

Министерство обороны Российской Федерации
Заочная кадетская физико-математическая школа (КФМШ)

ФИЗИКА

11 класс

2018–2019 учебный год

Задание № 4

Волновая оптика

Москва, 2019

ББК 22.3 Ч584

УДК 53(075)

ФИЗИКА. 11 класс. Задание № 4: Волновая оптика. — М.: Заочная кадетская физико-математическая школа, 2019. — 16 с. Методическое пособие состоит из теоретической части, содержащей методику решения задач, а также заданий, предлагаемых для решения в классе, и задач для самостоятельного решения. Для учащихся и педагогов соответствующих кружков КФМШ.

Рекомендуемый срок выполнения задания — 19 мая 2019 г.

Авторы - составители: Алтухов Д.А., Щавлев В.В.

Рецензент: к.ф.-м.н. Чивилёв В.И.

© Заочная кадетская физико-математическая школа, 2019

Введение

В предыдущем пособии мы рассматривали явления отражения и преломления световых лучей. Для этого было достаточно законов геометрической оптики. Однако существует широкий круг явлений, связанных со светом, которые нельзя описать в таком приближении: дифракция, интерференция, радуга и многие другие. Для их объяснения потребуется заглянуть глубже в природу света – в ее волновую часть.

§1. Волны

С волновыми явлениями знаком, пожалуй, каждый. Самый простой и наглядный пример – расходящиеся кольцами волны от камня, брошенного в воду. *Волной* называется изменение состояния среды, распространяющееся в пространстве с течением времени. Изменяющейся величиной может быть, например, высота уровня воды, плотность воздуха, напряженность электрического поля. При распространении волны не происходит переноса вещества, передаётся только определенное состояние среды.

Особый интерес представляют *гармонические* волны: в этом случае распространяющееся колебание некоторой величины происходит по гармоническому закону (то есть её изменение можно описать функцией синуса или косинуса). Огромное количество волновых процессов в природе подчиняется именно этому закону, причем все они имеют одинаковое математическое описание. Уравнение такой волны, бегущей вдоль оси x , имеет следующий вид:

$$y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (1.1)$$

где A – амплитуда, $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота, t – время, k – волновое число, x – координата, φ_0 – начальная фаза. Весь аргумент косинуса $\varphi(x,t) = \omega t - kx + \varphi_0$ называется фазой.

Длиной волны (λ) называется наименьшее расстояние между точками, колеблющимися с одинаковыми фазами. В случае, например, морской волны длина волны равна расстоянию между соседними гребнями. Она связана с волновым числом соотношением $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. *Период волны* (T) – это время одного колебания любой точки волны, а *частота волны* (ν) – количество колебаний в единицу времени. Частота и период связаны формулой $\nu = 1/T$.

Скорость волны (v) – это скорость распространения возмущения: в случае с распространением морской волны её скорость равна скорости движения гребня. Скорость волны определяется свойствами среды, в которой эта волна распространяется.

Длина волны связана со скоростью волны соотношениями:

$$\lambda = vT = v/\nu. \quad (1.2)$$

Если колебание происходит перпендикулярно направлению распространения волны, то такая волна называется *поперечной*. Например, поперечными являются волны на поверхности воды или волны в натянутой струне. В случае колебания вдоль направления распространения волна называется *продольной*. К такому типу относятся звуковые волны в воздухе, в этом случае происходят колебания плотности и давления воздуха.

Как было сказано во введении, многие явления не объясняются в рамках геометрической оптики. Для этого требуется представление о свете как о волне, при распространении которой происходят колебания электрического и магнитного полей. В каждой точке, до которой дошёл свет, векторы \vec{E} и \vec{B} колеблются перпендикулярно направлению распространения волны (то есть свет является поперечной волной), при этом $\vec{E} \perp \vec{B}$. Вообще волны, в которых происходят колебания электрического и магнитного полей, называются *электромагнитными волнами*. Наглядно распространение электромагнитной волны в пространстве представлено на рис. 1.1.

