ВВЕДЕНИЕ

В условиях значительного сокращения лекций и часов, отводимых на практические занятия по физике, единственным способом улучшить усвоение материала учебной программы является самостоятельная работа студента. В решении этой проблемы может помочь выполнение студентом индивидуального расчетно-графического задания (РГР). При выполнении РГР студенту приходится сочетать теоретические знания и практические навыки решения задач. Кроме того, у него формируется умение определить, описать и объяснить физические понятия, явления, процессы и величины.

При этом студент приобретает следующие навыки:

- проводить самостоятельный поиск необходимой информации с использованием учебных, справочных и научно-популярных изданий, ресурсов Интернета;
- применять математический аппарат для аналитического решения физических задач;
- анализировать, выполнять сравнительную оценку и делать выводы по результатам своей работы;
- использовать в решениях и представлении результатов (в виде рисунков, схем, таблиц и графиков) компьютерное программное обеспечение.

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов в данном пособии приведены краткие теоретические сведения и разобраны примеры решения и оформления задач.

В приложении представлены справочные материалы, рекомендации к решению задач и содержанию отчета по РГР.

Студентам предлагается решить 3 расчетно-графических задания, которые предполагают рассмотрение трех типовых задач по следующим темам:

1. «Интерференция».
2. «Дифракция».
3. «Поляризация».

1. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА И К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАСЧЕТНО – ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

При выполнении расчетно-графических работ по общей физике рекомендуется оформить отчет в печатном виде на листах формата А4 следующего содержания:

1. Титул в соответствии с требованиями вуза.
2. Формулировка задания в соответствии со своим вариантом.
3. Теоретические основы работы.

В краткое содержание теоретической части работы необходимо включить:

- явления или процессы, изучаемые в РГР.
- определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
- законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы.
- пояснение к физическим величинам, входящим в формулы, и единицы их измерения.

4. Решение задач РГР.

При решении задач необходимо:

– выполнить рисунок или начертить схему;

– сопровождать применяемые формулы и законы пояснениями, мотивирующими решение;

– представить результат в общем виде, т. е. преобразовать выражение для определяемой величины так, чтобы в него входили лишь буквенные обозначения величин, заданных в условии задачи, и необходимые физические константы;

– проверить размерность полученного результата;

– выполнить необходимые вычисления и представить результат в Международной системе единиц;

– сформулировать полный ответ в соответствии с вопросом задачи.

5. Графический материал.

– представить таблицы с данными для построения графиков;

– указать аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить;

– указать на осях координат физические величины и единицы их измерения.

6. Анализ и выводы по результатам работы.

2. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К РАЗДЕЛУ «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»

Основные формулы[1]

1. Характеристики волны

Волной называется процесс распространения колебаний в пространстве. Волны могут быть различной физической природы (механические, электромагнитные, гравитационные, волны на поверхности жидкости), но описываются они одинаковыми по структуре уравнениями.

Волновая поверхность – геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе.

Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых дошла волна, т. е. самая первая волновая поверхность. По форме волновой поверхности волны разделяют на плоские, сферические и цилиндрические.

Бегущая волна – такая волна, у которой волновые поверхности перемещаются в пространстве.

В продольной волне колебания происходят вдоль направления распространения волны, в поперечной волне – перпендикулярно направлению распространения волны.

В электромагнитной волне колеблются векторы напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей. Направления их колебаний всегда взаимно перпендикулярны, а плоскость, в которой они колеблются, перпендикулярна направлению распространения волны (вектору фазовой скорости $\vec{v}$). Векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{v}$ образуют правовинтовую систему. Будем считать, что волна распространяется

[1] В данном разделе приведены формулы и законы, которые могут оказаться полезными при решении только данного РГР.

вдоль оси X со скоростью $\vec{v}$, тогда вектор $\vec{E}$ направлен параллельно оси Y, а вектор $\vec{H}$ – параллельно оси Z.

Волновое уравнение электромагнитных волн:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2},$$

где $v = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ – скорость электромагнитной волны в среде (здесь $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость электромагнитной волны в вакууме; ε – диэлектрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость среды; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная).

Волновое число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v},$$

где λ – длина волны; v – скорость волны в среде (фазовая скорость).

