 \text{ см}$, которые заполнены воздухом ($n_0 = 1,000277$). При замене воздуха на аммиак в одной из кювет интерференционная картина сместилась на 17 полос. Определить показатель преломления аммиака.

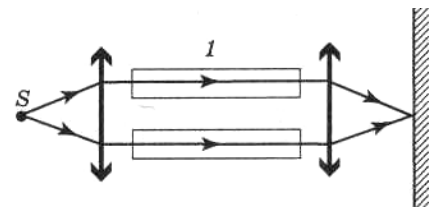


Рис 6

Дано	Решение
$n_0 = 1,000277$	$\Delta = l \cdot n - l \cdot n_0 = l(n - n_0), \quad \Delta = m\lambda,$
$\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$l(n - n_0) = m\lambda, \quad n = \frac{\lambda m}{l} + n_0$
$m = 17$	
$l = 0,1 \text{ м}$	
$n = ?$	

Ответ: $n = 1,000377$.

Задачи для самостоятельного решения.

Временная и пространственная когерентности.

1. Оцените длину когерентности видимого света $L_{\text{ког}}$, ширину спектра волнового пакета $\Delta\omega$ и соответствующий интервал длин волн $\Delta\lambda$, если время жизни атома в возбужденном состоянии $\tau = 10^{-8}$ с.
2. Определите время и длину когерентности излучателя для двух случаев: а) спонтанного излучения спектральной линии аргона 545 нм (ширина линии от разрядной трубки $\Delta\lambda = 1,00 \cdot 10^{-13}$ м); б) генерации аргоновым лазером линии 545 нм (ширина линии от лазера $\Delta\lambda = 1,00 \cdot 10^{-17}$ м)
3. Определите время и длину когерентности излучения газового лазера, работающего на углекислом газе (длина волны генерации 10,5 мкм), если ширина линии газового лазера $\Delta\lambda = 1,00 \cdot 10^{-17}$ м.
4. Спектры излучения газовых лазеров (например, гелий-неонового) в многомодовом режиме представляют собой совокупность близко расположенных линий с общей шириной $\Delta\nu_0 \approx 10^9$ Гц. При определенных условиях лазер может работать на длине волны, отвечающей одной из мод (одной из компонент спектра), имеющей типичную ширину $\Delta\nu_1 \approx 10^7$ Гц. Оцените время и длину когерентности излучения лазера в первом и во втором режимах.
5. Почему в радиодиапазоне можно добиться большей пространственной и временной когерентности излучения, чем в световом диапазоне?
6. С некогерентной волной связывают такие понятия, как а) время когерентности $\tau_{\text{ког}}$; б) длина когерентности $L_{\text{ког}}$; в) радиус когерентности $\rho_{\text{ког}}$; г) объем когерентности $V_{\text{ког}}$. Разъясните содержание этих понятий и попытайтесь представить соответствующие формулы.
7. Угловой размер Солнца для земного наблюдателя составляет около 0,01 рад, длина световой волны равна примерно 0,5 мкм. Оцените радиус когерентности приходящих от Солнца световых волн.
8. Источник света диаметром $D = 30,0$ см находится от места наблюдения на расстоянии $l = 200$ м. В излучении источника содержатся компоненты с длинами волн от 490 до 510 нм. Оцените для этого излучения время, длину, радиус и объем когерентности.
9. Определите время и длину когерентности следующих электромагнитных волн:
а) $E(t, x) = E_m \cos(\omega_0 t - kx)$;
б) $E(t, x) = E_m \cos(\omega_0 t - kx)$ при $|t| \leq \tau/2$,

$E(t, x) = 0$ при $|t| \geq \tau / 2$.

10. Имеется источник видимого света – нить диаметром $d_1 = 1,0$ мм. На каком расстоянии l_1 от преграды с двумя узкими щелями, расстояние между которыми $d = 0,50$ мм, следует поместить источник (параллельно щелям), чтобы вторичные волны от щелей были когерентными?

Интерференция когерентных волн

11. Чему равна разность фаз колебаний двух точек, если они удалены друг от друга на расстояние 3 м и лежат на прямой, перпендикулярной фронту волны? Скорость распространения волны 600 м/с, а период колебаний 0,02 с.

12. Разность хода двух интерферирующих лучей монохроматического света равна 3λ . Определить разность фаз колебаний. Что будет наблюдаться в точке, где эти лучи накладываются друг на друга?

13. Два точечных когерентных источника света находятся в жидкости с $n = 1,36$ на расстоянии 1,00 см друг от друга. Определите оптическую разность хода для точки, лежащей на расстоянии 20,0 см от одного из источников по направлению нормали к прямой, соединяющей источники.

14. Два когерентных источника, находящихся в воздухе на расстоянии 20 мм, испускают световые волны в одинаковой фазе с частотой $5,0 \cdot 10^{14}$ Гц. Чему равняется разность фаз колебаний, приходящих в точку, удаленную на 50 см от одного из источников в направлении нормали к прямой, соединяющей источники?

Опыт Юнга

15. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга $d = 0,5$ ($\lambda = 0,6$ мкм). Определите расстояние l от щелей до экрана, если ширина b интерференционных полос равна 1,2 мм.

16. Когерентные источники белого света, расстояние между которыми 0,32 мм, имеют вид узких щелей. Экран, на котором наблюдают интерференцию света от этих источников, находится от них на расстоянии 3,2 м. Найти расстояние между красной ($\lambda_{кр} = 760$ нм) и фиолетовой ($\lambda_{ф} = 400$ нм) линиями второго интерференционного спектра на экране. Сделать чертеж и вывести расчетную формулу.

17. Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга 1 м. Определить расстояние между щелями, если на 1 см экрана укладывается 10 темных интерферирующих полос. Длина волны 0,7 мм. Сделать чертеж и вывести расчетную формулу.

18. С помощью бипризмы Френеля получают два когерентных мнимых точечных источника света, отстающих друг от друга на 1 мм , Найти расстояние от источников до экрана, если 5-й наблюдаемый максимум расположен на расстоянии 5 мм от центра экрана. Длина волны $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}\text{ м}$.
19. Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1 м . Определить расстояние между щелями, если на отрезке длиной 1 см укладывается 10 темных интерференционных полос. Длина волны монохроматического света равна $0,7\text{ мкм}$.
20. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света равно $0,5\text{ мм}$, расстояние до экрана 5 м . В зеленом свете интерференционные полосы на экране получились на расстоянии 5 мм друг от друга. Найти длину волны зеленого света.
21. В опыте Юнга расстояние между щелями равно $0,8\text{ мм}$, длина волны света $0,7\text{ мкм}$. На каком расстоянии от щелей следует расположить экран, чтобы ширина интерференционной полосы оказалась равной 2 мм ?
22. Расстояние между двумя когерентными источниками света равно $0,2\text{ мм}$. Они удалены от экрана на расстояние 2 м . Найти длину волны, излучаемую когерентными источниками, если расстояние на экране между третьим и пятым минимумами интерференционной картины равно $1,2\text{ см}$.
23. Определите расстояние между соседними интерференционными полосами на экране, если два когерентных источника света в виде узких щелей находятся на расстоянии $3,0\text{ м}$ от экрана. Расстояние между щелями $1,8\text{ мм}$. Длина волны равна $6,0 \cdot 10^2\text{ нм}$.
24. Свет от лазера с длиной волны $0,63\text{ мкм}$ падает по нормали на непрозрачную поверхность, имеющую две узкие параллельные щели, расстояние между которыми $0,50\text{ мм}$. Определите ширину Δx интерференционных полос на экране, находящемся в вакууме на расстоянии $1,0\text{ м}$ от плоскости щелей.
25. Пучок лазерного излучения с $\lambda = 633\text{ нм}$ падает по нормали на преграду с двумя узкими щелями и расстоянием между ними $d = 5,00\text{ мм}$. На экране, установленном за преградой (как в опыте Юнга), наблюдается система интерференционных полос. В какую сторону и на какое число полос сместится интерференционная картина, если одну из щелей перекрыть прозрачной пластиной толщиной $a = 10,0\text{ мкм}$ из материала с показателем преломления $n = 1,63$?
26. Определите расстояние между мнимыми когерентными источниками в опыте с зеркалами Френеля, если на экране на протяжении $10,8\text{ мм}$ наблюдаются шесть

интерференционных полос. Расстояние от источников до экрана 3,00 м. Длина волны монохроматического света 600 нм.

Полосы равного наклона.

Тонкие пленки

27. В состав минерала (лабрадорита) входит анортит с показателем преломления 1,59 и альбит с показателем преломления 1,53. Альбит и анортит в лабрадорите образуют тонкие чередующиеся слои, что приводит к интерференционному усилению отражения для некоторых цветовых оттенков света (явление называется иризацией). Оценить минимальную толщину слоев, которые могут вызвать иризацию, если она наблюдается под прямым углом к поверхности образца. Цвет иризации образца фиолетовый. ($\lambda = 450$ нм).

28. Пучок параллельных лучей ($\lambda = 0,6$ мкм) падает под углом 30° на мыльную пленку ($n = 1,33$). При какой минимальной толщине пленки отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией? Максимально усилены?

29. На прозрачную пленку ($n = 1,3$) нормально падает свет $\lambda = 600$ нм. При какой минимальной толщине пленки отраженные лучи максимально усиливают друг друга? Каков будет ответ задачи, если пленка лежит на поверхности воды?

30. Поверхность предмета покрывает тонкая прозрачная пленка ($n = 1,2$) таким образом, что в отраженном свете, падающем нормально, предмет окрашен в фиолетовый цвет ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м). Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления вещества предмета больше показателя преломления пленки.

31. Для устранения отражения света на поверхность стеклянной линзы нанесена пленка вещества с показателем преломления $n = 1,2$. При какой наименьшей толщине этой пленки отражение света с длиной волны 0,6 мкм не будет наблюдаться, если свет падает нормально? Показатель преломления стекла 1,5.

32. На мыльную пленку (показатель преломления равен 1,33) падает монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм (желтый свет) под углом 45° . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет? При какой наименьшей толщине пленки она будет казаться темной? Что будет с окраской пленки, если менять угол падения?

33. В воздухе, находится тонкая планка из вещества с показателем преломления равным 1,4. Толщина пленки 0,25 мкм. На пленку падает нормально монохроматический свет, при этом отраженные лучи максимально ослаблены в результате интерференции. Какова длина волны этого света?

34. На стеклянную пластинку нанесен слой прозрачного вещества с показателем преломления 1,3. Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны 640 нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину должен иметь слой, чтобы отраженные лучи были максимально ослаблены в результате интерференции?

35. Входное окно фотоприемника покрыто тонкой пленкой, материал которой имеет показатель преломления 1,25. Толщина пленки равна 0,10 мкм. На какой наибольшей длине волны достигается максимальное просветление входного окна фотоприемника?

36. Мыльная пленка освещается излучением водородной трубки следующего спектрального состава: $\lambda_1 = 379$ нм; $\lambda_2 = 410$ нм; $\lambda_3 = 434$ нм; $\lambda_4 = 486$ нм и $\lambda_5 = 656$ нм. Наблюдение ведется в отраженном свете. Какие световые волны будут максимально усилены и какие максимально ослаблены в результате интерференции при толщине пленки 0,615 мкм? Свет падает из воздуха перпендикулярно поверхности пленки. Показатель преломления мыльной жидкости 1,33.

Полосы равной толщины

Кольца Ньютона

37. Тонкая проволока лежит между двумя стеклянными плоскопараллельными пластинами параллельно линии соприкосновения пластин, так что между пластинами образуется тонкий воздушный клин. В отраженном свете наблюдается интерференционная картина с расстоянием между соседними полосами 1,5 мм. Проволочка имеет диаметр 0,010 мм и расположена на расстоянии 7,5 см от линии соприкосновения пластин. Определите длину волны падающего света.

38. Определите преломляющий угол стеклянного клина, если на него по нормали падает монохроматический свет с длиной волны 0,520 мкм и если число интерференционных полос, приходящихся на один сантиметр, равно 8. Показатель преломления стекла для данной длины волны 1,49.

39. Тонкий кварцевый клин освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности, и рассматривается в отраженном свете. Если применить излучение паров натрия ($\lambda = 0,589$ мкм), то 20 темных полос укладываются на расстоянии 2,87 мм. Если же освещать клин излучением водородной трубки с красным фильтром ($\lambda = 0,656$ мкм), то 20 темных полос располагаются на отрезке 3,28 мм. Определите показатель преломления кварца для красных лучей, если для желтых он равен 1,544.