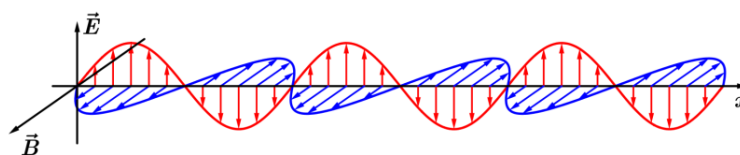


Рис. 1.1. Распространение электромагнитной волны в вакууме.

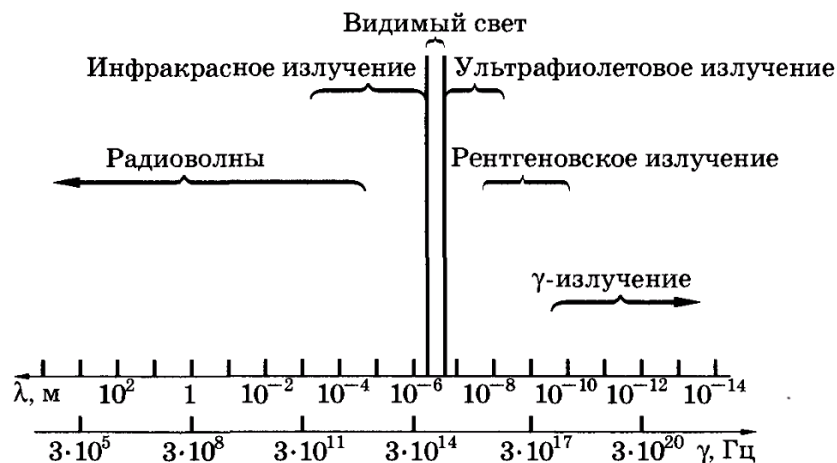


Рис. 1.2. Шкала электромагнитных волн.

Волны разных частот проявляют себя по-разному. На рисунке 1.2. приведено соответствие частоты, длины волны и типов электромагнитных волн. Резкой границы между этими типами нет, поэтому диапазоны волн на рис. 1.2. перекрываются. Обычно говорят о следующем разбиении на диапазоны:

- $\nu < 3 \cdot 10^{12}$ Гц: радиоволны; с их помощью передают телевизионный и радиосигналы.
- $3 \cdot 10^{12}$ Гц $< \nu < 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц: инфракрасное излучение, именно эта часть электромагнитного спектра излучения Солнца обеспечивает нашу планету теплом.
- $4,3 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц: видимое излучение, в этом диапазоне электромагнитные волны воспринимаются человеком как свет.
- $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц $< \nu < 3 \cdot 10^{16}$ Гц: ультрафиолетовое излучение, благодаря ему появляется загар на коже.
- $3 \cdot 10^{16}$ Гц $< \nu < 6 \cdot 10^{19}$ Гц: рентгеновское излучение, с его помощью получают рентгеновские снимки.
- $\nu > 6 \cdot 10^{19}$ Гц: гамма-излучение, крайне вредоносное для живых организмов.

Обратите внимание на величину интервала, соответствующего видимой части излучения. Вокруг нас постоянно присутствуют электромагнитные волны практически всех частот, но наши глаза воспринимают лишь незначительную их часть.

Если световая волна переходит из одной среды в другую, то ее частота не изменяется. При этом будут изменяться длина и скорость волны. Пусть λ_0 , c – длина и скорость света в вакууме, λ , ν – те же величины в среде с абсолютным показателем преломления n . Тогда, если частота света равна ν , то $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$. С другой стороны $\nu = \frac{c}{n\lambda}$, $\nu = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{c}{n\lambda}$, откуда получаем, что $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, то есть длина волны уменьшается при распространении света в среде.

Пример 1.1.

Свет переходит из стекла с показателем преломления $5/3$ в воздух. Найдите отношение длины волны света в воздухе к длине волны в стекле.