Уравнение плоской бегущей электромагнитной волны:

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0);$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где E_m – амплитудное значение напряженности электрического поля; H_m – амплитудное значение напряженности магнитного поля; ω – частота волны; k – волновое число; x – расстояние от источника волны до той точки, в которой измеряются E_y и H_z; φ_0 – начальная фаза. Колебания электрического и магнитного векторов в бегущей электромагнитной волне происходят в одной фазе.

Связь модулей электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне:

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

Уравнение бегущей плоской гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси OX:

$$E=E_m\cos\left(\omega t-k\,x+\varphi_0\right).$$

Уравнение бегущей плоской гармонической волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси OX :

$$E=E_m\cos\left(\omega t+k\,x+\varphi_0\right).$$

Уравнение бегущей сферической гармонической волны, излучаемой осциллирующим диполем:

$$E=\frac{E_m\sin\vartheta}{r}\cos\left(\omega t-k\,r+\varphi_0\right),$$

где r – расстояние от центра диполя до точки, где наблюдается поле; ϑ – угол между направлением дипольного момента и направлением на точку наблюдения поля.

Фаза плоской волны

$$\Phi=\omega t-k\,x+\varphi_0\ .$$

Связь между разностью фаз $\Delta\Phi$ и разностью хода Δ двух волн:

$$\Delta\Phi=\frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta\ .$$

где λ_0 – длина волны в вакууме.

Объемная плотность энергии электромагнитных волн

$$w=\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}V}=\frac{\varepsilon\varepsilon_0E^2}{2}+\frac{\mu\mu_0H^2}{2}=\varepsilon\varepsilon_0E^2=\mu\mu_0H^2=\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}EH=\frac{EH}{v},$$

где W – энергия электромагнитной волны; V – объем среды.

Вектор плотности потока энергии для электромагнитной волны (вектор Умова–Пойнтинга)

$$\vec{S} = w\vec{v}; \qquad \vec{S} = \left[\vec{E}, \vec{H}\right].$$

Интенсивность волны – среднее значение плотности потока энергии волны, где усреднение выполняется за большой промежуток времени, а для гармонических волн – за целое число периодов.

Интенсивность электромагнитной волны

$$I = \left\langle \left|\vec{S}\right| \right\rangle = \langle w \rangle v .$$

Для сферической электромагнитной волны интенсивность

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} \left(\frac{E_m}{r}\right)^2 ,$$

где E_m – амплитудное значение напряженности электрического поля источника; r – расстояние от источника.

2. Интерференция

Интерференция волн – это явление, возникающее при наложении когерентных, одинаково поляризованных волн и заключающееся в том, что интенсивность результирующей волны больше или меньше суммы интенсивностей складываемых волн.

Интенсивность результирующей волны при наложении двух когерентных волн

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi ,$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз двух волн.

Связь между разностью фаз $\Delta\varphi$ и разностью хода Δ двух волн:

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

где λ_0 – длина волны в вакууме.

В оптике оптическая разность хода двух волн – разность оптических путей:

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

Оптический путь – произведение показателя преломления среды n на путь S, пройденный световой волной в данной среде:

$$L = nS.$$

Условие существования интерференционного максимума:

$$\Delta\varphi = \pm 2\pi m \qquad \text{или} \qquad \Delta = \pm 2m\,\frac{\lambda_0}{2},$$

где m – порядок интерференционного максимума, $m = 0, 1, 2...$; λ_0 – длина волны в вакууме.

Интенсивность результирующей волны в точках интерференционного максимума

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} > I_1 + I_2.$$

Условие существования интерференционного минимума:

$$\Delta\varphi = \pi \pm 2\pi m \qquad \text{или} \qquad \Delta = \pm(2m+1)\,\frac{\lambda_0}{2},$$

где m – порядок интерференционного минимума, $m = 0, 1, 2...$; λ_0 – длина волны в вакууме.

Интенсивность результирующей волны в точках интерференционного минимума

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} < I_1 + I_2.$$

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой плоскопараллельной пластинки,

$$\Delta = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2\alpha} - \frac{\lambda_0}{2}$$

где d – толщина пластинки; n_1 – показатель преломления среды, из которой падает свет на пластинку; n_2 – показатель преломления вещества пластинки; α – угол падения; слагаемое $\lambda_0/2$ появляется только при отражении света от границы раздела с оптически более плотной средой

Оптическая разность хода двух лучей, прошедших через плоскопараллельную пластинку,

$$\Delta = 2dn\cos\gamma,$$

где γ – угол преломления; n – показатель преломления вещества пластинки.