40. На стеклянный клин ($n=1,5$) падает нормально пучок света с длиной волны 589 нм. Угол клина равен $20''$. Какое число интерференционных полос приходится на 5 см длины клина?
41. На стеклянный клин ($n = 1,5$) нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 698$ нм). Определите угол между поверхностями клина, если расстояние b между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 2 мм.
42. При освещении линзы с радиусом кривизны 1 м, лежащей на плоской пластинке, светом с длиной волны 600 нм наблюдались в проходящем свете кольца Ньютона. Когда пространство между пластинкой и линзой заполнили жидкостью, радиус пятого светлого кольца уменьшился на $0,23$ мм. Найти показатель преломления жидкости.
43. Спектр натрия состоит из двух линий с длинами волн $589,0$ нм и $589,6$ нм. Какое по счету темное кольцо Ньютона, соответствующее одной из этих линий, совпадает со следующим по счету темным кольцом, соответствующим другой линии? Наблюдение проводится в отраженном свете.
44. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом (длина волны $\lambda=0,5$ мкм), падающим нормально. Найти расстояние между пятым и двадцатым светлыми кольцами Ньютона в проходящем свете, если радиус кривизны линзы 10 м.
45. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете равен $0,4$ мм. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается монохроматическим светом с длиной волны $0,5$ мкм.
46. Интерференционная картина наблюдается в отраженном свете с помощью плосковыпуклой линзы, лежащей на стеклянной пластинке. Фокусное расстояние линзы равно $76,0$ см. Радиус пятого темного кольца Ньютона равен $0,900$ мм. Определите длину световой волны, если показатель преломления стекла линзы равен $1,50$.
47. Определите радиус кривизны линзы, применяемой для наблюдения колец Ньютона, если расстояние между вторым и третьим светлыми кольцами равно $0,500$ мм. Освещение производится монохроматическим светом с длиной волны $\lambda_0 = 550$ нм. Наблюдение ведется в отраженном свете.
48. Плоская пластина и плосковыпуклая линза применяются для наблюдения колец Ньютона. Определите толщину воздушного промежутка между линзой и пластинкой в том месте, где наблюдается пятое темное кольцо. Картина колец наблюдается в отраженном свете. Длина световой волны равна 656 нм.

49. Во сколько раз изменится радиус колец Ньютона, если пространство между плосковыпуклой линзой и плоскопараллельной пластинкой заполнить сероуглеродом с показателем преломления $1,60$?

50. Оптическая сила плосковыпуклой линзы равна $0,5$ дптр. Линза ($n = 1,50$) выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определите радиус седьмого темного кольца Ньютона в проходящем свете (при $\lambda_0 = 500$ нм).

51. Линза из кронгласа ($n = 1,51$) лежит на плоскопараллельной пластинке из флинтгласа ($n = 1,80$). Пространство между ними заполнено бензолом ($n = 1,60$). При наблюдении в отраженном монохроматическом свете ($\lambda_0 = 590$ нм) радиус шестого светлого кольца оказался равным $5,00$ мм. Определите радиус кривизны линзы.

Интерферометры

52. На пути лучей интерференционного рефрактометра помещаются трубки длиной $l = 2$ см с плоскопараллельными стеклянными основаниями, наполненные воздухом ($n_0 = 1,000277$). Одну трубку заполнили хлором, при этом интерференционная картина сместилась на $m = 20$ полос. Определите показатель преломления хлора, если наблюдение производится в монохроматическом свете с длиной волны $\lambda = 589$ нм.

53. В шахтном интерферометре длина камер 110 мм. С помощью поворотного устройства каждый из интерферирующих лучей проходит камеры шесть раз. При заполнении камеры шахтным воздухом интерференционная картина сдвинулась на 18 полос. Найти показатель преломления шахтного воздуха, если показатель преломления чистого воздуха $n_g = 1,000292$. Длина волны света $5,9 \cdot 10^{-7}$ м. Сделать чертеж, показать ход интерферирующих лучей, объяснить возникновение оптической разности, хода.

54. В шахтном интерферометре длина камер $l = 65$ мм. При заполнении камеры шахтным (рудничным) воздухом центральная темная полоса сместилась на две интерференционные полосы. Определить показатель преломления шахтного воздуха, если показатель преломления чистого воздуха $n_g = 1,000292$. Длина волны света $5,9 \cdot 10^{-7}$ м. Сделать чертеж, показать ход интерферирующих лучей, объяснить возникновение оптической разности хода.

55. Для измерения показателя преломления аммиака в одно плечо интерферометра Майкельсона поместили трубку длиной $l = 14$ см, из которой выкачан воздух. Концы трубки закрыты плоскопараллельными стеклами. При заполнении трубки аммиаком интерференционная картина сместилась на 180 полос. Найти показатель преломления аммиака, если $\lambda = 0,59$ мкм.

56. В опыте с интерферометром Майкельсона для смещения интерференционной картины на 500 полос потребовалось переместить одно из зеркал на расстояния 0,161 мм. Найти длину волны падающего света.
57. В интерферометре Жамена на пути интерферирующих лучей помещены две одинаковые трубки с воздухом ($n_1=1,000252$), При замене одной из них такой же трубкой с хлором ($n_2=1,000773$), интерференционная картина сместилась на 190 полос. Длина трубки 20 см. Найти длину волны монохроматического источника.
58. На пути лучей в интерферометре Майкельсона поместили две одинаковые стеклянные цилиндрические трубки. После этого из одной трубки стали выкачивать воздух, наблюдая изменение интерференционной картины. Вычислите, на сколько полос сместится картина в поле зрения прибора, если давление в одной из трубок сделать вдвое меньше атмосферного, а в другой оставить равным атмосферному. Длина волны падающего света 588 нм. Длина трубок 20,0 см. Показатель преломления воздуха при нормальных условиях 1,00029. Изменение показателя преломления n в зависимости от плотности газа ρ определяется приближенным соотношением $(n - 1) / \rho = \text{const}$.
59. В интерферометре Жамена на пути интерферирующих волн помещены две одинаковые трубки длиной 5,00 см с плоскопараллельными торцевыми поверхностями. Одна трубка заполнена воздухом при нормальных условиях, из другой воздух выкачан. Чему равен показатель преломления воздуха, если при выкачивании воздуха из одной трубки интерференционная картина сместилась на 20 полос? В интерферометре используется монохроматический свет с $\lambda_0 = 730$ нм. На сколько полос сместится интерференционная картина, если трубки поместить на пути интерферирующих волн в интерферометре Майкельсона?
60. В интерферометре Жамена при заполнении пустой трубки длиной 5,00 см, расположенной на пути одного из интерферирующих лучей, кислородом ($n = 1,000272$) происходит смещение интерференционной картины. Какую толщину должна иметь компенсирующая стеклянная пластинка ($n = 1,50$) на пути второго луча, чтобы установилась первоначальная картина интерференции?

3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Основные формулы

Радиус внешней границы m -й зоны Френеля для сферической волны

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

где m — номер зоны Френеля; λ — длина волны; a и b — соответственно расстояния от диафрагмы с круглым отверстием до точечного источника и до экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

Для плоской волны

$$r_m = \sqrt{b m \lambda}.$$

Условия дифракционных максимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

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

и минимумов

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

где a — ширина щели; φ — угол дифракции; m — порядок спектра; λ — длина волны.

Постоянная (период) дифракционной решетки

$$d = a + b; \quad d = \frac{1}{N},$$

где a — ширина щели решетки; b — ширина непрозрачных участков между щелями; N — число щелей, приходящихся на единицу длины дифракционной решетки.

Условия главных максимумов и дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$$
$$d \cdot \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m' = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{кроме } 0, N, 2N, \dots),$$

где d — период дифракционной решетки; N — число штрихов решетки.

Формула Вульфа-Брэггов (условие дифракционных максимумов от пространственной дифракционной решетки)

$$2d \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

где d — расстояние между атомными плоскостями кристалла; θ - угол скольжения; λ - длина волны рентгеновского излучения.

Угловая дисперсия дифракционной решетки

$$D_{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos \varphi},$$

φ - угол дифракции; m - порядок спектра; d - период решетки.

Линейная дисперсия дифракционной решетки

$$D_l = \frac{\partial l}{\partial \lambda}.$$

Для малых углов дифракции

$$D_l \approx f \cdot D_{\varphi} \approx f \cdot \frac{m}{d},$$

где f – главное фокусное расстояние линзы, собирающей на экране дифрагирующие волны.

Разрешающая способность спектрального прибора

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda},$$

где $\Delta \lambda$ — минимальная разность длин волн двух соседних спектральных линий, при которой эти линии регистрируются отдельно.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R_{\text{диф.реш.}} = mN,$$

где m — порядок спектра; N — общее число штрихов решетки.

Разрешающая способность объектива (критерий Рэлея):

$$R = \frac{1}{\alpha} = \frac{D}{1,22\lambda},$$

где D - диаметр объектива; α - минимальный угол между параллельными пучками света, разрешаемый объективом; λ - длина световой волны.

Разрешающая способность микроскопа, определяется как минимальное расстояние d , различимое с помощью микроскопа:

$$d \geq \frac{0,61\lambda}{n \sin \phi},$$

где ϕ - половина угла между лучами, идущими от точки на поверхности рассматриваемого предмета к краям объектива; n - показатель преломления прозрачного вещества, заполняющего пространство между предметом и объективом.

Примеры решения задач

1. Точечный источник света ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$) расположен на расстоянии $a = 1 \text{ м}$ перед диафрагмой с круглым отверстием диаметра $d = 2 \text{ мм}$ (рис. 7). Определить расстояние b от диафрагмы до точки наблюдения, если отверстие открывает три зоны Френеля.

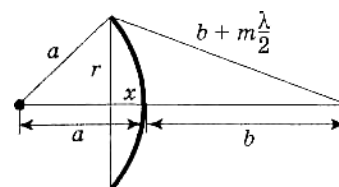


Рис 7

Дано	Решение
$a=1 \text{ м}$	$r^2 = a^2 - (a-x)^2, \quad \lambda \ll a, \quad \lambda \ll b, \quad r^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b+x)^2,$ <p>так как высота зоны Френеля $x = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}$, то $r^2 = \frac{ab}{a+b} m\lambda - \frac{b^2}{4(a+b)^2} (m\lambda)^2$</p> <p>Слагаемое $\frac{b^2}{4(a+b)^2} (m\lambda)^2$ пренебрежимо мало, $r^2 = \frac{ab}{a+b} m\lambda, \quad b = \frac{ar^2}{am\lambda - r^2},$</p> $r = \frac{d}{2}, \quad b = \frac{ad^2}{4am\lambda - d^2}$
$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	
$m=3$	
$d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
$b=?$	

Ответ: $b = 2 \text{ м}$

2. Определить радиус третьей зоны Френеля для случая плоской волны. Расстояние b от волновой поверхности до точки наблюдения M равно $1,5 \text{ м}$ (рис. 8). Длина волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$

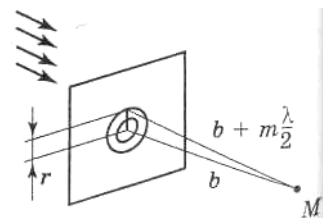


Рис 8

Дано	Решение
$b=1,5 \text{ м}$	$r^2 + b^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2, \quad r^2 = bm\lambda + \frac{(m\lambda)^2}{4}, \quad r \ll b, \quad r = \sqrt{bm\lambda}.$

$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	
$m = 3$	
$r = ?$	

Ответ: $r = 1,64 \text{ мм}$

3. Дифракция наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный диск диаметром 5 мм (рис. 9). Определить расстояние l , если диск закрывает только центральную зону Френеля

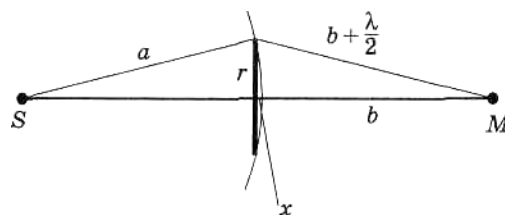


Рис 9

Дано	Решение
$d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$a^2 = (a-x)^2 + r^2, \quad a^2 = a^2 + r^2 - 2ax + x^2, \quad r^2 + (b+x)^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2,$ $b + bm\lambda + \frac{(m\lambda)^2}{4} = r^2 + b^2 + x^2 + 2bx, \quad x^2 \text{ и } \frac{(m\lambda)^2}{4} \text{ пренебрежимо малы}$ $x = \frac{r^2}{2a} = \frac{d^2}{4l}, \quad bm\lambda = 2bx + r^2, \quad bm\lambda = 2b \frac{r^2}{2a}, \quad bm\lambda = 2r^2 \quad \frac{l}{2m\lambda} = \frac{d^2}{2},$ $l = \frac{d^2}{m\lambda}$
$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	
$m = 1$	
$a = b = l/2$	
$l = ?$	

Ответ: $l = 50 \text{ м}$

4. На щель шириной $a = 0,1 \text{ мм}$ падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Дифракционная картина проецируется на экран, параллельный плоскости щели, с помощью линзы, расположенной вблизи щели (рис. 10). Определить расстояние от экрана до линзы, если расстояние l между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума, равно 1 см .

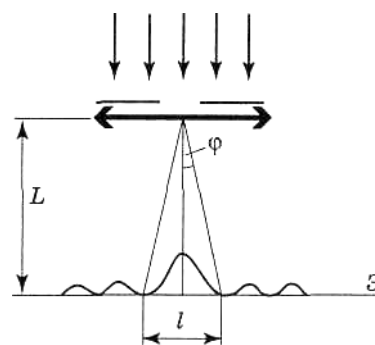


Рис 10

Дано	Решение
$a = 10^{-4} \text{ м}$	$a \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad l = 2L \cdot \text{tg } \varphi, \quad \frac{l}{2} \ll L, \quad \text{tg } \varphi \approx \sin \varphi,$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$m = 1$$

$$l = 10^{-2} \text{ м}$$

$$L = ?$$

Ответ: $L = 1 \text{ м}$

5. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$. На экран, находящийся от решетки на расстоянии $L = 1 \text{ м}$, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии $l = 12 \text{ см}$ от центрального (рис. 11). Определить: 1) период дифракционной решетки; 2) число штрихов на 1 см ее длины; 3) общее число максимумов, даваемых решеткой; 4) угол дифракции, соответствующий последнему максимуму.