Решение:

Пусть λ_0 – длина волны света в воздухе, n – показатель преломления стекла. При переходе света из стекла в воздух частота не изменяется, но меняется скорость волны, увеличиваясь в n раз: $\nu = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{\nu n}{\lambda_0}$. Тогда $\frac{\lambda_0}{\lambda} = n = \frac{5}{3}$.

§ 2. Интерференция

Опытным путем установлено, что если в одной точке встречаются несколько волн одной природы (например, световые волны), то результирующая амплитуда в этой точке равна сумме амплитуд исходных волн. Данный факт называется *принципом суперпозиции*.

Если волна от некоторого точечного источника распространяется одинаково во все стороны, то такая волна называется *сферической*. В этом случае в уравнении (1.1) можно заменить координату x на расстояние до источника r .

Рассмотрим две бегущие сферические световые волны с одинаковой циклической частотой ω и постоянной разностью фаз $\Delta\varphi$ – такие волны, а также испускающие их источники, называют *когерентными*. Пусть эти волны описываются уравнениями $y_1(r_1, t) = A_0 \cos(\omega t - kr_1 + \varphi_{01})$, $y_2(r_2, t) = A_0 \cos(\omega t - kr_2 + \varphi_{02})$. В данном случае не принципиально, какой физической величиной является y – напряженностью электрического или магнитного поля. Для упрощения расчетов мы рассматриваем волны с одинаковыми амплитудами, хотя в общем случае результат получится аналогичный. Так как у волн равные частоты, то у них также равны и волновые числа k . Обозначим $\varphi_1 = -kr_1 + \varphi_{01}$, $\varphi_2 = -kr_2 + \varphi_{02}$. Тогда, согласно принципу суперпозиции, результирующее колебание в некоторой точке будет описываться так:

$$y(r, t) = y_1(r_1, t) + y_2(r_2, t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_0 \cos(\omega t + \varphi_2) = 2A_0 \cos \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \cdot \cos \left(\omega t + \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2} \right).$$

Мы получили, что результирующее колебание происходит с той же частотой ω и с амплитудой $A = 2A_0 \cos \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}$, которая зависит от *разности фаз* исходных волн $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ в рассматриваемой точке.

Человеческий глаз и светочувствительные приборы реагируют не на амплитуду, а на величину, называемую *интенсивностью*, которая *пропорциональна* квадрату амплитуды. Если интенсивности исходных волн равны $I_0 \sim A_0^2$, то итоговая интенсивность $I \sim A^2$ равна

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} = 2I_0 (1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)) \quad (2.1)$$

Пусть колебания источников *синфазны*, то есть $\varphi_{02} - \varphi_{01} = 0$. Тогда: разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -kr_2 + kr_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r$, или коротко:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r \quad (2.2)$$

Величина Δr называется *разностью хода* лучей. Получается, что интенсивность света в пространстве изменяется от точки к точке и зависит от разности расстояний до источников. Такое чередование областей повышенной и пониженной интенсивности называется *интерференционной картиной*.

Если амплитуды интерферирующих волн равны, то, согласно (2.1), в тех точках, в которых $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$, будет наблюдаться нулевая интенсивность света. Решая это уравнение, находим $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r = \pi + 2\pi m$, откуда получаем условие минимумов интенсивности:

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2}(1 + 2m), m \in Z \quad (2.3)$$

В таких точках волны при сложении будут гасить друг друга. В этом случае разность хода равна нечетному числу полуволн. В точках, в которых выполняется $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$, интенсивность будет максимальной. Решение уравнения дает $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r = 2\pi m$, откуда следует условие для максимумов интенсивности:

$$\Delta r = \lambda m, m \in Z \quad (2.4)$$

В таких точках волны при сложении усиливают друг друга, а результирующая интенсивность света превосходит интенсивность каждой из волн в 4 раза. При этом разность хода равна четному числу полуволн.

Пример 2.1.

Разность фаз двух интерферирующих световых волн с частотой 10^{15} Гц равна 8π . Определить разность хода между ними.

Решение:

Согласно формуле (2.2) разность хода связана с разностью фаз соотношением: $\Delta r = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$, где $\lambda = \frac{c}{\nu}$ - длина волны интерферирующих волн.