Радиусы светлых $r_m^{\text{св}}$ и темных $r_m^{\text{т}}$ колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_m^{\text{св}} = \sqrt{(2m-1)\frac{R\lambda_0}{2n}}; \qquad r_m^{\text{т}} = \sqrt{m\frac{R\lambda_0}{n}},$$

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

3. Дифракция

Дифракция волн – это явление огибания волнами препятствий, т. е. проникновение волн в область геометрической тени. Дифракция является результатом многолучевой интерференции.

Радиусы зон Френеля на сферической волновой поверхности

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

где a – радиус волновой поверхности; b – расстояние от вершины волновой поверхности до точки наблюдения; m – номер зоны, $m = 1, 2, 3...$

Радиусы зон Френеля на плоской волновой поверхности

$$\rho_m = \sqrt{m b \lambda} ,$$

где m – номер зоны, $m = 1, 2, 3...$; b – расстояние от точки наблюдения до волновой поверхности.

Амплитуда колебаний в центре экрана при дифракции Френеля от круглого отверстия

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \ldots - (-1)^m A_m = \frac{A_1}{2} - (-1)^m \frac{A_m}{2} ,$$

где A_1 – амплитуда колебаний, создаваемых первой зоной; m – число видимых зон Френеля, открываемых отверстием; A_m – амплитуда колебаний, создаваемых последней открытой зоной.

Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера на бесконечно длинной прямоугольной щели

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\dfrac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right)}{\left(\dfrac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right)^2} ,$$

где I_φ – интенсивность в точке, положение которой определяется значением угла φ; I_0 – интенсивность в середине дифракционной картины $(\varphi = 0)$; b – ширина щели (рис. 1).

Условие существования дифракционных минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$b \sin\varphi = \pm m \lambda,$$

где b – ширина щели; φ – угол между нормалью к поверхности щели и направлением на точку экрана, в которой наблюдается дифракционная картина; m – порядок дифракционного минимума, $m = 1, 2, 3...$

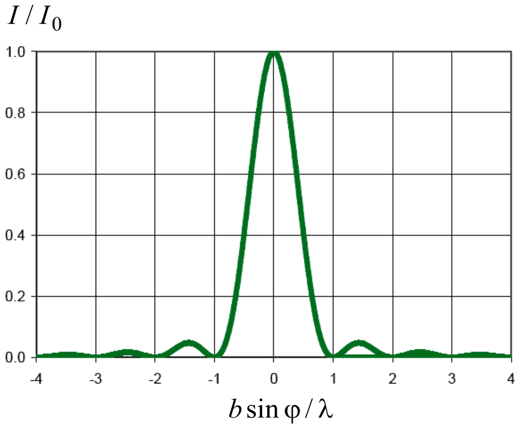

Рис. 1. Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера на бесконечно длинной прямоугольной щели

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

$$b \sin \varphi \approx \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где m – порядок дифракционного максимума, $m = 1, 2, 3...$; φ – угол между нормалью к поверхности щели и направлением на точку экрана, в которой наблюдается дифракционный максимум.

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

$$\left(\frac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right) - \sin\left(\frac{\pi b \sin\varphi}{\lambda}\right) = 0.$$

Период дифракционной решетки (постоянная дифракционной решетки)

$$d = a + b = \frac{l}{N},$$

где a – часть дифракционной решетки между щелями; b – ширина одной щели; l – длина дифракционной решетки; N – число щелей дифракционной решетки.

Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке:

$$I_{\text{реш}} = I_{\varphi}\frac{\sin^2\left(\dfrac{N\pi d\sin\varphi}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\dfrac{\pi d\sin\varphi}{\lambda}\right)} = I_0\frac{\sin^2\left(\dfrac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}\right)}{\left(\dfrac{\pi b\sin\varphi}{\lambda}\right)^2}\frac{\sin^2\left(\dfrac{N\pi d\sin\varphi}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\dfrac{\pi d\sin\varphi}{\lambda}\right)},$$

где $I_{\text{реш}}$ – интенсивность в точке, положение которой определяется значением угла φ; I_{φ} – интенсивность, создаваемая одной щелью в направлении φ; I_0 – интенсивность, создаваемая одной щелью в середине дифракционной картины; d – период решетки; b – ширина одной щели (рис. 2).