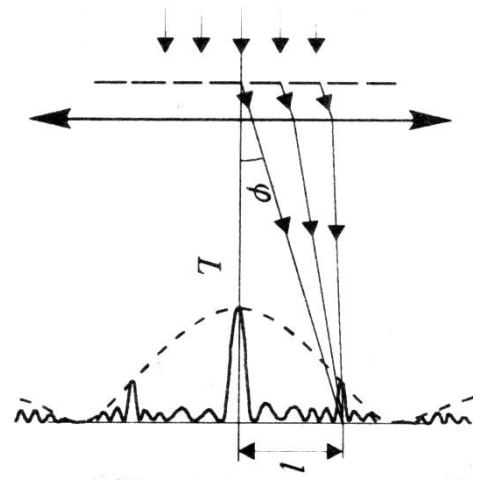


Рис 11

Дано

$$L = 1 \text{ м}$$

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$m = 1$$

$$l = 0.12 \text{ м}$$

$$l' = 0.01 \text{ м}$$

$$d = ? \quad n = ?$$

$$N = ? \quad \varphi_{\text{max}} = ?$$

Решение

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 1), \quad \text{tg } \varphi = \frac{l}{L}, \quad l \ll L, \quad \text{tg } \varphi \approx \sin \varphi, \quad \frac{ld}{L} = m \lambda, \quad d = \frac{Lm}{l}$$

$$n = \frac{l'}{d}, \quad d \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m_{\text{max}} \leq \frac{d}{\lambda} \quad (\sin \varphi_{\text{max}} = 1), \quad N = 2m_{\text{max}} + 1,$$

$$d \cdot \sin \varphi_{\text{max}} = \pm m_{\text{max}} \lambda,$$

$$\varphi_{\text{max}} = \arcsin \frac{m_{\text{max}} \lambda}{d}$$

Ответ: 1) $d = 4,58 \text{ мкм}$; 2) $n = 2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$; 3) $N = 17$; 4) $\varphi = 73,9^\circ$.

6. Дифракционная решетка длиной $l = 5$ мм может разрешить в первом порядке две спектральные линии натрия ($\lambda_1 = 589,0$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм). Определить, под каким углом в спектре третьего порядка будет наблюдаться свет с $\lambda_3 = 600$ нм, падающий на решетку нормально.

Дано	Решение
$l = 5$ мм	
$\lambda_1 = 5,890 \cdot 10^{-7}$ м	$d \cdot \sin \varphi = m_3 \lambda_3, \quad \sin \varphi = \frac{m_3 \lambda_3}{d}, \quad d = \frac{l}{N}, \quad R = m_1 N = \frac{\lambda_1}{\Delta \lambda}, \quad \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1,$
$\lambda_2 = 5,896 \cdot 10^{-7}$ м	$N = \frac{\lambda_1}{m \Delta \lambda}, \quad d = \frac{m \Delta \lambda}{\lambda_1}, \quad \sin \varphi = \frac{m_3 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_1}{m_1 \cdot l \cdot \Delta \lambda},$
$\lambda_3 = 6,0 \cdot 10^{-7}$ м	$\varphi = \arcsin \frac{m_3 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_1}{m_1 \cdot l \cdot \Delta \lambda}.$
$m = 3$	
$\varphi = ?$	

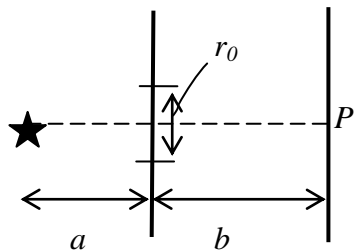
Ответ: $\varphi = 20^\circ 42'$

Задачи для самостоятельного решения.

Дифракция на щели. Дифракционная решетка.

1. Экран с круглым отверстием радиусом $1,5 \text{ мм}$ расположен на расстоянии $8,6 \text{ м}$ от точечного источника света, излучающего свет с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$. На каком расстоянии от отверстия расположена точка наблюдения, если из нее видна одна первая зона Френеля? На какое расстояние надо переместить точку наблюдения, чтобы в ней образовалось темное пятно?
2. Параллельный пучок света падает нормально на круглую диафрагму радиусом $1,4 \text{ мм}$, расположенную на расстоянии 4 м от точки наблюдения. Что возникнет в точке наблюдения – максимум или минимум интенсивности? Длина световой волны $0,5 \text{ мкм}$. До какого радиуса надо расширить диафрагму, чтобы в точке наблюдения возник минимум интенсивности? Куда при этом исчезает энергия световой волны?
3. Расстояние между точечным источником света и экраном составляет 12 м . Освещенность точки наблюдения, расположенной на экране на кратчайшем расстоянии до источника, равна E_0 . Посередине между экраном и источником поместили прозрачную ширму с круглым отверстием в центре. При этом освещенность в точке наблюдения возросла в 4 раза. Каков радиус отверстия, если опыт проводился с натриевой лампой, испускающей свет с длиной волны $589,3 \text{ нм}$?
4. Параллельный пучок света от монохроматического источника ($\lambda=0,5 \text{ мкм}$) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром 1 мм . Темным или светлым будет центр дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии $0,5 \text{ м}$ от диафрагмы?
5. Дифракция наблюдается на расстоянии 1 м от точечного источника монохроматического света ($\lambda=0,5 \text{ мкм}$). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный, круглый диск диаметром 5 мм . Определить расстояние 1 , если диск закрывает только центральную зону Френеля.
6. Щель шириной $0,5 \text{ мм}$ освещается красным светом от лазера с $\lambda=630 \text{ нм}$. На каком расстоянии от щели можно отчетливо наблюдать дифракционную картину?
7. Диафрагма диаметром 1 см освещается зеленым светом с длиной волны $\lambda=0,5 \text{ мкм}$. На каком расстоянии от диафрагмы будет справедливо приближение геометрической оптики?
8. Сферическая волна $\lambda=0,5 \text{ мкм}$ падает на щель шириной $b=0,2 \text{ мм}$. На каком расстоянии от щели наблюдатель увидит четкую дифракционную картину? Каков вид этой дифракции?

9. Точечный источник света с $\lambda=0,75$ мкм расположен на расстоянии a от непрозрачной преграды с отверстием радиуса r_0 . На расстоянии $b=1,0$ м от преграды расположен экран. Каким должен быть минимальный радиус отверстия r_0 , чтобы интенсивность света в точке P была равна интенсивности I_0 падающей волны?



10. На щель шириной $a=2$ мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света $\lambda=589$ нм. Под какими углами φ будут наблюдаться дифракционные минимумы света?
11. На щель шириной $a=20$ мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света $\lambda=500$ нм. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на расстояние $l=1$ м. (Шириной изображения щели на экране считать расстояние между двумя дифракционными минимумами первого порядка).
12. Указать порядки главных максимумов, которые не могут наблюдаться на дифракционной решетке с периодом $d=9,0$ мкм и шириной одной щели $b=3,0$ мкм.
13. Монохроматический свет падает нормально на щель ширины $b=11$ мкм. За щелью находится тонкая линза с фокусным расстоянием $f=150$ мм, в фокальной плоскости которой расположен экран. Найти длину волны света, если расстояние между симметрично расположенными минимумами третьего порядка на экране равно 50 мм.
14. Свет с длиной волны $\lambda=0,5$ мкм падает под углом 30° на щель ширины $b=10$ мкм. Найти угловое направление на три первых минимума, расположенных по обе стороны от центрального максимума.
15. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Его направление на четвертую темную дифракционную полосу составляет $2,2^\circ$. Определить, сколько длин волн укладывается на ширине щели.
16. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Натриевая линия $\lambda=589$ нм дает в спектре первого порядка угол дифракции $\varphi_1=17^08'$. Некоторая линия дает в спектре второго порядка дифракции $\varphi_2=24^012'$. Найти длину волны λ_2 и число штрихов N на единицу длины решетки.

17. Постоянная дифракционной решетки равна 5 мкм . Определите наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов в дифракционной картине и угол дифракции в спектре четвертого порядка при нормальном падении монохроматического света с длиной волны $0,625 \text{ мкм}$.
18. На дифракционную решетку с периодом 6 мкм падает нормально свет. Какие спектральные линии, соответствующие длинам волн видимого диапазона, будут совпадать в направлении $\varphi=30^\circ$?
19. Дифракционная решетка, имеющая $200 \text{ штрихов на } 1 \text{ мм}$, расположена на расстоянии 2 м от экрана. На решетку падает белый свет с максимальной длиной волны $\lambda=0,72 \text{ мкм}$ и минимальной длиной волны $\lambda=0,43 \text{ мкм}$. Найдите длину спектра первого порядка на экране.
20. Сколько штрихов на 1 мм имеет дифракционная решетка, для которой зеленая линия спектра ртути $\lambda=0,55 \text{ мкм}$ в спектре второго порядка наблюдается под углом $19,13^\circ$?
21. Определите длину волны монохроматического света, падающего на решетку с периодом $3,33 \text{ мкм}$, если угол между направлением на первый и второй максимумы равен 10° .
22. Свет с длиной волны 535 нм падает нормально на дифракционную решетку. Найти ее период, если наибольший порядок спектра равен 5 .
23. Пучок света с длинами волн в интервале от $0,4$ до $0,76 \text{ мкм}$ падает нормально на дифракционную решетку. При этом в спектре третьего порядка под углом φ наблюдается линия, соответствующая длине волны $\lambda=0,48 \text{ мкм}$. Будут ли видны под этим же углом еще какие-нибудь спектральные линии?
24. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. Вначале зрительная труба устанавливается на фиолетовые линии $\lambda_\varphi=389 \text{ нм}$ по обе стороны от центральной полосы в спектре первого порядка. Отсчеты по лимбу вправо от нулевого деления дали $\varphi_{1\varphi} = 27^\circ 33'$ и $\varphi_{2\varphi} = 36^\circ 27'$. После этого зрительная труба устанавливается на красные линии по обе стороны от центральной полосы в спектре первого порядка. Значения отсчетов по лимбу вправо от нулевого деления равны $\varphi_{1кр} = 23^\circ 54'$ и $\varphi_{2кр} = 40^\circ 6'$. Найти длину волны красной линии спектра гелия.
25. Какое фокусное расстояние F должна иметь линза, проектирующая на экран спектр, полученный с помощью дифракционной решетки, чтобы расстояние между двумя линиями калия $\lambda_1 = 404,4 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 404,7 \text{ нм}$ в спектре первого порядка было равным $l=0,1 \text{ м}$?
Постоянная решетки $d=2 \text{ мкм}$.

Дифракция на кристаллической решетке.

26. Параллельный пучок рентгеновских лучей, которым соответствует длина волны $0,15$ нм, падает на грань кристалла каменной соли. Определить расстояние между атомными плоскостями кристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается при угле скольжения падающих лучей, равном 30° .
27. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает под углом скольжения $\theta=60^\circ$ на естественную грань монокристалла $NaCl$ ($\mu=58,5$ кг/моль), плотность которого $\rho=2,26$ г/см³. Определите длину волны излучения, если при зеркальном отражении от этой грани наблюдается максимум третьего порядка.
28. Узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения падает под углом скольжения $\theta=60^\circ$ на естественную грань монокристалла $NaCl$ ($\mu=58,5$ кг/моль), плотность которого $\rho=2,26$ г/см³. Определите угол скольжения, если при зеркальном отражении от этой грани наблюдается максимум второго порядка.
29. Расстояние между атомными плоскостями кристалла кальцита равно $0,3$ нм. Определите, при какой длине волны рентгеновских лучей второй дифракционный максимум будет наблюдаться при отражении лучей под углом 60° к поверхности кристалла.
30. Какова длина волны монохроматического рентгеновского излучения, падающего на кристалл кальцита, если дифракционный максимум первого порядка наблюдается, когда угол θ между направлением падающего излучения и гранью кристалла равен 3° .
31. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок рентгеновского излучения $\lambda=147$ нм. Определите расстояние между атомными плоскостями кристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается, когда излучение падает под углом $\theta=31^\circ 30'$ к поверхности кристалла.
32. Параллельный пучок рентгеновского излучения падает на грань кристалла. Под углом $\theta=65^\circ$ к плоскости грани наблюдается максимум первого порядка. Расстояние d между атомными плоскостями кристалла 280 нм. Определить длину волны рентгеновского излучения.

Разрешающая способность оптических приборов

33. Какова должна быть длина дифракционной решетки, имеющей 50 штрихов на 1 мм, чтобы в спектре второго порядка можно было различить две линии натрия 5800 \AA и 5896 \AA ?

