



Волновая природа света. Интерференция

В том, что свет несет энергию, убеждался каждый, кто хотя бы раз с помощью лупы фокусировал солнечные лучи на листе бумаги и прожигал в нем дырочку. Но как распространяется свет и в какой форме он переносит энергию? При рассмотрении волновых процессов в гл. 15 мы отмечали, что энергия может переноситься двумя основными способами – с помощью частиц или волн. В первом случае носителями энергии служат материальные тела или частицы, например брошенный бейсбольный мяч или поток воды. Во втором случае, например, волны на поверхности воды или звуковые волны могут переносить энергию на большие расстояния, хотя при этом не происходили перемещения массы на такие же расстояния. В этой связи, говоря о природе света, законно спросить: распространяется ли свет от источника в виде потока отдельных частиц или же в виде волн, исходящих от источника? Как показывает история, вопрос этот оказался трудным. Дело в том, что свет не обнаруживает очевидным образом своей корпускулярной природы, равно как и не демонстрирует существования крохотных световых волн, которые распространялись бы подобно волнам на воде. До 30-х годов XIX в. данные, казалось, свидетельствовали в пользу то одной концепции, то другой, пока большинство физиков не приняло волновой теории. К концу XIX в. было установлено, что свет представляет собой *электромагнитную волну* (гл. 33). Хотя XX век внес свои поправки и изменения (гл. 40), волновая теория света оказалась чрезвычайно успешной. Мы обсудим доказательства, на которые опирается волновая теория света, и познакомимся с тем, как эта теория объясняет широкий круг явлений.

36.1. Волны или частицы? Принцип Гюйгенса и дифракция

Современник Ньютона голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629–1695) предложил волновую теорию света, обладавшую многими достоинствами. Физики и поныне находят положение волнового фронта в последующие моменты времени по его положению в данный момент методом, некогда разработанным Гюйгенсом. Он извест-

Рис. 36.1. Принцип Гюйгенса позволяет определить новое положение волнового фронта CD , если прежнее положение AB известно.

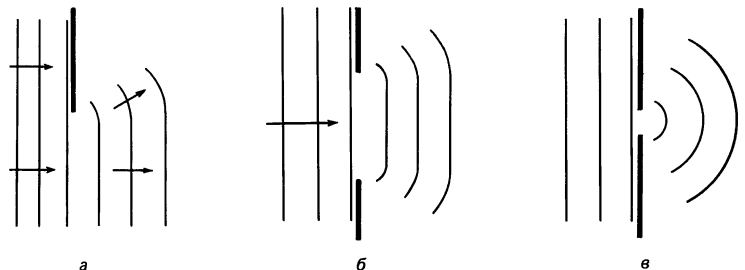
тен как **принцип Гюйгенса** и может быть сформулирован следующим образом: *каждую точку волнового фронта можно рассматривать как источник элементарных волн, распространяющихся в первоначальном направлении со скоростью волны; новое положение волнового фронта совпадает с огибающей элементарных волн.*

В качестве простого примера применения принципа Гюйгенса рассмотрим волновой фронт AB на рис. 36.1, распространяющийся от источника S . Условимся считать, что среда *изотропна*, т.е. скорость v волн одинакова по всем направлениям. Чтобы найти положение волнового фронта спустя короткий промежуток времени t после того, как он занимал положение AB , проведем окружности радиусом $r = vt$. Центры этих окружностей лежат на исходном волновом фронте AB , а сами окружности представляют собой элементарные волны Гюйгенса. Огибающая этих элементарных волн – линия CD – определяет новое положение волнового фронта.

Принцип Гюйгенса особенно полезен при рассмотрении случаев, когда волны встречают на своем пути какое-нибудь препятствие и волновой фронт частично прерывается. Согласно принципу Гюйгенса, волны должны огибать препятствие, как это показано на рис. 36.2. Именно так ведут себя волны на поверхности воды, в чем мы убедились в гл. 15 (рис. 15.23 и 15.24). Огибание волнами препятствий и проникновение в «область тени» получило название **дифракции**. Так как дифракция имеет место для волн, а не для частиц, это явление служит одним из подтверждений волновой природы света.

Дифрагирует ли свет? В середине XVII в. монах ордена

Рис. 36.2. Принцип Гюйгенса дает согласие с дифракцией на краю препятствия (a), большом отверстии (b) и малом отверстии ($в$), характерный размер которого по порядку величины сравним с длиной световой волны.