Подставляя выражение для λ в исходное уравнение, получаем:

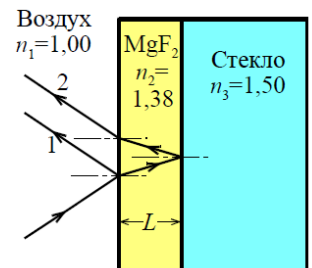
$$\Delta r = \frac{\Delta\varphi c}{2\pi \nu} = 1,2 \text{ мкм.}$$

Пример 2.2.

Во многих оптических приборах для уменьшения потерь на отражение поверхности линз покрывают тонкой пленкой фторида магния (MgF_2), показатель преломления которого $n_2 = 1,38$ (показатель преломления стекла $n_3 = 1,5$). Это называется просветлением оптики. Пусть на стекло из воздуха ($n_1 = 1$) перпендикулярно поверхности падает видимый свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$. При какой минимальной толщине L покрытия отражение света вследствие интерференции резко ослабнет?

Решение:

На рисунке лучи изображены наклонно, чтобы визуально отличать их, но мы рассматриваем случай нормального падения света, при котором не происходит преломления лучей.



Волна 1, отраженная от наружной поверхности пленки, и волна 2, отраженная от стекла, будут интерферировать, вследствие чего при определённой толщине плёнки отраженный свет будет ослабляться.

Разность хода лучей равна $2L$, так как первый луч только дошел до внешней поверхности пленки, а второй луч дошел до стекла и обратно. Так как свет переходит из воздуха в среду с показателем преломления $n_2 = 1,38$, то длина волны в этой среде станет равна $\frac{\lambda}{n_2}$. Тогда условие минимума интенсивности

будет выглядеть так: $2L = \frac{\lambda}{2n_2}(1 + 2m)$, $m \in Z$. Минимальному размеру

пленки соответствует значение $m = 0$, при этом $L_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} \approx 99,6 \text{ нм}$.

Ответ: $L_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} \approx 99,6 \text{ нм}$.

Отметим один факт, который мы не учитывали в решении. При отражении света от оптически более плотной среды фаза резко меняется на π . Но в данном случае обе волны отразились от оптически более плотных сред, и разность фаз не поменялась. Поэтому ответ получился верным. Показатель преломления стекла в ответ не вошел, но оказалось важным, что он больше показателя преломления пленки.

§3. Дифракция света

Дифракцией света в общем случае называется совокупность физических явлений, обусловленных волновой природой света и наблюдающихся при распространении световых волн в среде с резко выраженной оптической неоднородностью. В более узком смысле под дифракцией света понимают огибание светом встречных препятствий или отклонение распространения света от прямолинейного направления. Оказывается, свет, встречая на своем пути преграды, сопоставимые по размеру с длиной световой волны, идет, как бы огибая их.

Это явление удалось объяснить с помощью *принципа Гюйгенса-Френеля*, согласно которому каждая точка волнового фронта (поверхности, до которой дошла волна к данному моменту) сама становится вторичным источником сферических волн, а амплитуда и интенсивность света в каждой точке пространства определяется интерференцией волн от вторичных источников.

3.1. Опыт Юнга

В 1802 году английский ученый Томас Юнг провел свой легендарный эксперимент по рассеянию света на двух щелях, именуемый с тех пор *опытом Юнга*. Монохроматический свет направлялся на узкую щель, за которой находились две другие щели (рис.3.1). Необходимость первой щели обуславливалась тем, что реальные источники света имели недостаточно малые размеры, а узкую щель сделать было весьма просто, и, согласно принципу Гюйгенса-Френеля, она сама являлась новым источником света. Благодаря первой щели малой ширины до двух других щелей доходил когерентный свет, поэтому эти две щели являлись когерентными синфазными источниками света.