34. В зрительную трубу рассматривается лунная поверхность. Диаметр объектива трубы $d=4,0$ см. При каком минимальном расстоянии r_{min} между двумя кратерами их можно увидеть раздельно? Длина световой волны $\lambda=600$ нм.
35. В растровом рисунке изображение образовано точками различной насыщенности. Начиная с какого расстояния r глаз перестает различать отдельные точки, и рисунок выглядит как непрерывный переход от более светлых мест к более темным, если число точек на 1 см^2 равно 2500? Диаметр зрачка человека принять равным 4,0 мм, а длину волны равной 600 нм.
36. Имеется зрительная труба с диаметром объектива $D=5,0$ см. Определить разрешающую способность объектива трубы и минимальное расстояние между двумя точками, находящимися на расстоянии $l=3,0$ км. от трубы, которое она может разрешить. Считать $\lambda=0,55$ мкм.
37. Определить минимальное увеличение зрительной трубы с диаметром объектива $D=5,0$ см, при котором разрешающая способность ее объектива будет равна разрешающей способности глаза, если диаметр зрачка $d=4,0$ мм.
38. Оцените, на основе дифракционных соображений, может ли орел, летящий над землей на высоте 1 км, разглядеть мышонка размером в 2 см, если диаметр глаза орла составляет 10 мм.
39. Какова должна быть минимальная длина отрезка на Луне и на Солнце, чтобы его изображение в телескопе с диаметром зеркала в 6 м можно было отличить от изображения точки?
40. Каково должно быть минимальное расстояние между двумя точками на поверхности Марса, чтобы их изображения в телескопе с диаметром объектива в 60 см можно было отличить от изображения одной точки. Расстояние от Марса до Земли минимально и составляет $56 \cdot 10^6$ км.
41. Во сколько раз можно повысить разрешающую способность микроскопа, если фотографировать в УФ лучах ($\lambda=2700 \text{ \AA}$), а не в зеленых ($\lambda=5500 \text{ \AA}$)?
42. Определить минимальное разрешаемое расстояние иммерсионного микроскопа при наилучших условиях освещения, если показатель преломления жидкости $n=1,6$, числовая апертура $\sin\alpha=0,9$ и $\lambda_1=5500 \text{ \AA}$. Как изменится это расстояние при замене длины волны на $\lambda_2=2700 \text{ \AA}$?
43. Определить наименьшее расстояние между двумя точками образца горной породы, наблюдаемого в микроскоп. Угол, под которым лучи из рассматриваемого участка образца попадают на края объектива микроскопа, равен $\pi/2$ (апертурный угол). Освещение среза производится зелёным светом ($\lambda = 550$ нм). Как изменится величина наименьшего

- расстояния, если пространство между рассматриваемым предметом и объективом заполнить иммерсионной жидкостью с показателем преломления 1,5.
44. Каково должно быть увеличение микроскопа, чтобы на фотографической пластинке, помещенной в плоскости изображения, даваемого объективом, наименьшие разрешаемые детали получили размеры порядка $0,5 \text{ мкм}$? Числовая апертура $\sin\alpha=0,9$, $\lambda=2700 \text{ \AA}$.
 45. Подсчитать минимальное число штрихов решетки, которая может разрешить натриевый дуплет в спектре первого порядка ($\lambda_1=5800 \text{ \AA}$, $\lambda_2=5896 \text{ \AA}$).
 46. Сравните наибольшую разрешающую способность для красной линии кадмия $\lambda=644 \text{ нм}$ двух дифракционных решеток одинаковой длины $l=5 \text{ мм}$, но разных периодов $d_1=4 \text{ мкм}$, $d_2=8 \text{ мкм}$.
 47. Сравните наибольшую разрешающую способность для красной линии кадмия $\lambda=644 \text{ нм}$ двух дифракционных решеток разной длины $l_1=5 \text{ мм}$, $l_2=10 \text{ мм}$, но одинаковых периодов $d=4 \text{ мкм}$.
 48. Определите постоянную дифракционной решетки, если решетка в первом порядке разрешает две спектральные линии калия $\lambda_1=578 \text{ нм}$ и $\lambda_2=580 \text{ нм}$. Длина решетки $l=1 \text{ см}$.
 49. Постоянная d дифракционной решетки длиной $l=2,5 \text{ см}$ равна 5 мкм . Определите разность длин волн, разрешаемую этой решеткой, для света с длиной волны $\lambda=0,5 \text{ мкм}$ в спектре второго порядка.
 50. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=0,6 \text{ мкм}$. Угол дифракции для пятого максимума равен 30° , а минимальная разрешаемая решеткой разность длин волн составляет $\delta\lambda=0,2 \text{ нм}$. Определить а) постоянную дифракционной решетки, б) длину дифракционной решетки.
 51. При нормальном падении света на дифракционную решетку длиной 10 мм обнаружено, что в пятом порядке спектра оказываются разрешенными линии $589,0$ и $589,6 \text{ нм}$. Оцените период этой решетки.
 52. При какой длине дифракционной решетки с периодом $d=0,05 \text{ мм}$ можно разрешить в третьем порядке дуплет спектральной линии с $\lambda=460,0 \text{ нм}$, компоненты которого отличаются на $0,13 \text{ нм}$.
 53. Дифракционная решетка спектрометра имеет длину 25 мм и содержит 250 штрихов на миллиметр. Фокусное расстояние объектива, в фокальной плоскости которого находится фотопластинка, равно 80 см . Свет падает на решетку нормально. Исследуемый спектр содержит спектральную линию, компоненты дуплета которой имеют длины волн $310,154 \text{ нм}$ и $310,184 \text{ нм}$. Определите а) расстояние на фотопластинке между компонентами этого дуплета в спектре первого порядка; б) будут ли разрешены компоненты линии в этом порядке спектра.

54. На дифракционную решетку длиной 10 мм имеющую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально свет от разрядной трубки. Помещенная вблизи решетки линза проецирует дифракционную картину (рис. 4) на плоский экран Э, удаленный от линзы на расстояние 1 м. Определить: 1) число спектральных линий красного цвета, которые теоретически можно наблюдать с помощью данной дифракционной решетки; 2) в спектре какого порядка эта решетка может разрешить две линии с длиной волны, равной 500 нм и 500,1 нм

Линейная и угловая дисперсии

55. Постоянная дифракционной решетки $d = 2,5 \text{ мкм}$. Найти угловую дисперсию решетки для $\lambda = 589 \text{ нм}$ в спектре первого порядка.
56. Угловая дисперсия дифракционной решетки для $\lambda = 668 \text{ нм}$ в спектре первого порядка
57. $\frac{d\varphi}{d\lambda} = 2,02 \text{ рад/м}$. Найти период дифракционной решетки и линейную дисперсию D , если фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, равно $F = 40 \text{ см}$.
58. На каком расстоянии l друг от друга будут находиться на экране две линии ртутной дуги $\lambda_1 = 577 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 579,1 \text{ нм}$ в спектре первого порядка, полученном при помощи дифракционной решетки? Фокусное расстояние линзы, проектирующей спектр на экран, $F = 0,6 \text{ м}$. Постоянная решетки $d = 2 \text{ мкм}$.
59. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия $\lambda_1 = 630 \text{ нм}$ видна в спектре третьего порядка под углом $\varphi = 60^\circ$. Какая спектральная линия λ_2 видна под этим же углом в спектре четвертого порядка? Какое число штрихов на единицу длины имеет дифракционная решетка? Найти угловую дисперсию этой решетки для $\lambda_1 = 630 \text{ нм}$ в спектре третьего порядка.
60. Для какой длины волны λ дифракционная решетка имеет угловую дисперсию $\frac{d\varphi}{d\lambda} = 6,3 \cdot 10^5 \text{ рад/м}$ в спектре третьего порядка? Постоянная решетки $d = 5 \text{ мкм}$.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЕЩЕСТВОМ

Основные формулы

Связь между углом наименьшего отклонения лучей призмой φ и преломляющим углом призмы A

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A+\varphi}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}},$$

где n — показатель преломления призмы.

Уравнение вынужденных колебаний оптического электрона под действием электрической составляющей поля электромагнитной волны (простейшая задача дисперсии)

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t ,$$

где eE_0 — амплитудное значение силы, действующей на электрон со стороны поля волны; ω_0 — собственная частота колебаний электрона; ω — частота внешнего поля; m , e — масса и заряд электрона.

Зависимость показателя преломления вещества n от частоты ω внешнего поля, согласно элементарной электронной теории дисперсии

$$n^2 = 1 + \frac{n_{0i}}{\varepsilon_0} \sum \frac{e^2 / m}{\omega_{0i}^2 - \omega^2},$$

где ε_0 — электрическая постоянная; n_{0i} — концентрация электронов; m — масса электрона; e - заряд электрона.

Закон Бугера- Ламберта (закон ослабления интенсивности света в веществе)

$$I = I_0 e^{-ax},$$

где I_0 и I - интенсивности плоской монохроматической световой волны соответственно на входе и выходе из поглощающего слоя вещества толщиной x ; a - коэффициент поглощения.

Эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + (v/c)\cos\theta},$$

где ν_0 и ν — соответственно частоты электромагнитного излучения, испускаемого источником и воспринимаемого приемником; v - скорость источника электромагнитного излучения относительно приемника; c - скорость света в вакууме; θ - угол между вектором скорости и направлением наблюдения, измеряемый в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

Продольный эффект Доплера ($\theta = 0$)

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{\sqrt{1 + (v/c)}}$$

Поперечный эффект Доплера ($\theta = \pi/2$)

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Эффект Вавилова—Черенкова

$$\cos\theta = \frac{c}{nv},$$

где θ — угол между направлением распространения излучения и вектором скорости частицы; n — показатель преломления среды.

Дисперсия света

$$D = \frac{dn}{d\lambda}.$$

Групповая скорость световой волны (Формула Релея)

$$u = \frac{d\omega}{dk} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} = \frac{c}{n} \left(1 - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right),$$

где c — скорость света, n — показатель преломления среды, λ — длина световой волны.

Фазовая скорость световой волны

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}} = \frac{c}{n}.$$

Примеры решения задач

1. Луч света выходит из стеклянной призмы ($n = 1,5$) под тем же углом, что и входит в нее. Определить угол отклонения φ луча призмой, если ее преломляющий угол $A = 60^\circ$ (рис. 12).

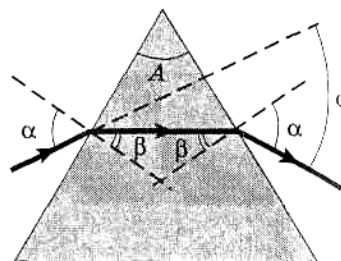


рис 12

Дано	Решение
$n=1.5$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ $A=60$ $\varphi=?$	$\beta_1 = \beta_2 = \beta = \frac{A}{2}, \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad \sin \alpha = n \sin \beta = n \sin\left(\frac{A}{2}\right), \quad \alpha = \arcsin\left(n \sin\left(\frac{A}{2}\right)\right),$ $\varphi = 2\alpha - A = \arcsin\left(n \sin\left(\frac{A}{2}\right)\right) - A$

Ответ: $\varphi = 37^\circ 11''$.

2. Определить максимальную скорость вынужденных колебаний свободного электрона, если в точке его нахождения радиопередатчик, работающий на частоте 500 кГц , создает поле электромагнитного излучения $E_0 = 10 \text{ мВ/см}$.

Дано	Решение
$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Кг}$ $\nu = 5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ $E_0 = 1 \text{ В/м}$ $v_{\max}=?$	$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_{\text{вын}}}{m} \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \omega_0 = 0, \quad F_{\text{вын}} = E_0 e, \quad \ddot{x} = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t,$ $\dot{x} = v = \frac{eE_0}{m} \sin \omega t, \quad v_{\max} = \frac{E_0 e}{m\omega} = \frac{E_0 e}{2\pi\nu m}$

Ответ: $v = 55,9 \text{ км/с}$.

3. Определить концентрацию n_0 свободных электронов ионосферы, если для радиоволн с частотой $\nu = 97 \text{ МГц}$ ее показатель преломления $n = 0,91$.

Дано	Решение
$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Кг}$ $\nu = 97 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ $n = 0.91$ $n_0 = ?$	$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad \mu = 1, \quad n = \sqrt{\epsilon}, \quad \epsilon = 1 + \chi, \quad P = \chi\epsilon_0 E_0, \quad P = n_0 \cdot e \cdot x_{\max},$ $n^2 = \epsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E_0} = 1 + \frac{n_0 \cdot e \cdot x_{\max}}{\epsilon_0 E_0}, \quad n^2 = (n^2 - 1) \frac{\epsilon_0 E_0}{e \cdot x_{\max}},$ $\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad x = A \cos \omega t, \quad A = \frac{\epsilon_0 E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad \omega_0 = 0,$ $x_{\max} = A, \quad x_{\max} = -\frac{\epsilon_0 E_0}{m\omega^2}, \quad n_0 = (1 - n^2) \frac{\epsilon_0 E_0 m \omega^2}{e^2 E_0} = (1 - n^2) \frac{(2\pi\nu)^2 \epsilon_0 m}{e^2}$

Ответ: $n_0 = 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$

4. Свет падает нормально поочередно на две пластинки, изготовленные из одного и того же вещества, имеющие соответственно толщины $x_1 = 5 \text{ мм}$ и $x_2 = 10 \text{ мм}$. Определить коэффициент поглощения этого вещества, если интенсивность света, прошедшего через первую пластинку, составляет 82%, а через вторую - 67%.

Дано	Решение
$x_1 = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $x_2 = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м}$ $I_1 = 0,82I_0$ $I_2 = 0,67I_0$ $\alpha = ?$	$I_1 = I_0 e^{-\alpha x_1} \quad I_2 = I_0 e^{-\alpha x_2}$ $\frac{I_1}{I_2} = e^{\alpha(x_2 - x_1)} \quad \alpha = \frac{\ln(I_1 / I_2)}{x_2 - x_1}$

Ответ: $\alpha = 0,404 \text{ см}$

5. В спектральных линиях, излучаемых астрономическими объектами — квазарами, наблюдалось красное смещение, отвечающее трехкратному уменьшению частоты. Определить, с какой скоростью при этом должен был бы удаляться квазар.