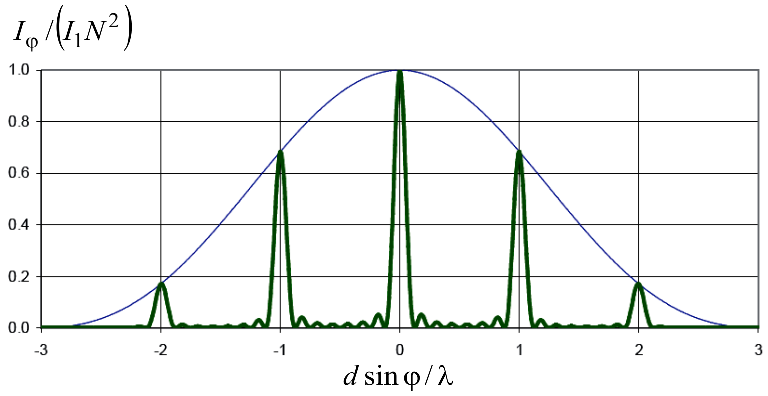

Рис. 2. Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера на решетке с $d = 3a$ и $N = 8$. Огибающей кривой служит зависимость $I_1(\varphi)$, полученная для дифракции на одной щели

Условие существования главных дифракционных минимумов для дифракционной решетки, на которую свет падает нормально (совпадает с условием для одной щели):

$$b\sin\varphi = \pm m\lambda,$$

где b – ширина одной щели; φ – угол между нормалью к поверхности дифракционной решетки и направлением на точку экрана, в которой наблюдается дифракционный минимум; m – порядок дифракционного минимума, $m = 1,\ 2,\ 3...$

Условие существования главных дифракционных максимумов для дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d\sin\varphi = \pm m\lambda,$$

где d – период решетки; φ – угол между нормалью к поверхности дифракционной решетки и направлением на точку экрана, в которой наблюдается дифракционный максимум; m – порядок дифракционного максимума, $m = 1,\ 2,\ 3...$

Условие дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d\sin\varphi = \pm \frac{m'}{N}\lambda,$$

где m' – порядок дополнительного дифракционного минимума, $m' = 1, 2, 3\,...$, но $m' \neq N, 2N, 3N\,...$; N – число щелей дифракционной решетки.

Разрешающая способность оптических приборов – способность оптических приборов давать раздельное изображение двух близких друг к другу точек предмета.

Разрешающая способность спектрального прибора

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

где $\Delta\lambda$ – абсолютное значение минимальной разности длин волн двух соседних спектральных линий, при которой эти линии регистрируются раздельно.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = mN,$$

где m – порядок спектра; N – число щелей дифракционной решетки.

4. Поляризация

Поляризованная волна – это такая волна, в которой колебания каким-либо образом упорядочены, например, происходят в одной плоскости. Поляризованными могут быть только поперечные волны. Световая волна, во всех точках которой световой вектор (вектор $\vec{E}$) колеблется только в одном направлении, называется плоскополяризованной или линейно поляризованной и является полностью поляризованной волной. Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора и направление распространения волны, называется плоскостью поляризации.

Световая волна, в которой существуют всевозможные равновероятные направления колебаний светового вектора, называется неполяризованной или естественным светом.

Свет, состоящий из полностью поляризованного и естественного, называется частично поляризованным и характеризуется степенью поляризации.

Степень поляризации

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

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимальная и минимальная интенсивность частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Закон Малюса:

$$I = I_{\text{пад}} \cos^2\alpha,$$

где I – интенсивность волны, прошедшей через поляризатор; $I_{\text{пад}}$ – интенсивность линейно поляризованной волны, падающей на поляризатор; α – угол между плоскостью поляризации падающей волны и плоскостью поляризации поляризатора. Если через поляризатор пропустить естественный свет, то из него выйдет линейно поляризованный свет интенсивностью $I = I_{\text{ест}}/2$.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{n_2}{n_1},$$

где α – угол падения волны на границу раздела двух диэлектриков, при котором отраженная волна будет полностью поляризована; n_1 – показатель преломления того диэлектрика, из которого свет падает на границу; n_2 – показатель преломления другого диэлектрика.