В результате на экране появлялась интерференционная картина – чередующиеся светлые и темные полосы (рис 3.2). В центре экрана на одинаковом расстоянии от щелей находился светлый максимум нулевого

порядка. Темные и светлые полосы не имеют строгих границ, они плавно сменяют друг друга. *Шириной интерференционной полосы* называется расстояние между центрами соседних максимумов (в случае темной полосы) или соседних минимумов (в случае светлой полосы) интенсивности.

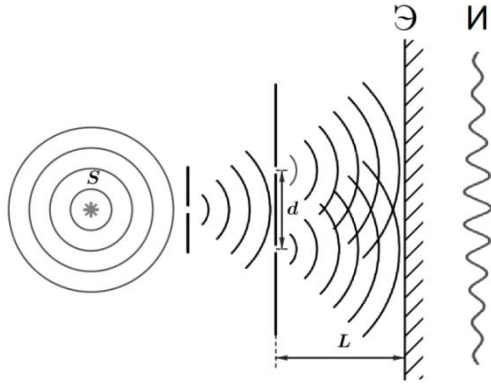


Рис. 3.1. Схема опыта Юнга.

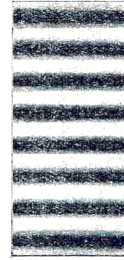


Рис. 3.2.

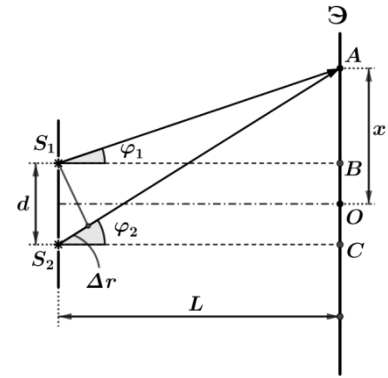


Рис. 3.3. Схема образования интерференционной картины в опыте Юнга.

Рассмотрим лучи S_1A и S_2A , идущие от двух щелей в одну точку A экрана (рис. 3.3). Разность хода этих лучей равна $\Delta r = S_2A - S_1A$. Пусть $x = AO$ – расстояние от точки A до серединного перпендикуляра к S_1S_2 . Расстояние от щелей до экрана равно $L = S_1B = S_2C$. Тогда, согласно теореме Пифагора, для прямоугольных треугольников S_1BA и S_2CA имеем:

$$S_1A^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2, \quad S_2A^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2.$$

Вычитая из второго уравнения первое и применяя формулу квадрата разности, после преобразований получим:

$$(S_2A - S_1A) \cdot (S_2A + S_1A) = 2xd.$$

Если экран находится на достаточно большом расстоянии L от щелей, а расстояние x мало, то можно приближенно считать, что $S_1A \approx S_2A \approx L$. Также вспомним, что разность хода $\Delta r = S_2A - S_1A$. Тогда последнее равенство примет вид $\Delta r \cdot 2L = 2xd$. Отсюда получаем окончательно: $\Delta r = \frac{xd}{L}$.

В данном опыте $L \gg x$, при этом $x \gg d$. Поэтому можно воспользоваться приближением для малых углов ($|\alpha| \ll 1$, значит $\sin \alpha \approx \text{tg} \alpha \approx \alpha$, если угол α измеряется в радианах): $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \frac{x}{L} = \varphi$. Здесь мы

ввели "усредненный" угол φ направления к некоторой точке экрана. Тогда, учитывая (рис. 3.3.), $\Delta r = d \cdot \varphi$.

Если в разности хода укладывается целое число длин волн $\Delta r = k\lambda$, то в точке будет наблюдаться максимум интенсивности и формулы примут вид:

$$\Delta r = d \cdot \varphi = k\lambda, \quad \frac{dx}{L} = k\lambda, \quad k \in Z \quad (3.1)$$

Значения $x = 0$, $k = 0$ соответствуют центральному (нулевому, главному) максимуму – он находится на пересечении экрана и срединного перпендикуляра к щелям (точка O на рис. 3.3). Окончательно положения максимумов интенсивности и направления на них определяются следующим образом:

$$x_{\max k} = \frac{L\lambda}{d} \cdot k, \quad \varphi_{\max k} = \frac{\lambda}{d} \cdot k \quad (3.2)$$

Минимумы интенсивности будут наблюдаться в точках, где разность хода равна нечетному числу полуволен: $\Delta r = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$.