Дано	Решение
$\nu = \nu_0 / 3$ $\vartheta = 0$ $\nu = ?$	$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \vartheta}, \quad \vartheta = 0, \quad \cos \vartheta = 1, \quad \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{3},$ $\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} = \left(\frac{1}{3}\right)^2, \quad 1 + \frac{v}{c} = 9\left(1 - \frac{v}{c}\right), \quad 10\frac{v}{c} = 8, \quad v = 0,8c.$

Ответ: $v = 0,8c$

6. Вывести выражение для уширения $\Delta\lambda / \lambda$ спектральных линий в случае поперечного эффекта Доплера.

Дано	Решение
$\vartheta = \pi / 2$ $\Delta\lambda / \lambda = ?$	$\nu' = \nu \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \vartheta}, \quad \cos \vartheta = \cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}, \quad \lambda' = \frac{c}{\nu'}$ $\frac{\lambda'}{\lambda} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{v^2}{c^2}\right) + \frac{3}{8}\left(\frac{v^4}{c^4}\right) + \dots,$ $\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{v^2}{c^2}\right), \quad \lambda' = \lambda + \Delta\lambda, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v^2}{2c^2}.$

Ответ: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v^2}{2c^2}$

7. Определить доплеровское смещение $\Delta\lambda$ для спектральной линии атомарного водорода ($\lambda = 486,1 \text{ нм}$), если ее наблюдать под прямым углом к пучку атомов водорода с кинетической энергией $T = 100 \text{ кэВ}$.

Дано	Решение
$\lambda = 486,1 \text{ нм} = 486,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ $\vartheta = \pi/2$ $T = 100 \text{ кэВ} = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $\Delta\lambda - ?$	$v' = v \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \vartheta}, \quad v' = v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad v = \frac{c}{\lambda}, \quad v' = \frac{c}{\lambda'}$ $\frac{\lambda'}{\lambda} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{c^2}\right) + \frac{3}{8} \left(\frac{v^4}{c^4}\right) + \dots,$ $\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{c^2}\right), \quad \lambda' = \lambda + \Delta\lambda, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v^2}{2c^2}, \quad T = \frac{mv^2}{2}, \quad v^2 = \frac{2T}{m},$ $\Delta\lambda = \lambda \frac{T}{mc^2}.$

Ответ $\Delta\lambda = \lambda \frac{T}{mc^2}$

8. Определить минимальную ускоряющую разность потенциалов U_{\min} , которую должен пройти электрон, чтобы в среде с показателем преломления $n = 1,5$ возникло черенковское излучение.

Дано	Решение
$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ эв}$ $n = 1,5$ $U_{\min} - ?$	$\cos \vartheta = \frac{c}{nv}, \quad v = \frac{c}{n \cos \vartheta}, \quad v_{\min} = \frac{c}{n} (\cos \vartheta = 1),$ $T_{\min} = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\min}^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad T_{\min} = mc^2 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right)$ $, \quad T_{\min} = e U_{\min}, \quad U_{\min} = \frac{mc^2}{ e } \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right)$

Ответ: $U_{\min} = 175 \text{ кВ}$

9. Определить минимальный импульс, которым должен обладать электрон, чтобы эффект Вавилова—Черенкова наблюдался в среде с показателем преломления $n = 1,5$.

Дано	Решение
$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	$\cos \vartheta = \frac{c}{nv}, \quad v = \frac{c}{n \cos \vartheta}, \quad v_{\min} = \frac{c}{n} (\cos \vartheta = 0),$

$n = 1,5$	$p_{\min} = \frac{mc}{n\sqrt{1 - \left(\frac{v_{\min}}{c}\right)^2}} = \frac{mc}{n\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}, \quad p_{\min} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}}$
$p - ?$	

Ответ $p = 2,44 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

Задачи для самостоятельного решения

1. При прохождении в некотором веществе пути x интенсивность света уменьшилась в 3 раза. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути $2x$.
2. Коэффициент поглощения некоторого вещества для монохроматического света определенной длины волны $\alpha = 0,1 \text{ см}^{-1}$. Определите толщину слоя вещества, необходимую для ослабления света: 1) в 2 раза; 2) в 5 раз. Потери на отражение света не учитывать.
3. Плоская монохроматическая волна распространяется в некоторой среде. Коэффициент поглощения среды для данной длины волны равен $1,2 \text{ м}^{-1}$. На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении волной пути, равного 5,0 мм.
4. Имеется прозрачная пластина толщины $d=10 \text{ см}$. Для некоторой длины волны λ коэффициент поглощения пластины изменяется от значения $\alpha_1=0,8 \text{ м}^{-1}$ у одной поверхности до $\alpha_2=1,2 \text{ м}^{-1}$ у другой поверхности. Определить в процентах ослабление интенсивности монохроматического света данной длины волны при прохождении имитолщи пластины.
5. Определить толщину слоя вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в 3 раза, если толщина слоя половинного ослабления составляет 2 м.
6. Монохроматический пучок света проходит через стопу из 5 одинаковых плоскопараллельных стеклянных пластинок, каждая толщиной 0,50 см. Коэффициент отражения на каждой поверхности пластинок $R=0.05$. Отношение интенсивности света, прошедшего через эту стопу пластинок, к интенсивности падающего света равно 0,55. Пренебрегая вторичными отражениями света, определить показатель преломления данного стекла.
7. Луч света, содержащий две монохроматические составляющие, проходит через трехгранную призму с преломляющим углом $A=60^\circ$. Определить угол $\Delta\alpha$ между обеими составляющими луча после призмы, если показатели преломления для них равны 1,515 и 1,520 и призма ориентирована на угол наименьшего отклонения.
8. Луч белого света проходит через трехгранную призму с преломляющим углом $A=60^\circ$. Определить угловую ширину полученного разложения в спектр (ограничиться видимым диапазоном).

Фазовая и групповая скорости

9. Какова фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде, диэлектрическая проницаемость которой $\epsilon = 3$ и магнитная проницаемость $\mu = 1$?
10. Показатель преломления сероуглерода при $\lambda_1 = 656 \text{ нм}$ равен 1,620, а при $\lambda_2 = 580 \text{ нм}$ равен 1,629. Определите, во сколько раз отличаются групповая и фазовая скорости света в сероуглероде для $\lambda = 620 \text{ нм}$.
11. Показатель преломления воды при $\lambda_1 = 441,6 \text{ нм}$ равен 1,341, а при $\lambda_2 = 589,3 \text{ нм}$ равен 1,334. Определите приблизительные значения фазовой и групповой скоростей света в воде для синей области спектра (длину волны можно принять средней между λ_1 и λ_2).
12. Измеряя скорость света по методу вращающегося зеркала, Майкельсон нашел, что скорость света в сероуглероде для D -линии натрия в 1,758 раз меньше, чем в вакууме. Показатель преломления сероуглерода для D -линии натрия, найденный другими методами, равен 1,629. Объяснение этого расхождения основано на том, что в методе Майкельсона применяется прерывистый световой поток, и поэтому в диспергирующей среде измеряется групповая скорость, которая не совпадает с фазовой вследствие существования дисперсии. Вычислите дисперсию показателя преломления сероуглерода для D -линии натрия ($\lambda = 0,589 \text{ мкм}$).
13. Для многих прозрачных веществ, особенно газов, зависимость показателя преломления n от длины волны λ_0 в вакууме хорошо описывается формулой $n = a + b / \lambda_0^2$, где a и b – постоянные (для многих веществ они табулированы). Пусть для некоторого вещества показатель преломления при $\lambda_0 = 759,0 \text{ нм}$ и $\lambda_0 = 486,0 \text{ нм}$, соответственно, равен 1,510 и 1,521. Определите на этой основе постоянные a и b .
14. Фазовая скорость электромагнитной волны с $\lambda_0 = 500 \text{ нм}$, распространяющейся в воздухе, оказалась равной 299 713 км/с. Предполагая, что зависимость $n = n(\lambda_0)$ в воздухе описывается формулой, данной в предыдущей задаче, где $a = 1,000273$, $b = 1,54 \text{ нм}^2$, определите скорость света в вакууме.
15. Предполагая, что зависимость показателя преломления n от длины волны λ_0 в вакууме для некоторой прозрачной среды описывается формулой $n = a + b / \lambda_0^2$, определите фазовую и групповую скорости электромагнитных волн в такой среде.
16. Пусть дисперсия фазовой скорости для некоторой среды описывается соотношением $v = \alpha \omega^\beta$, $\beta < 0$ (нормальная дисперсия). Определите групповую скорость.

Замечание. Целесообразно рассчитывать $1/u = dk/d\omega$; $k = \omega n/c_0 = \omega/v$.

Классическая теория дисперсии.

17. Показатель преломления воздуха для желтой линии натрия при $14,5^{\circ}\text{C}$ и при нормальном атмосферном давлении равен $1,00029$. Вычислите показатель преломления воздуха при той же температуре и давлении $28,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$.
18. Пульсар периодически излучает радиоимпульсы, которые регистрируются на Земле радиотелескопами. Если приемник телескопа перестроить с частоты $f_1 = 150 \text{ МГц}$ на частоту $f_2 = 240 \text{ МГц}$, то очередной импульс появится раньше на $\Delta t = 1,3 \text{ с}$. Каково расстояние L до этого пульсара, если в межзвездном пространстве концентрация электронов составляет $N = 0,030 \text{ см}^{-3}$.
19. Показатель преломления плазмы для радиоволн с частотой $f=10 \text{ МГц}$ равен $n=0,90$. Определите концентрацию N электронов в плазме, а также фазовую и групповую скорости этих радиоволн.
20. Известно, что при удалении от нас некоторой туманности линия излучения водорода ($\lambda = 656,3 \text{ нм}$) в ее спектре смещена в красную сторону на $\Delta\lambda = 2,5 \text{ нм}$. Определите скорость удаления туманности.
21. Плоское зеркало удаляется от наблюдателя со скоростью v вдоль нормали к плоскости зеркала. На зеркало посылают пучок света длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Определить длину волны λ света, отраженного от зеркала, движущегося со скоростью $0,2c$
22. Космический корабль удаляется от Земли со скоростью 10 км/с . Частота электромагнитных волн ν_0 , излучаемых антенной корабля, равна 30 МГц . Определить доплеровское смещение частоты, воспринимаемое приемником.
23. Вычислить групповую и фазовую скорости света с длиной волны $643,8 \text{ нм}$ в воде, если известно, что показатель преломления для этой длины волны равен $1,3314$, а для волны с длиной $656,3 \text{ нм}$ он равен $1,3311$.
24. Найти отношение групповой скорости света к фазовой для света с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$ в среде с показателем преломления равным $1,5$ и дисперсией $-5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$.
25. Источник монохроматического света с длиной волны $\lambda_0 = 0,5 \text{ мкм}$ движется по направлению к наблюдателю со скоростью $0,15c$ (c — скорость света в вакууме). Определите длину волны, которую зарегистрирует приемник наблюдателя.
26. Вычислить разницу между групповой и фазовой скоростью света с длиной волны $0,768 \text{ мкм}$ в стекле, если известно, что показатель преломления для этой длины волны равен $1,511$, а для волны с длиной $0,656 \text{ мкм}$ он равен $1,514$.

Эффект Вавилова – Черенкова

27. Какой наименьшей скоростью должен обладать протон, чтобы в среде с показателем преломления $n = 1,3$ возникло черенковское излучение?
28. В черенковском счетчике, заполненном водой, пучок релятивистских протонов излучает свет в конусе с раствором 70° . определить кинетическую энергию протонов
29. Найти наименьшую ускоряющую разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы в среде с показателем преломления $n = 1,5$ возникло черенковское излучение.
- 30.** Пучок релятивистских электронов движется в воде. Будет ли наблюдаться черенковское свечение, если кинетическая энергия электронов равна $0,1 \text{ МэВ}$?

5. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Основные формулы

Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\max} , I_{\min} — соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Закон Малюса

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

где I — интенсивность плоско поляризованного света, прошедшего через анализатор и I_0 — падающего на анализатор; α — угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_b = n_{21},$$

где i_b — угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоско поляризованным; $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ — относительный показатель преломления среды.

Оптическая разность хода для кристаллической пластинки:

- в четверть длины волны

$$(n_o - n_e)d = \pm(2m+1) \frac{\lambda}{4}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

- в пол длины волны

$$(n_o - n_e)d = \pm(2m+1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

- в целую длину волны

$$(n_o - n_e)d = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где λ — длина волны; d — толщина пластинки; $n_o - n_e$ — соответственно показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси, знак плюс соответствует отрицательным одноосным кристаллам, минус — положительным.

Угол поворота плоскости поляризации:

- для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = [\alpha] d,$$

- для оптически активных растворов

$$\varphi = [\alpha] C d,$$

где d — длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе; $[\alpha]$ — удельное вращение; C — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Примеры решения задач

1. Определить степень поляризации P света, который представляет собой смесь естественного света с плоско поляризованным, если интенсивность поляризованного света равна интенсивности естественного.