Оптическая разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей для пластинки в четверть длины волны

$$\Delta = (n_o - n_e)d = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{4} \qquad (m = 0, 1, 2, 3 \ldots),$$

где n_o и n_e – показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей; d – толщина пластинки; λ_0 – длина волны в вакууме. Знак «плюс» соответствует оптически отрицательным кристаллам, для которых $n_e \le n_o$, «минус» – оптически положительным, для которых $n_e \ge n_o$.

Угол поворота плоскости поляризации:

– для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d,$$

где α – постоянная вращения; d – путь, пройденный в веществе;

– для оптически активных растворов

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

где $[\alpha]$ – удельное вращение; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Закон Бугера (ослабления света в веществе):

$$I = I_0 e^{-\alpha d},$$

где I – интенсивность света, прошедшего через вещество; I_0 – интенсивность света, падающего на вещество; α – коэффициент поглощения; d – путь, пройденный светом в веществе.

3. ТЕМЫ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

3.1. Интерференция

На прозрачный клин, показатель преломления которого равен n, нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны λ. Клин находится в воздухе; преломляющий угол клина α. Толщина клина в том месте, где наблюдается k-я интерференционная полоса равна d_k. Расстояние между соседними интерференционными линиями - b. Соответствующие данные для задачи приведены в таблице 1.

При решении задачи необходимо записать текст условия задачи для своего варианта, нарисовать оптическую схему и ход лучей. Найдите неизвестные величины.

Таблица 1.

Вариант	$\alpha \cdot 10^{-4}$, рад	λ, нм	n	k	b, мм	Полосы
1	3,2	550	1,51	?	1,2	Темные
2	2,6	633	1,52	1	?	Темные
3	?	588	1,50	1	4	Темные
4	5,3	?	1,48	2	0,2	Светлые
5	4,2	440	?	14	9,0	Темные
6	3,5	555	1,52	?	1,5	Светлые
7	4,5	?	1,53	2	0,7	Светлые
8	3,6	?	1,40	3	1,1	Темные
9	?	433	1,46	2	0,4	Светлые
10	15	24	?	?	?	25000
11	3,3	487	1,50	?	1,3	Темные
12	2,7	559	1,52	?	0,8	Светлые
13	4,6	?	1,56	2	1,5	Светлые
14	5,8	?	1,41	1	0,44	Темные
15	?	633	1,50	2	3,1	Темные
16	?	440	1,52	3	2,7	Светлые
17	3,2	567	1,55	?	1,4	Темные
18	2,6	444	1,48	?	2,3	Темные
19	3,1	505	1,50	?	1,4	Светлые

20	?	609	1,52	1	3,4	Светлые
21	?	488	1,50	2	2,7	Темные
22	2,6	540	1,48	1	?	Темные
23	6,0	?	1,51	1	0,33	Светлые
24	4,2	?	1,49	1	0,4	Светлые

3.2. Дифракция

На пропускающую дифракционную решетку с периодом d падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ. На экране, расположенном за собирающей линзой параллельно решетке и отстоящем от нее на расстоянии L, наблюдается дифракционная картина. Расстояние между двумя дифракционными максимумами k -ого и i -ого порядков равно l.

При решении задачи необходимо записать текст условия задачи для своего варианта, определить неизвестные величины, среди которых: $m_{\max}$ - число главных максимумов, которые могут наблюдаться для данной решетки; n - число штрихов на один миллиметр длины, и изобразить распределение интенсивности света вдоль экрана.

Таблица 2.

Вариант	λ, мкм	L, м	l, см	k	i	d, мкм	n, мм$^{-1}$	N
1	0,633	0,45	10	-1	+2	?	?	?
2	0,604	?	2,0	+1	+2	?	80	?
3	0,660	?	3,3	-1	-2	20	?	?
4	?	1,0	6,5	0	+1	?	100	?
5	?	0,45	2,0	+3	+2	40	?	?
6	0,633	1,2	?	+1	+2	20	?	?
7	?	0,88	2,2	-1	0	30	?	?
8	0,550	0,80	?	+1	-2	50	?	?
9	0,488	?	5,3	0	+2	?	?	97
10	0,507	?	3,0	+1	0	?	?	35
11	0,444	2,1	?	-1	+2	?	25	?
12	0,633	?	7,7	+1	-3	?	20	?
13	?	2,3	11	-2	+2	27	?	?