Положения минимумов интенсивности и направления на них задаются так:

$$x_{\min k} = \frac{L\lambda}{d} \cdot \left(k + \frac{1}{2}\right), \quad \varphi_{\min k} = \frac{\lambda}{d} \cdot \left(k + \frac{1}{2}\right) \quad (3.3)$$

Пример 3.1.

В опыте Юнга ширина щели равна $d = 0,5$ мм, расстояние до экрана $L = 3$ м, на щель падает свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Определите ширину третьей светлой полосы.

Решение:

Ширина k -й светлой полосы равна расстоянию между центрами k -го и $(k-1)$ -го минимумов: $h = L \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(k + \frac{1}{2}\right) - L \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(k - 1 + \frac{1}{2}\right) = 2L \cdot \frac{\lambda}{d}$. Отсюда видно, что у всех полос (формулы верны при небольших k) будет одинаковая ширина. В нашем случае $h = 2L \cdot \frac{\lambda}{d} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{500 \cdot 10^{-9}}{500 \cdot 10^{-6}} = 6$ мм.

Ответ: 6 мм.

Пример 3.2.

В опыте Юнга для наблюдения явления интерференции в качестве источника света используется газоразрядная лампа, в спектре излучения которой имеются красная и синяя линии. В некоторой точке экрана происходит наложение красной линии второго порядка с синей линией третьего порядка. Длина волны красной линии $\lambda_{кр} = 690$ нм. Найти длину волны синей линии. Ответ дать в нанометрах

Решение:

Наложение волн происходит, когда углы направлений на максимумы совпадают: $\varphi_{кр2} = \varphi_{с3}$. Из соотношения (3.1) получаем: $d\varphi_{кр2} = 2\lambda_{кр}$, $d\varphi_{с3} = 3\lambda_c$, откуда $\lambda_c = \frac{2}{3}\lambda_{кр} = 460$ нм.

Ответ: 460 нм.

3.2. Дифракционная решётка

Обычно в школьном курсе физики дифракцию света рассматривают на примере падения излучения на пропускающую *дифракционную решётку* – пространственную периодическую структуру, период которой соизмерим с длиной световой волны. В простейшем случае пропускающая дифракционная решетка представляет собой систему щелей в непрозрачном экране (рис. 3.4).

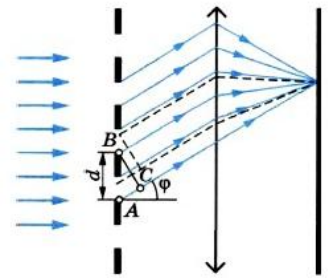


Рис. 3.4.

Период d дифракционной решётки можно найти по формуле:

$$d = a + b \quad (3.4)$$

Здесь a – ширина щели, b – расстояние между ближними краями соседних щелей.

Если на каждый миллиметр дифракционной решётки нанесено N штрихов, то период решетки, соответственно, равен

$$d = \frac{1}{N[\text{штр}/\text{мм}]}. \quad (3.5)$$

При падении плоской монохроматической волны на дифракционную решётку каждая щель является источником вторичных волн. Собирающая линза, устанавливаемая за решёткой, в фокальной плоскости которой располагается экран, собирает параллельные лучи и позволяет наблюдать

дифракционную картину – чередующиеся светлые и тёмные полосы. При этом угловые направления на максимумы дифракционной картины определяются соотношением:

$$d \sin \varphi_k = k \lambda \quad (3.6)$$

Здесь d – период дифракционной решётки, φ_k – угол между нормалью к решётке и направлением на k -ый максимум, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок максимума, λ – длина волны падающего излучения. Обратите внимание, что направления на максимумы зависят только от периода решетки d , но не от соотношения размеров щелей и расстояния между ними. При фиксированном периоде, чем больше размер щели, тем будет больше яркость картины, но направления на максимумы и минимумы от этого не зависят.