Дано $I_{\text{п}} = I_{\text{ест}}$ P-?	Решение $P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, I_{\text{max}} = I_n + \frac{1}{2}I_{\text{ест}} = I_n + \frac{1}{2}I_n = \frac{3}{2}I_n, I_{\text{min}} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}} = \frac{1}{2}I_n,$ $P = \frac{\frac{3}{2}I_n - \frac{1}{2}I_n}{\frac{3}{2}I_n + \frac{1}{2}I_n} = \frac{I_n}{2I_n} = 0,5$
--	---

Ответ P=0,5

2. Определить, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенных так, что угол между их главными плоскостями $\alpha = 60^\circ$, а в каждом из николей теряется 8% интенсивности падающего на него света (рис. 13).

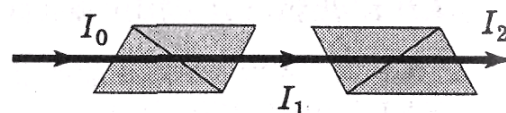


рис 13

Дано $\alpha = 60^\circ$ $k = 0,08$ $I_0 / I_2 - ?$	Решение $I_1 = \frac{1}{2}I_0(1-k), I_2 = I_1(1-k)\cos^2 \alpha, I_2 = \frac{1}{2}I_0(1-k)^2 \cos^2 \alpha,$ $\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-k)^2 \cos^2 \alpha},$
--	--

Ответ $I_0/I_2=9,45$

3. Предельный угол полного отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен $40,5^\circ$. Определить угол Брюстера при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла.

Дано $i_{\text{пр}} = 40,5^\circ$ $i_{\text{Б}} - ?$	Решение $\frac{\sin i_{\text{пр}}}{\sin(\pi/2)} = \frac{n_1}{n_2}, \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{\sin i_{\text{пр}}}, \operatorname{tg} i_{\text{Б}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{\sin i_{\text{пр}}}, i_{\text{Б}} = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\sin i_{\text{пр}}} \right)$
--	---

Ответ $i_{\text{Б}}=57^\circ$

4. Плоско поляризованный свет, длина волны которого в вакууме $\lambda = 589 \text{ нм}$, падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно его оптической оси OO' (рис. 14). Принимая показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$, определить длины волн этих лучей в кристалле.

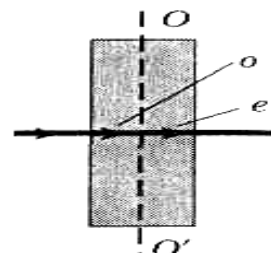


рис 14

<p>Дано</p> $\lambda = 589 \text{ нм} = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $n_0 = 1,66$ $n_e = 1,49$	<p>Решение</p> $\lambda = cT, \lambda_0 = \nu_0 T, \lambda_e = \nu_e T$ $\nu_0 = \frac{c}{n_0}, \nu_e = \frac{c}{n_e}, \lambda_0 = \frac{\lambda}{n_0}, \lambda_e = \frac{\lambda}{n_e}$
---	---

λ_0 -?

λ_e -?

Ответ: $\lambda_0 = 355 \text{ нм}; \lambda_e = 395 \text{ нм}$.

5. Определить наименьшую толщину кристаллической пластинки в четверть длины волны для $\lambda = 530 \text{ нм}$, если для данной длины волны разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей $n_0 - n_e = 0,01$

<p>Дано</p> $\lambda = 530 \text{ нм} = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $n_0 - n_e = 0,01$ $\Delta = \lambda/4$	<p>Решение</p> $(n_0 - n_e)d = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{4}, \quad (n_0 - n_e)d_{\min} = \frac{\lambda}{4},$ $d_{\min} = \frac{\lambda}{4(n_0 - n_e)}$
--	---

d_{\min} -?

Ответ $d_{\min} = 13,3 \text{ мкм}$

6. Пластинка кварца толщиной $d = 2 \text{ мм}$, вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол $\varphi_1 = 30^\circ$. Определить толщину d_2 кварцевой пластинки, помещенной между параллельными николями, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью.

<p>Дано</p> $d_1 = 2 \text{ мм} = 0,002 \text{ м}$ $\varphi_1 = 30^\circ$ $\varphi_2 = 90^\circ$ d_2 -?	<p>Решение</p> $\varphi_1 = \alpha d_1, \varphi_2 = \alpha d_2, \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{d_1}{d_2}, d_2 = \frac{d_1 \varphi_2}{\varphi_1}$
--	---

Ответ $d_2 = 6 \text{ мм}$

7. Определить массовую концентрацию C сахарного раствора, если при прохождении света через слой раствора $l = 20 \text{ см}$ плоскость поляризации света поворачивается на угол $\varphi = 10^\circ$. Удельное вращение $[\alpha]$ сахара равно $1,17 \cdot 10^{-2} \text{ рад} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$.

<p>Дано</p> $l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ $\varphi = 10^\circ$ $[\alpha] = 1,17 \cdot 10^{-2} \text{ рад} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ C -?	<p>Решение</p> $\varphi = [\alpha]Cl, \quad C = \frac{\varphi}{[\alpha]l}, \quad 1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$
---	--

Ответ $C = 74,8 \text{ кг/м}^3$

Задачи для самостоятельного решения.

Степень поляризации света. Коэффициенты отражения и пропускания.

1. Степень поляризации частично поляризованного света составляет 0,75. Определите отношение максимальной интенсивности света, пропускаемого анализатором, к минимальной.
2. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Коэффициент пропускания света равен 0,92. Найти степень поляризации преломленного луча.
3. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного луча составляет 0,09. Найти коэффициент отражения.
4. В частично поляризованном свете амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности. Определить степень поляризации света.
5. На пути частично поляризованного света, степень поляризации которого равна 0,6, поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол $\alpha = 30^\circ$?
6. На николю падает пучок частично-поляризованного света. При некотором положении николя интенсивность света, прошедшего через него, стала минимальной. Когда плоскость пропускания николя повернули на угол $\beta = 45^\circ$, интенсивность света возросла в 1,5 раза. Определить степень поляризации света.

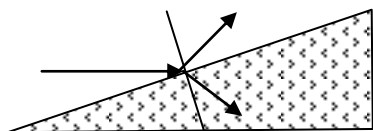
Закон Малюса

7. Во сколько раз ослабевает свет, проходя сквозь три николя, если оптические оси первого и второго николей составляют угол $\varphi_1 = 30^\circ$, а оптические оси второго и третьего николей составляют угол $\varphi_2 = 60^\circ$.
8. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через два николя, главные плоскости которых образуют угол 60° , если каждый из николей как поглощает, так и отражает 5% падающего на них света.

9. Чему равен угол между главными оптическими осями поляризатора и анализатора, если анализатор в b раз уменьшает интенсивность света, приходящего к нему от поляризатора? Показать ход лучей в призме Николя. Поглощением света пренебречь.
10. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ? Сделать чертеж. Вывести расчетную формулу.
11. Во сколько раз ослабевает естественный свет, проходя сквозь два николя, для которых плоскости поляризации составляют угол 63° ? Каждый из николей в отдельности ослабляет свет на 10% за счет поглощения и на 5% за счет отражения.
12. Чему равен угол между главными плоскостями поляризаторов, если интенсивность света после прохождения через них, уменьшилась в $5,3$ раза? Считать, что каждый поляризатор отражает и поглощает по 13% падающего на него света.
13. При падении естественного света на некоторый поляризатор проходит $\eta_1=30\%$ светового потока, а через два таких поляризатора - $\eta_2=13,5\%$. Найти угол φ между плоскостями пропускания этих поляризаторов.

Закон Брюстера

14. Определите показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч полностью поляризован при угле преломления 35° .
15. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности воды, были максимально поляризованы?
16. Пучок естественного света падает на стеклянную призму с углом $\alpha=30^\circ$.
Определить показатель преломления стекла, если отраженный луч является плоско поляризованным.



Поляризация при двойном лучепреломлении

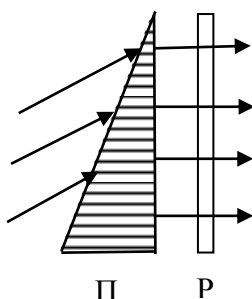
17. Требуется изготовить кварцевую пластинку параллельную оптической оси, толщина которой не превышала бы $0,05$ мм. Найти максимальную толщину

- этой пластинки, при которой линейно поляризованный свет с $\lambda=589$ нм после прохождения через нее испытывает лишь поворот плоскости поляризации.
18. Требуется изготовить кварцевую пластинку параллельную оптической оси, толщина которой не превышала бы 0,05 мм. Найти максимальную толщину этой пластинки, при которой линейно поляризованный свет с $\lambda=589$ нм после прохождения через нее станет поляризованным по кругу.
19. Параллельный пучок света падает нормально на пластинку из исландского шпата толщиной 50 мкм, вырезанную параллельно оптической оси. Принимая показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$, определите разность хода и разность фаз лучей, прошедших через пластинку.
20. Кристаллическая пластинка из исландского шпата с наименьшей толщиной $d = 0,86$ мкм служит пластинкой в четверть волны для $\lambda = 0,59$ мкм. Определите разность показателей преломления Δn обыкновенного и необыкновенного лучей.
21. Определите наименьшую толщину кристаллической пластинки в целую длину волны для $\lambda = 530$ нм, если разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей для данной длины волны $n_e - n_o = 0,01$.
22. Кварцевую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси, поместили между двумя скрещенными поляризаторами. Угол между плоскостями пропускания поляризаторов и оптической осью пластинки 45° . Толщина пластинки $d=0,50$ мм. При каких длинах волн в интервале 0,50-0,60 мкм интенсивность света, прошедшего через эту систему не будет зависеть от поворота заднего поляризатора? Разность показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей в этом интервале длин волн считать $\Delta n = 0,0090$.
23. Между двумя скрещенными поляризаторами поместили кварцевый клин с преломляющим углом $\theta=3,5^\circ$. Оптическая ось клина параллельна его ребру и составляет угол 45° с плоскостями пропускания поляризаторов. При прохождении через эту систему света с $\lambda=564$ нм наблюдается система полос. Ширина каждой полосы $\Delta x=1,0$ мм. Определить разность показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей для кварца.

24. Ячейку Керра поместили между двумя скрещенными поляризаторами так, что направление электрического поля E в конденсаторе образует угол 45° с плоскостями пропускания поляризаторов. Конденсатор имеет длину $l=100$ мм и заполнен нитробензолом. Через систему проходит свет с $\lambda=0,50$ мкм. Постоянная Керра (постоянной Керра называют коэффициент B в формуле $n_e-n_o=B\lambda E^2$) в данном случае $B=2,2 \cdot 10^{-10}$ см/В². Определить число прерываний света в одну секунду, если на конденсатор подать синусоидальное напряжение с частотой $\nu=10$ МГц и амплитудным значением напряженности E .

Вращение плоскости поляризации

25. Раствор глюкозы с массовой концентрацией $C_2 = 0,21$ г/см³, находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол $\varphi_1 = 24^\circ$. Определите массовую концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе в трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 18^\circ$.
26. При прохождении света через слой 10-процентного сахарного раствора толщиной 15 см плоскость поляризации света повернулась на угол $12,9^\circ$. В другом растворе, взятом в слое толщиной 12 см, плоскость поляризации повернулась на $7,2^\circ$. Найти концентрацию второго раствора.
27. При прохождении света через слой сахарного раствора концентрацией $0,25$ г/см³ и толщиной 18 см плоскость поляризации света повернулась на угол 30° . В другом растворе, взятом в слое толщиной 16 см, плоскость поляризации повернулась на 24° . Найти концентрация второго раствора.
28. Кварцевую пластинку толщиной 3 мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между двумя поляризаторами. Определить постоянную вращения кварца для красного света, если его интенсивность после прохождения этой системы максимальна, когда угол между главными плоскостями поляризаторов равен 45° .



29. Линейно поляризованный свет с длиной волны $0,59$ мкм падает на трехгранную кварцевую призму с преломляющим углом $\theta=30^\circ$. В призме свет распространяется вдоль оптической оси, направление которой показано штриховкой. За поляридом P

наблюдают систему светлых и темных полос, ширина которых $\Delta x = 15,0 \text{ мм}$. Найти величину постоянной вращения кварца.

30. Свет проходит через систему из двух скрещенных поляризаторов, между которыми расположена кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно к оптической оси. Определить минимальную толщину пластинки, при которой свет с длиной волны 436 нм будет полностью задерживаться этой системой, а свет с длиной волны 497 нм – пропускаться наполовину. Постоянная вращения кварца для этих длин волн равна соответственно $41,5$ и $31,1 \text{ град/мм}$.

6. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные формулы

Энергия кванта (фотона)

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где h — постоянная Планка; ν — частота; c — скорость распространения света в вакууме; λ — длина волны.

Закон Кирхгофа

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T},$$

где $R_{\nu,T}$ - испускательная способность тела, $A_{\nu,T}$ - поглощательная способность тела; $r_{\nu,T}$ - спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Энергетическая светимость абсолютно черного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda,$$

Закон Стефана—Больцмана

$$R_e = \sigma \cdot T^4,$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана; T - термодинамическая температура.

Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^c = A_T \cdot R_e = A_T \cdot \sigma \cdot T^4,$$

где A_T — поглощательная способность серого тела; R_e — энергетическая светимость черного тела; σ — постоянная Стефана—Больцмана; T — термодинамическая температура.