14	0,444	1,7	?	-2	+3	?	17	?
15	0,660	?	3,6	-1	-2	24	?	?
16	0,486	?	4,3	-3	+2	?	?	25
17	0,69	?	0,9	+1	0	?	?	75
18	0,469	2,7	?	-1	+2	?	25	?
19	0,404	?	1,5	-2	+1	?	50	?
20	?	1,2	6,3	0	+1	?	100	?
21	?	0,88	2,4	-1	+1	10	?	?
22	?	0,54	1,1	-3	-2	30	?	?
23	?	2,0	10	-2	+3	30	?	?
24	0,555	1,7	12	+1	+3	?	?	?

3.3. Поляризация

Плоская неполяризованная волна интенсивностью I_0 падает на систему из N поляризаторов. Главные сечения поляризаторов последовательно составляют углы α_1, α_2 друг с другом. Потери интенсивности света вследствие отражения и поглощения в каждом поляризаторе составляют k %. Интенсивность света, прошедшего сквозь оптическую систему равна I .

В таблице 3 приведены известные параметры и те величины, значения которых необходимо определить.

При решении задачи необходимо записать текст условия задачи для своего варианта, нарисовать оптическую схему и взаимное расположение главных плоскостей поляризаторов.

Таблица 3.

Вариант	N	k %	I/I_0	α_1	α_2
1	2	6,5	0,25	?	-
2	2	4,0	0,09	?	-
3	3	5,5	?	30°	45°
4	3	3,7	?	45°	55°
5	2	8,6	0,34	?	-
6	2	?	0,23	45°	-
7	3	4,2	?	30°	60°

8	3	0	?	15°	35°
9	2	5,8	0,27	?	-
10	2	?	0,66	25°	-
11	4	0	?	45°	$\alpha_2 = \alpha_3 = 45^\circ$
12	2	21	?	54°	-
13	2	1,0	0,54	?	-
14	3	2,8	?	13°	45°
15	3	5,4	?	35°	65°
16	2	17	0,33	?	-
17	2	11	0,76	?	-
18	3	3,9	0,12	25°	45°
19	3	2,7	?	22°	35°
20	4	2,5	?	15°	$\alpha_2 = \alpha_3 = 25^\circ$
21	2	6,3	?	65°	-
22	2	11	0,44	?	-
23	2	?	0,24	45°	-
24	3	0	?	30°	60°

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Свет с длиной волны 555 нм падает на поверхность стеклянного клина под углом $20{,}0°$. Показатель преломления стекла $1{,}55$. Угол при вершине $1{,}00'$. Определить расстояние между двумя соседними минимумами при наблюдении интерференции в отраженном свете.

На рис. 3 показан ход лучей, отраженных от нижней и верхней поверхностей клина. При малом угле клина $\varphi = 1{,}00'$ можно считать, что интерференционная картина при рассмотрении ее в отраженном свете локализована на верхней поверхности клина (пунктирная линия, на которой пересекаются лучи, располагается на верхней поверхности клина).

На рис. 4 показаны величины ΔS, φ и толщина клина в местах расположения соседних минимумов m-го и ($m+1$)-го порядков.

Условие интерференционного минимума:

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots,$$

где Δ – оптическая разность хода лучей; m – порядок интерференционного минимума.

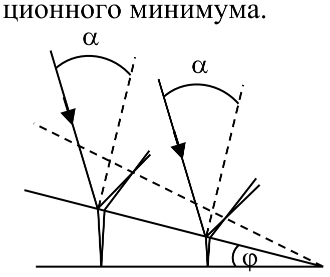

Рис. 3

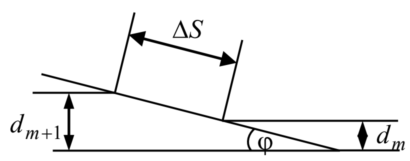

Рис. 4

Условия для двух соседних интерференционных минимумов m-го и ($m+1$)-го порядков:

$$2d_m\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}\pm\frac{\lambda}{2}=(2m+1)\frac{\lambda}{2};$$

$$2d_{m+1}\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}\pm\frac{\lambda}{2}=[2(m+1)+1]\frac{\lambda}{2}.$$