Расстояние от центрального до k -го максимума находится из соотношения:

$$x_k = F \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot k. \quad (3.7)$$

Если на дифракционную решётку падает белый свет, то решётка разлагает его в спектр. При этом, все максимумы, кроме центрального, будут окрашены в цвета радуги. Дифракционную решетку часто используют как спектральный прибор: проводят с её помощью измерение длин волн, анализируют спектры излучения и т.д.

Разберём несколько задач на дифракцию света.

Пример 3.3. Свет с длиной волны 0,5 мкм падает нормально на дифракционную решетку с периодом, равным 1 мкм. Под каким углом при этом наблюдается максимум первого порядка?

Решение:

$$\text{Согласно формуле (3.6) } \sin \varphi_k = \frac{k \lambda}{d} = \frac{1 \cdot 0,5}{1} = 0,5, \text{ откуда } \varphi_1 = 30^\circ.$$

Пример 3.4. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на мм, перпендикулярно ей падает плоская монохроматическая волна. Какова длина падающей волны, если спектр 4-го порядка наблюдается в направлении, перпендикулярном падающим лучам? Ответ дайте в нанометрах

Решение:

Согласно формуле (3.5) $d = \frac{1}{N} = \frac{1}{500} = 2 \text{ мкм}$. Из формулы (3.6) следует,

что длина волны равна: $\lambda = \frac{d \sin \varphi_k}{k} = \frac{2 \cdot 1}{4} = 0,5 = 500 \text{ нм}$.

Пример 3.5. На дифракционную решетку с периодом $d = 0,01 \text{ мм}$ нормально к поверхности решетки падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 600 \text{ нм}$. За решеткой, параллельно ее плоскости, расположена тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием $F = 5 \text{ см}$. Чему равно расстояние между максимумами первого и второго порядков на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы?

Решение:

Согласно формуле (3.7) $x_k = F \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot k$, а значит $\Delta x_{12} = x_2 - x_1 = F \cdot \frac{\lambda}{d} = 3 \text{ мм}$.

Ответ: $\Delta x_{12} = F \cdot \frac{\lambda}{d} = 3 \text{ мм}$.

§4. Цвет

Если посмотреть на окружающий нас мир, то мы увидим бесконечное количество различных цветов, тонов, оттенков. И рано или поздно перед человеком возникает вопрос, почему разные предметы имеют различный цвет. Постараемся ответить на этот вопрос.

Световой луч является совокупностью электромагнитных волн с определенным набором частот. Когда свет попадает на сетчатку глаза, в ней активируются фоторецепторы – светочувствительные клетки, которые затем передают сигнал в мозг. У человека есть фоторецепторы трех типов, отвечающих за цветное зрение (которые ещё называют колбочками из-за сходства формы): первые реагируют на свет с частотой $\sim 6 \cdot 10^{14} \div 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, вторые активируются при частоте $\sim 4,8 \cdot 10^{14} \div 6,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, третьи при частоте $\sim 4,3 \cdot 10^{14} \div 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Если свет содержит в основном волны с частотами, соответствующими чувствительности фоторецепторов первого типа, то такой свет воспринимается как синий. В случае попадания частот падающего света в диапазон второго типа свет воспринимается как зеленый. При возбуждении фоторецепторов третьего типа свет воспринимается красным. Все остальные цвета получаются при одновременной активации разных типов фоторецепторов. Например, если в глаз попадают две световые волны,

воспринимаемые отдельно как красный и синий цвет, то вместе они будут восприниматься как пурпурный, хотя такой монохроматической волны не существует.

То, что мы называем белым светом, является совокупностью электромагнитных волн с частотой $\sim 4,3 \cdot 10^{14} \div 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. ($\lambda = 400-700$ нм). Каждая поверхность по-разному отражает волны различной частоты – какие-то больше, какие-то меньше. Если предмет хорошо отражает только красный цвет и на него падает белый свет, то отразятся только волны, соответствующие красному диапазону длин волн. Если же на этот предмет посветить синим цветом, то от него практически ничего не отразится, и предмет будет казаться черным.