Закон смещения Вина

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

где λ_{\max} — длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела; $b=2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К - постоянная Вина; T — термодинамическая температура.

Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5,$$

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

Формула Рэлея—Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где kT — средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν (k — постоянная Больцмана, T — термодинамическая температура); c — скорость распространения света в вакууме.

Формула Планка

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\nu^5} \frac{1}{e^{h\nu/kT\lambda} - 1},$$

где $r_{\nu,T}$, $r_{\lambda,T}$ - спектральные плотности энергетической светимости чёрного тела соответственно как функция частоты ν и длины волны λ .

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2} \text{ или } eU_0 = h(\nu - \nu_0),$$

где ν — частота падающего фотона; h — постоянная Планка; A — работа выхода электрона из металла; $\frac{m\nu_{\max}^2}{2}$ — максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона; U_0 — задерживающее напряжение; ν_0 — красная граница фотоэффекта.

Красная граница фотоэффекта

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

где λ_0 — максимальная длина волны излучения (ν_0 — соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен; A — работа выхода электрона из металла.

Импульс фотона

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где $h\nu$ — энергия фотона, c — скорость света в вакууме, λ — длина волны.

Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho),$$

где $E_e = N h \nu$ — энергия N фотонов, падающих на 1 м^2 поверхности в 1 с ; N — полное число падающих фотонов, ρ — коэффициент отражения; ω — объемная плотность энергии излучения.

Изменение длины волны излучения при комптоновском рассеянии (комптоновский сдвиг)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \vartheta) = \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\vartheta}{2} = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\vartheta}{2},$$

где λ и λ' — длина волн падающего и рассеянного излучения; m — масса электрона; ϑ — угол рассеяния; $\lambda_C = h/(mc)$ — комптоновская длина волны ($\lambda_C = 2,43 \text{ нм}$).

Примеры решения задач

1. Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии площадью 30 см^2 равна $1,3 \text{ кК}$. Принимая, что отверстие печи излучает как черное тело, определить, какая часть мощности рассеивается стенками, если потребляемая печью мощность составляет $1,5 \text{ кВт}$?

Дано $S=30 \text{ см}^2=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ $T=1,3 \text{ кК}=1,3 \cdot 10^3 \text{ К}$ $P=1,5 \text{ кВт}=1,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$ $P_{\text{рас}}/P$?	Решение $P_{\text{изл}} = R_e S = \sigma T^4 S$ $P_{\text{рас}} = P - P_{\text{изл}} = P - \sigma T^4 S$ $\frac{P_{\text{рас}}}{P} = 1 - \frac{\sigma T^4 S}{P}$
---	---

Ответ: $P_{\text{рас}}/P=0,676$

2. Принимая Солнце за черное тело и, учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны $\lambda = 500 \text{ нм}$, определить: 1.- температуру поверхности Солнца; 2.- энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 мин ; 3.- массу, теряемую Солнцем за это время за счет излучения.

Дано $\lambda=500 \text{ нм}=5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $t=10 \text{ мин}=600 \text{ с}$ $R_c=6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$ $m_c=1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ T ? W ? m ?	Решение $\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}, W = R_e S t = \sigma T^4 \cdot 4\pi R_c^2 t, m = \frac{W}{c^2}$
---	---

Ответ: $T=5,8 \text{ кК}, W = 2,34 \cdot 10^{29} \text{ Дж}, m=2,6 \cdot 10^{12} \text{ кг}$

3. Определить, какая длина волны соответствует максимальной спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda, T})_{\text{max}}$ равной $1,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^3$

Дано $(r_{\lambda, T})_{\text{max}} = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^3$ $C=1,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К}^5)$ λ_{max} ?	Решение $(r_{\lambda, T})_{\text{max}} = C T^5, \lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}, T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}, (r_{\lambda, T})_{\text{max}} = C \left(\frac{b}{\lambda_{\text{max}}} \right)^5,$ $(r_{\lambda, T})_{\text{max}} \lambda_{\text{max}}^5 = C b^5, \lambda_{\text{max}} = b \sqrt[5]{\frac{C}{(r_{\lambda, T})_{\text{max}}}}$
--	--

Ответ: $\lambda_{\text{max}}=183 \text{ мкм}$

4. Для вольфрамовой нити при температуре $T=3500 \text{ К}$ поглощательная способность $A_T=0,35$. Определить радиационную температуру нити.

Дано $T=3500 \text{ К}$ $A_T=0,35$	Решение $R_T = A_T \sigma T^4, R_T = \sigma T_p^4, A_T \sigma T^4 = \sigma T_p^4, T_p^4 = A_T T^4, T_p = T \sqrt[4]{A_T}$
--	--

T_p -?

Ответ: $T_p=2,69$ кК

5. Калий освещается монохроматическим светом с длиной волны 400 нм. Определить наименьшее задерживающее напряжение, при котором фототок прекратится. Работа выхода электронов из калия равна 2,8 эВ.

Дано

$$\lambda=400\text{нм}=4\cdot 10^{-7}\text{м}$$

$$A=2,2\text{эВ}=3,52\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$$

$$e=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$$

$$h=6,63\cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$$

U_0 -?

Решение

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad \frac{m\nu_{\max}^2}{2} = eU_0, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad \frac{hc}{\lambda} = A + eU_0,$$

$$U_0 = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A}{e}$$

Ответ: $U_0=0,91$ В

6. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определить работу выхода электронов (в эВ) из этой пластинки.

Дано

$$A_1=6,3\text{ эВ}$$

$$U_1=3,7\text{ В}$$

$$U_2=5,3\text{ В}$$

A_2 -?

Ответ $A_2=4,7$ эВ

Решение

$$h\nu = A_1 + eU_1, \quad h\nu = A_2 + eU_2,$$

$$A_1 + eU_1 = A_2 + eU_2, \quad A_2 = A_1 + eU_1 - eU_2$$

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

Дано

$$e=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$$

$$U=9,8\text{ В}$$

$$p_e=p$$

λ -?

Ответ $\lambda=392$ нм

Решение

$$eU = \frac{m_e\nu^2}{2}, \quad \nu = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}, \quad p_e = m_e\nu = \sqrt{2m_e eU}, \quad p = \frac{h}{\lambda}, \quad p = p_e,$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

8. Давление p монохроматического света с длиной волны $\lambda=600$ нм на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающему излучению, составляет 0,1 мкПа. Определить: 1) концентрацию n фотонов в световом пучке; 2) число N фотонов, падающих каждую секунду на 1 м^2 поверхности.

Дано

$$p=0,1\text{ мкПа}=10^{-7}\text{ Па}$$

$$\lambda=600\text{ нм}=6\cdot 10^{-7}\text{ м}$$

Решение

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho), \quad n = \frac{\omega}{\varepsilon}, \quad \omega = \frac{p}{1 + \rho}, \quad \varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$\rho=0$
 $t=1 \text{ с}$
 $S=1 \text{ м}^2$

$$n = \frac{\lambda p}{hc(1+\rho)}, W = E_e St = \frac{hc}{\lambda} N, E_e = \frac{pc}{1+\rho},$$

$$N = E_e = \frac{E_e St \lambda}{hc} = \frac{pcSt\lambda}{hc(1+\rho)} = \frac{pSt\lambda}{h(1+\rho)}, N = ncSt$$

$n=?$
 $N=?$

Ответ $n=3,02 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-3}$
 $N=9,06 \cdot 10^{19}$

9. Фотон с энергией $\varepsilon = 1,025 \text{ МэВ}$ рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроном. Определить угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной комптоновской длине волны $\lambda_C = 2,43 \text{ нм}$.

Дано

$\varepsilon = 1,025 \text{ МэВ} = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$
 $\lambda' = \lambda_C$
 $\lambda_C = 2,43 \text{ нм} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

$\vartheta = ?$

Решение

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \lambda = \frac{hc}{\varepsilon}, \lambda' = \lambda + \lambda_C(1 - \cos \vartheta),$$

$$\lambda_C = \frac{hc}{\varepsilon} + \lambda_C(1 - \cos \vartheta), \cos \vartheta = \frac{hc}{\lambda_C \varepsilon}, \vartheta = \arccos\left(\frac{hc}{\lambda_C \varepsilon}\right)$$

Ответ $\vartheta = 60^\circ$

Задачи для самостоятельного решения

Фотоэлектрический эффект

1. На две металлические пластины, работа выхода электронов, с поверхности которых равны 3 и 4 эВ соответственно, падают фотоны с энергией 5 эВ. Во сколько раз максимальная скорость электронов, вылетающих из первой пластины, больше, чем из второй?
2. При увеличении в 2 раза частоты падающего на металл света задерживающее напряжение для электронов увеличивается в 4 раза. Определить длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта, если первоначальная длина волны 600 нм.
3. При увеличении в 2 раза энергии фотонов, падающих на металлическую пластинку, максимальная кинетическая энергия вылетающих электронов увеличилась в 3 раза. Определить в эВ работу выхода электронов, если начальная энергия фотонов 10 эВ.
4. Длина волны ультрафиолетового света, падающего на металлическую пластинку, уменьшилась с 250 до 125 нм. Во сколько раз изменилась максимальная кинетическая энергия вылетающих электронов, если работа выхода равна 3,3 эВ?
5. При изменении длины волны монохроматического излучения, освещающего фотокатод, максимальная скорость вылетающих электронов увеличилась в 2 раза. Найти конечную длину волны излучения, если начальная длина волны излучения равнялась 400 нм, а красная граница фотоэффекта для материала фотокатода составляет 600 нм.
6. Пучок ультрафиолетовых лучей с длиной волны $\lambda=0,33$ мкм и мощностью 10 мкВт падает на фотокатод. Определите в мкА силу фототока, если фотоэффект вызывают лишь 3% падающих фотонов.
7. При фотоэффекте с поверхности платины величина задерживающего потенциала оказалась равной 0,8 В. Найти длину волны используемого света, если работа выхода платины равна 5,3 эВ.
8. Цинковую пластинку ($A_{\text{вых}}=4,0$ эВ) освещают ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda=30$ нм. Определить, на какое минимальное расстояние от пластинки может удалиться фотоэлектрон, если вне пластинки имеется задерживающее однородное электрическое поле напряженностью 10 В/см.

9. Свет с длиной волны $\lambda=232$ нм вырывает с поверхности платины электрон. Определить суммарный импульс, сообщаемый при этом платине, если электрон вылетает на встречу падающему фотону. Работа выхода платины равна $5,30$ эВ.
10. При освещении катода вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=310$ нм фототок прекращается при некотором задерживающем напряжении. При увеличении длины волны на 25% задерживающее напряжение оказывается меньше на $0,8$ В. Определить постоянную Планка.
11. Фотоны с энергией 5 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода $4,7$ эВ. Определите минимальный импульс, передаваемый поверхности этого металла при вылете электрона.
12. Плоский серебряный электрод освещается монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda=83$ нм. Определите, на какое максимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если имеется задерживающее электрическое поле напряженностью 10 В/см. Красная граница фотоэффекта для серебра 264 нм.
13. Определите, до какого потенциала зарядится уединенный серебряный шарик при облучении его ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda=208$ нм. Работа выхода серебра $4,7$ эВ.
14. При освещении монохроматическим светом с длиной волны $0,4$ мкм вакуумный фотоэлемент заряжается до разности потенциалов 2 В. До какой разности потенциалов зарядится фотоэлемент, при освещении его светом с длиной волны $\lambda=0,3$ мкм.
15. При поочередном освещении поверхности металла светом с длиной волны $\lambda_1=0,35$ мкм $\lambda_2=0,54$ мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в 2 раза. Найти работу выхода этого металла.
16. До какого максимального потенциала зарядится удаленный от других тел медный шарик при облучении его электромагнитным излучением с $\lambda=140$ нм, если работа выхода меди равна $4,47$ эВ?
17. Электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda=0,30$ мкм падает на фотоэлемент, находящийся в режиме насыщения. Соответствующая спектральная чувствительность фотоэлемента равна $4,8$ мА/Вт. Найти выход фотоэлектронов, т.е. число фотоэлектронов на каждый падающий фотон.

Эффект Комптона

18. Определить угол рассеяния γ -кванта при столкновении со свободным неподвижным электроном, если изменение длины волны при рассеянии составляет $2,1 \text{ нм}$.
19. В результате упругого столкновения γ -кванта со свободным неподвижным электроном γ -квант был рассеян на угол 30° к первоначальному направлению движения. Энергия рассеянного γ -кванта $1,5 \text{ МэВ}$. Найти начальную энергию γ -кванта.
20. Определить изменение длины волны γ -кванта при комптоновском рассеянии на свободном неподвижном электроне, если рассеяние произошло на угол 60° . Какова энергия рассеянного γ -кванта если до рассеяния энергия составляла $3,2 \text{ МэВ}$?
21. В результате комптоновского рассеяния энергия падающего фотона распределилась поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен 90° . Определить энергию и импульс рассеянного фотона.
22. Рентгеновский фотон, характеризуемый частотой $\nu=1,5 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$, при комптоновском столкновении с электроном потерял 10% своей энергии. Определить энергию и длину волны падающего и рассеянного фотона.
23. Фотон рассеялся под углом $\theta=120^\circ$ на покоившемся свободном электроне, в результате чего электрон получил кинетическую энергию $E=0,45 \text{ МэВ}$. Найти энергию фотона до рассеяния.
24. Найти длину волны рентгеновского излучения, если максимальная кинетическая энергия комптоновских электронов отдачи равна $0,19 \text{ МэВ}$.
25. Фотон с энергией $\hbar\omega=0,15 \text{ МэВ}$ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего его длина волны изменилась на $\Delta\lambda=3,0 \text{ нм}$. Найти угол, под которым вылетел комптоновский электрон отдачи.
26. Фотон, испытав столкновение с релятивистским электроном, рассеялся под углом $\theta=60^\circ$, а электрон остановился. Найти комптоновское смещение длины волны рассеянного фотона.
27. Фотон длины волны $\lambda=700 \text{ нм}$ рассеивается под углом $\pi/2$ на свободном покоящемся электроне. Определить какую долю первоначальной энергии теряет при этом фотон.