Вычтем одно выражение из другого и разделим левую и правую части полученного уравнения на $2\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$:

$$d_{m+1}-d_m=\frac{\lambda}{2\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}.$$

Как видно из рис. 2,

$$d_{m+1}-d_m=\Delta S\sin\varphi.$$

Тогда расстояние между соседними темными полосами

$$\Delta S=\frac{\lambda}{2\sin\varphi\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}.$$

Подставим числовые значения и произведем вычисления

$$\Delta S=\frac{0{,}555}{2\sin(1{,}00')\sqrt{1{,}55^2-\sin^2 20{,}0^\circ}}=631\text{ мкм}=0{,}661\text{ мм}.$$

Ответ: $\Delta S=0{,}661$ мм.

Задача 2.

Радиус третьей зоны Френеля для сферического фронта 3,00 мм. Определить радиус девятой зоны Френеля для сферического фронта. Сколько зон Френеля должно открывать круглое отверстие, чтобы интенсивность в центре дифракционной картины была бы больше: три или девять?

Воспользуемся формулой для радиуса внешней границы m-й зоны Френеля сферической волны

$$\rho_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda} \ .$$

Радиус третьей зоны $\rho_3 = \sqrt{3\frac{ab}{a+b}\lambda}$.

Радиус девятой зоны $\rho_9 = \sqrt{9\frac{ab}{a+b}\lambda}$.

Из вышеприведенных формул следует, что

$$\rho_9 = \rho_3 \sqrt{3} \ ;$$

$$\rho_9 = 3{,}00 \cdot 1{,}73 = 5{,}20 \ \text{мм}.$$

Амплитуда колебаний в центре экрана при дифракции Френеля от круглого отверстия, открывающего три зоны,

$$A^* = A_1 - A_2 + A_3 = \frac{A_1}{2} + \frac{A_3}{2} ,$$

где A_1, A_2 и A_3 – амплитуды волн от первой, второй и третьей зон.

Если отверстие открывает девять зон, то

$$A^{**} = \frac{A_1}{2} + \frac{A_9}{2} .$$

Так как амплитуда колебаний волн от различных зон Френеля монотонно убывает с ростом номера зоны, т. е. $A_9 < A_3$, то

$$A^{**} < A^* .$$

Интенсивность волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды волны, поэтому

$$I^{**} < I^* .$$

Таким образом, для получения большей интенсивности отверстие должно открывать три зоны Френеля.

Ответ: $\rho_9 = 5{,}20$ мм.

Задача 3.

На дифракционную решетку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки $2{,}00$ мкм. Определить наибольший порядок дифракционного максимума, который дает эта решетка в случае красного ($0{,}700$ мкм) и в случае фиолетового ($0{,}410$ мкм) света.

Из формулы, определяющей положение главных максимумов дифракционной решетки, найдем порядок m дифракционного максимума:

$$m = \frac{d}{\lambda}\sin\varphi ,$$

где d – период решетки; φ – угол дифракции; λ – длина волны монохроматического света.

Так как $\sin\varphi$ не может быть больше единицы, то число m не может быть больше d/λ, т. е.

$$m \le \frac{d}{\lambda} .$$

Подставив в данное выражение числовые значения в микрометрах, получим m для красных и фиолетовых лучей:

$$m_{кр} \le \frac{2{,}00}{0{,}700} = 2{,}66 ; \qquad m_{ф} \le \frac{2{,}00}{0{,}410} = 4{,}88 .$$

Необходимо учесть, что порядок максимумов является целым числом. Следовательно,

$$m_{кр\ \max} = 2 ; \qquad m_{ф\ \max} = 4 .$$

Ответ: $m_{кр\ \max} = 2$; $m_{ф\ \max} = 4$.

Задача 4.

Угол между главными плоскостями двух поляризаторов составляет угол $60{,}0^\circ$ (рис. 5). Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через оба поляризатора. Коэффициент поглощения света в каждом поляризаторе $0{,}050$. Потери на отражение света не учитывать.