4.1. Дисперсия света

Оказывается, для электромагнитных волн разной частоты показатели преломления одного и того же материала могут отличаться. Это явление назвали *дисперсией* света. Если на прозрачную поверхность под углом направить узкий пучок белого света, то углы преломления для составляющих его волн различной частоты будут разными. Причем для красного света преломление будет минимальным, а для фиолетового – максимальным (рис. 4.1).

На рисунке 4.1 показан ход луча белого света в призме. Белый свет, по сути, является набором лучей разной частоты. Показатель преломления для каждой частоты свой, поэтому лучи преломляются по-разному. У частоты, соответствующей красному цвету, показатель преломления наименьший,

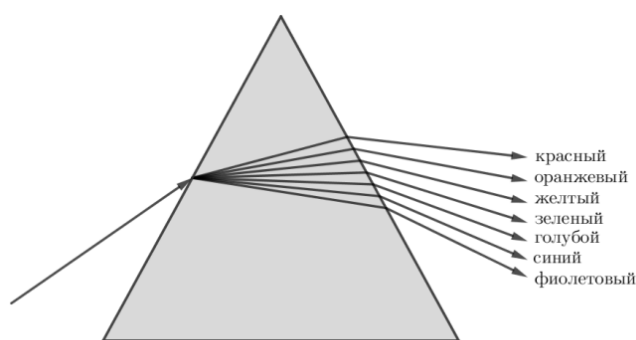


Рис. 4.1.

поэтому эти лучи преломляются слабее. У фиолетового наоборот – такие лучи преломляются сильнее остальных. Если на выходе из призмы поставить экран, то можно увидеть картину, напоминающую радуго – *спектр* белого света. Лучи различных частот упадут в отдельные точки, и на экране появится распределение интенсивности в зависимости от частоты.

Задачи для самостоятельного решения

1. Свет переходит из первой среды с показателем преломления 1,3 во вторую среду с показателем преломления 1,7. Найдите отношение частоты света в первой среде к частоте во второй.
2. Разность фаз двух интерферирующих световых волн равна 5π , а разность хода между ними равна $12,5 \cdot 10^{-7}$ м. Определить длину этих волн.
3. В опыте Юнга ширина щели равна $d = 0,4$ мм, расстояние до экрана $l = 5$ м, на щель падает свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. Определите ширину четвертой темной полосы.
4. На поверхность стеклянной призмы нанесена тонкая пленка с показателем преломления $n_{\text{пл}} < n_{\text{ст}}$ толщиной 112,5 нм. На пленку по нормали к ней падает свет с длиной волны 630 нм. При каком значении показателя преломления $n_{\text{пл}}$ пленка будет «просветляющей»?
5. На дифракционную решетку с периодом 5 мкм падает свет с длиной волны 550 нм. Найдите направление (угол) на второй главный максимум.
6. На дифракционную решетку с периодом 6 мкм нормально падает монохроматический пучок света. Угол, соответствующий четвертому дифракционному максимуму, составил 0,34 рад. Найдите частоту падающего света. Ответ выразить в 10^{14} Гц округлить до десятых.
7. При освещении дифракционной решётки белым светом спектры 3-го и 4-го порядков отчасти перекрывают друг друга. На максимум 4-го порядка какой частоты накладывается максимум 3-го порядка красной области спектра с $\nu = 450$ ТГц? Ответ выразить в ТГц и округлить до целых.
8. Дифракционная решетка, имеющая 750 штрихов на 1 см, расположена параллельно экрану на расстоянии 1,5 м от него. На решетку перпендикулярно ее плоскости направляют пучок света. Определите длину волны света, если расстояние на экране между вторыми максимумами, расположенными слева и справа от центрального (нулевого), равно 22,5 см. Ответ выразите в микрометрах (мкм) и округлите до десятых. Считать $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha$.