28. Фотон длины волны $\lambda=700$ нм рассеивается под углом $\pi/2$ на свободном покоящемся электроне. Определить какую скорость приобретает электрон.
29. Узкий пучок монохроматического излучения падает на рассеивающее вещество. Оказывается, что длины волн рассеянного под углами $\theta_1=60^\circ$ и $\theta_2=120^\circ$ излучения отличаются в 1,5 раза. Определить длину волны падающего излучения, предполагая, что рассеяние происходит на свободных электронах.
30. Фотон с длиной волны $\lambda=5$ нм испытал комптоновское рассеяние под углом $\theta=90^\circ$ на первоначально покоившемся свободном электроне. Определить изменение длины волны при рассеянии и импульс электрона отдачи.
31. Фотон с энергией $\varepsilon=0,25$ МэВ рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Определите кинетическую энергию электрона отдачи, если длина волны рассеянного фотона изменилась на 20%.
32. Фотон с энергией $0,3$ МэВ рассеялся под углом 180° на свободном электроне. Определите долю энергии падающего фотона, приходящуюся на рассеянный фотон.
33. Фотон с энергией 100 кэВ в результате комптоновского эффекта рассеялся при соударении со свободным электроном на угол $\pi/2$. Определить энергию фотона после рассеяния.
34. Фотон с энергией $\varepsilon=0,25$ МэВ рассеялся под углом $\theta=120^\circ$ на первоначально покоившемся электроне. Определите кинетическую энергию электрона отдачи.
35. Фотон с энергией $\varepsilon=1,025$ МэВ рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Определите угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной комптоновской длине волны $\lambda_C=2,43$ нм.
36. Определите длину волны излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения под углом $\theta=60^\circ$ длина волны рассеянного излучения оказалась равной 57 пм.
37. Определить какую энергию будет иметь γ -квант после рассеяния под углом 180° на свободном электроне, если его энергия до столкновения равнялась $1,5$ МэВ.
38. Угол рассеяния фотона на свободном электроне равен 30° . Угол отдачи электрона равен 30° , а скорость электронов отдачи равна $2,5 \cdot 10^4$ м/с. Определите энергию падающего фотона, его массу, импульс и частоту.
39. Фотон с длиной волны $\lambda = 5$ нм испытал комптоновское рассеяние под углом $\theta = 90^\circ$ на первоначально покоившемся электроне. Определить: 1) изменение длины волны при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс электрона отдачи.

Тепловое излучение

40. Для повышения температуры верхнего слоя почвы ее поверхность покрыли угольным порошком, в результате чего установилась температура $t=27^{\circ}\text{C}$. Определить испускательную способность этой поверхности (угольной мульчи), если ее поглощательная способность при данной температуре равна 0,88.
41. Смотровое окно плавильной печи имеет площадь 6 см^2 . Какое количество лучистой энергии уходит из печи через это окно за 1 мин , если температура печи 1000 К ?
42. Абсолютно черное тело (АЧТ) изготовлено в виде полости с малым отверстием радиусом $r=5\text{ мм}$. Полость нагревают изнутри током, проходящим по вольфрамовой спирали. Это нагреватель потребляет мощность $N=100\text{ Вт}$, 10% которой рассеивается в окружающую среду через стенки. Найти температуру T , установившуюся внутри полости.
43. Считая Солнце абсолютно черным телом, определить, сколько энергии оно излучает за 1 с. Температура солнечной поверхности 6000 К , радиус Солнца $R_C=6,95\cdot 10^8\text{ м}$.
44. Длина волны, соответствующая максимуму излучения, равна для Солнца $0,48\text{ мкм}$, для Полярной звезды $0,35\text{ мкм}$ и для Сириуса – $0,29\text{ мкм}$. Определить температуры поверхностей этих звезд.
45. При охлаждении АЧТ длина волны, соответствующая максимуму его излучения увеличилась от $0,4$ до $0,7\text{ мкм}$. Во сколько раз уменьшилась при этом испускательная способность тела?
46. Определить излучательную способность Земли и длину волны, соответствующую максимуму ее излучения. Считать Землю АЧТ с температурой поверхности 7°C .
47. Количество энергии, ежесекундно посылаемое Солнцем через площадку $S=1\text{ м}^2$, расположенную перпендикулярно солнечным лучам на верхней границе земной атмосферы, называется солнечной постоянной W_0 . Определить величину солнечной постоянной, считая Солнце АЧТ с $T=5800\text{ К}$. Радиус Солнца $R_C=6,95\cdot 10^8\text{ м}$, расстояние от Солнца до Земли $r=1,5\cdot 10^{11}\text{ м}$.
48. Для вольфрамовой нити при $T=3500\text{ К}$ поглощательная способность $A_T=0,35$. Определите радиационную температуру нити.
49. Используя формулу Планка, определите спектральную плотность потока излучения единицы поверхности черного тела, приходящегося на узкий интервал

длин волн $\Delta\lambda=5$ нм около максимума спектральной плотности энергетической светимости, если температура черного тела $T=2500$ К.

50. Считая, что тепловые потери обусловлены только излучением, определите, какую мощность необходимо подводить к медному шариком диаметром $d=2$ см, чтобы при температуре окружающей среды $t_0=-13^\circ\text{C}$ поддерживать его температуру равной $t=17^\circ\text{C}$. Принять поглотительную способность меди $A_T=0,6$.
51. Определите температуру тела, при которой оно излучает энергии в 10 раз больше, чем поглощает. Температура окружающей среды $t_0=27^\circ\text{C}$.
52. Считая никель абсолютно черным телом, определите мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля 1453°C неизменной, если площадь его поверхности равна $0,5$ см². Потерями энергии пренебречь.
53. Определите, как и во сколько раз изменится мощность излучения АЧТ, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с 720 нм до 400 нм.
54. Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии площадью 30 см² равна 1300 К. Принимая, что отверстие печи излучает как АЧТ, определите, какая часть мощности рассеивается стенками, если потребляемая печью мощность составляет $1,5$ кВт.
55. Имеются два абсолютно черных источника теплового излучения. Температура одного из них 2500 К. Найдите температуру другого источника, если длина волны, отвечающего максимуму его испускательной способности, на $\Delta\lambda=0,50$ мкм больше длины волны, соответствующей максимуму испускательной способности первого источника.
56. Поток энергии, излучаемый из смотрового окошка плавильной печи, равен 34 Вт. Определить температуру T печи, если площадь отверстия равна 8 см². Смотровое окошко печи излучает как абсолютно черное тело.
57. Эталон единицы силы света – канделла – представляет собой излучатель, поверхность которого (площадью $0,5305$ мм²) имеет температуру, равную температуре затвердевания платины 1063°C . Определите мощность эталона, если он излучает все длины волн, а оптические свойства его поверхности аналогичны АЧТ.
58. Какая мощность солнечного излучения попадает на квадратный метр земной поверхности вблизи экватора, когда Солнце находится в зените? Поверхность Солнца излучает как АЧТ температурой 5500 К. Радиус Солнца $R_C=6,95\cdot 10^8$ м, расстояние от Солнца до Земли $r=1,5\cdot 10^{11}$ м.

59. Пользуясь формулой Планка, $r_{\lambda,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ доказать, что в области малых частот ($h\nu \ll kT$) она совпадает с формулой Рэля—Джинса.
60. Пользуясь формулой Планка $r_{\lambda,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ вывести из неё закон Стефана—Больцмана.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Приставка			Приставка		
Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санتي	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

2. ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
A, α	альфа	N, ν	ню
B, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гамма	Ο, ο	омикрон
Δ, δ	дельта	Π, π	пи
E, ε	эпсилон	Ρ, ρ	ро
Z, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
Η, η	эта	Τ, τ	тау
Θ, θ	тэта	Υ, υ	ипсилон
I, ι	йота	Φ, φ	фи
K, κ	каппа	Χ, χ	хи
Λ, λ	лямбда	Ψ, ψ	пси
M, μ	мю	Ω, ω	омега

3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Постоянная (число) Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar = h/2\pi$	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м ² ·К ⁴
Постоянная закона смещения Вина	b	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Ридберга	R	$3,29 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹
	R'	$1,1 \cdot 10^7$ м ⁻¹

Масса электрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Комптоновская длина волны электрона	λ_k	$2,43 \cdot 10^{-22}$ м
Радиус первой боровской орбиты	a	$5,29 \cdot 10^{-11}$ м
Масса протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,16 \cdot 10^{-18}$ Дж

4. СКОРОСТЬ ЗВУКА, м/с

Вода	1450
Сухой воздух	332

5. ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕД, n

Азот	1,0003
Воздух	1,00029
Кислород	1,00027
Лед	1,31
Вода	1,33
Глицерин	1,47
Скипидар	1,48
Бензол	1,5
Стекло	1,5-1,9
Масло	1,6
Сероуглерод	1,63
Алмаз	2,42
Кварц плавленный	1,46
Стекло	1,5

6. РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА, A (эВ)

Цезий	1,89
Калий	2,0
Барий	2,29
Натрий	2,3
Литий	2,39
Цинк	3,74
Титан	3,92
Вольфрам	4,5
Кобальт	4,25
Молибден	4,27
Серебро	4,28
Медь	4,47
Золото	4,58
Висмут	4,62
Никель	4,84
Платина	5,29

7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, ϵ

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Парафиновая бумага	2,0	Масло трансформаторное	2,2
Стекло	7,0	Эбонит	3,0
Слюда	7,5	Резина	2,5
Вода	81	Керосин	2
Воздух	1,00058	Плексиглас	3,5
Воск	7,8	Спирт	26
Стекло	6	Фарфор	6

8. ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Естественное вращение в кварце Магнитное вращение ($\lambda = 589$ нм)

λ , нм	ϕ , град/мм	Жидкость	постоянная Верде - V, угл. мин/А
404,7	2,0	Бензол	2,59
435,9	7,0	Вода	0,016
491,6	7,5	Сероуглерод	0,053
589,5	81	Спирт этиловый	1,072
656,3	1,00058		
670,8	7,8		

СОДЕРЖАНИЕ

1. Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны. Основные формулы.	3
• Примеры решения задач	5
• Задачи для самостоятельного решения. Ток смещения	7
• Электромагнитные волны. Перенос энергии электромагнитным полем	9
2. Интерференция света. Основные формулы	11
• . Примеры решения задач	14
• Задачи для самостоятельного решения. Временная и пространственная когерентности	17
• Интерференция когерентных волн	19
• Опыт Юнга. Тонкие пленки. Полосы равного наклона	21
• Полосы равной толщины. Кольца Ньютона	22
• Интерферометры	24
3. Дифракция света. Основные формулы.	26
• Примеры решения задач	28
• Задачи для самостоятельного решения. Дифракция на щели. Дифракционная решетка	30
• Дифракция на кристаллической решетке	34
• Разрешающая способность оптических приборов. Линейная и угловая дисперсии	36
4. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом. Основные формулы	38
• Примеры решения задач	39
• Задачи для самостоятельного решения. Фазовая и групповая скорости	41
• Классическая теория дисперсии. Эффект Вавилова – Черенкова	44
5. Поляризация света. Основные формулы	46
• . Примеры решения задач	51
• Задачи для самостоятельного решения. Степень поляризации света. Коэффициенты отражения и пропускания.	54
• Закон Малюса.	54
• Закон Брюстера.	55
• Поляризация при двойном лучепреломлении.	56
• Вращение плоскости поляризации	57
6. Квантовая природа излучения. Основные формулы.	58
• Примеры решения задач	61
• Задачи для самостоятельного решения. Фотоэлектрический эффект.	64
• Эффект Комптона	66
• Тепловое излучение	68
7. Приложения.	71
8. Содержание	74
9. Список литературы	75

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М., Лань , 2006
2. Иродов И.Е.. «Задачи по общей физике» СПб., М., Лань , 2006
3. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике. – М.: Высш. шк., 1991
4. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. СПб.: Книжный мир, 2005.
5. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. М.: Высшая школа, 2006.
6. Сена Л. А. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Высш. шк., 1986.
7. Козел С. М., Рашба Э. И., Славатинский С. А. Сборник задач по физике. – М.: Наука, 1987.
8. . Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике. М.: Физ.мат.лит, 2003.
9. Е. И. Бабаджан, В. И. Гервидс, В. М. Дубовик, Э. А. Нерсесов. Сборник качественных вопросов и задач по общей физике .. – М.: Наука, 1990.
10. Калитиевский Н.И. «Волновая оптика». СПб., М., Лань , 2006