Естественный свет, падая на поляризатор, поляризуется. Интенсивность поляризованного луча, в соответствии с законом Малюса,

$$I_1 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}},$$

где $I_{\text{ест}}$ – интенсивность естественного света.

С учетом поглощения света в поляризаторе интенсивность света, прошедшего через первый поляризатор,

$$I_1 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \left(1 - k_1\right).$$

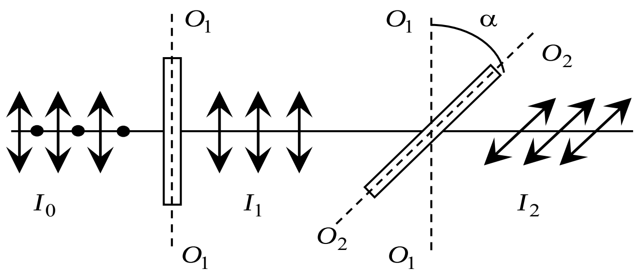

Рис. 5

Плоскополяризованный луч света интенсивностью I_1 падает на второй поляризатор. Интенсивность I_2 луча, вышедшего из поляризатора, определяется законом Малюса (без учета поглощения света):

$$I_2 = I_1 \cos^2\alpha ,$$

где α – угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке и плоскостью пропускания поляризатора.

Учитывая потери интенсивности на поглощение во втором поляризаторе, получаем

$$I_2 = I_1(1-k_2)\cos^2\alpha .$$

Таким образом, интенсивность луча, прошедшего оба поляризатора,

$$I_2 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}(1-k_1)(1-k_2)\cos^2\alpha = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}(1-k)^2 \cos^2\alpha .$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба поляризатора

$$\frac{I_{\text{ест}}}{I_2} = \frac{2}{(1-k)^2 \cos^2\alpha} .$$

Произведем вычисления:

$$\frac{I_{\text{ест}}}{I_2} = \frac{2}{(1-0{,}050)^2 \cos^2(60{,}0^\circ)} = 8{,}86 .$$

Таким образом, после прохождения света через два поляризатора интенсивность его уменьшилась в 8,86 раза.

Ответ: $\dfrac{I_{\text{ест}}}{I_2} = 8{,}86$.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. СПб., М.: Лань, 2010

2. *Детлаф А.А.* Курс физики. / Детлаф А.А., Яворский Б.М. М.: Высшая школа, 2009.

3. *Прошкин С.С., Нименский Н.В., Самолетов В.А.* Сборник задач по электродинамике и квантовой физике. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013, - 411 с.

4. *Савельев И.В.* Курс физики, Т. 2. СПб., М.: Лань, 2010.

5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, Т. 3, М., Наука, 2009.

6. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Высшая школа, 2009.

7. *Чертов А.Г.* Задачник по физике. / Чертов А.Г., Воробьев А.А. М.: Высшая школа, 2008.

8. *Яворский Б.М.* Основы физики, Т. 2. / Яворский Б.М., Пинский А.А. М.: Наука, 2009

ПРИЛОЖЕНИЯ
Основные физические постоянные

Таблица 4.

Физическая величина	Численное значение
Скорость света в вакууме	c=2,9979250(10)·10^{8} м/с
Гравитационная постоянная	G = 6,672·10^{-11} $м^{3}$/(кг·$с^{2}$)
Постоянная Авогадро	N_{A} = 6,02·10^{23} $моль^{-1}$
Постоянная Больцмана	k = 1,3807·10^{-23} Дж/К
Молярная газовая постоянная	R=8,314 Дж/(К·моль)
Элементарный заряд	e = 1,602·10^{-19} Кл
Масса электрона	m_{e} = 0,911·10^{-30} кг = 0,511 МэВ
Масса протона	m_{p} = 1,672·10^{-27} кг
Постоянная Планка	h = 6,626·10^{-34} Дж·с
	$\hbar = h/2\pi$= 1,0546·10^{-34} Дж·с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ = 5,67·10^{-8} Вт/($м^{2}$·$К^{4}$)
Постоянная Ридберга	R = 3,29·10^{15} $с^{-1}$
	R' = 1,10 10^{7} $м^{-1}$
Электрическая постоянная	ε_{0} = 8,85·10^{-12} Ф·$м^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_{0} = 1,257·10^{-6} Гн/м

СОДЕРЖАНИЕ