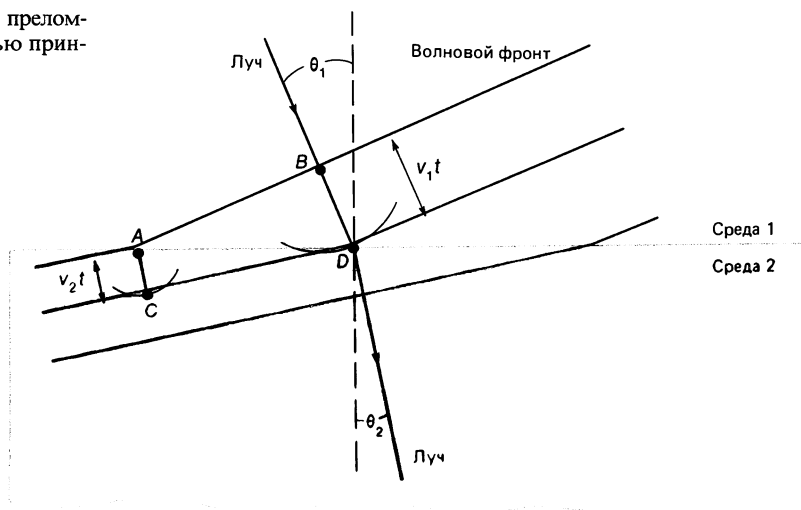
иезуитов Франческо Гримальди (1618–1663) обратил внимание на то, что, когда солнечный свет проникает в затемненную комнату через небольшое отверстие в ставне, «зайчик» на противоположной стене оказывается больше, чем следует из геометрической оптики. Гримальди заметил также, что края изображения размыты и окружены цветными полосами. Он приписал это явление дифракции света. Ньютон, отстаивавший корпускулярную теорию света, был осведомлен о результате Гримальди. Он полагал, что наблюдавшийся Гримальди эффект был обусловлен взаимодействием корпускул («маленьких тел») с краями отверстия. Если бы свет представлял собой волну, утверждал Ньютон, то световые волны должны были бы отклоняться от первоначального направления сильнее, чем это наблюдалось. Аргументы Ньютона казались вполне разумными. Но, как было показано в гл. 15, дифракция оказывается значительной только при условии, что размеры препятствия или отверстия сравнимы с длиной волны (рис. 15.24). Ньютон не догадывался, что длины волн видимого света чрезвычайно малы и поэтому дифракционные эффекты крайне слабы. (Именно поэтому столь успешно применяется в геометрической оптике представление о лучах: обычно размеры препятствий и отверстий значительно превышают длину волны света, и поэтому дифракция оказывается сравнительно слабой.)

36.2. Принцип Гюйгенса и закон преломления

Законы отражения и преломления во времена Ньютона были хорошо известны. Закон отражения не позволял отдать предпочтение одной теории (корпускулярной или волновой) перед другой. Если волны отражаются от поверхности, то угол падения должен быть равен углу отражения (рис. 15.15); но то же справедливо и применительно к частицам или корпускулам: вспомните хотя бы теннисный мяч, ударяющийся без подкрутки о плоскую поверхность.

Иное дело – закон преломления. Рассмотрим случай, когда свет, входя в среду, отклоняется в направлении нормали (например, при переходе из воздуха в воду). Как видно из рис. 36.3, этот эффект можно воспроизвести с помощью принципа Гюйгенса, если предположить, что скорость света во второй среде меньше, т. е. что за время t точка B на волновом фронте AB смещается на расстояние $v_1 t$ и достигает точки D . С другой стороны, точка A смещается на расстояние $v_2 t$ и достигает точки C . Применяя принцип Гюйгенса к точкам A и B , мы получим элементарные волны в точках C и D . Волновой фронт образует касательную к этим волнам, поэтому новый волновой фронт проходит по линии CD . Следовательно,

Рис. 36.3. Объяснение преломления света с помощью принципа Гюйгенса.



лучи (перпендикулярные волновым фронтам) отклоняются в направлении нормали, если $v_2 < v_1$, как показано на рис. 36.3¹⁾. Корпускулярная теория Ньютона предсказывала противоположный результат. Ньютон считал, что если траектория корпускул света при попадании в новую среду изменяет направление, то это происходит потому, что среда оказывает на корпускулы на границе некоторое воздействие. Предполагалось, что сила действует перпендикулярно границе и поэтому сказывается только на нормальной составляющей скорости корпускулы. Когда свет входит в среду, такую, как вода, где он отклоняется в направлении нормали, сила должна ускорять корпускулы таким образом, чтобы возрастала нормальная составляющая их скорости, так как только в этом случае угол преломления будет меньше угла падения. Следовательно, в теории Ньютона скорость света должна быть больше во второй среде ($v_2 > v_1$). Таким образом, волновая теория предсказывает, что скорость света, например, в воде меньше, чем в воздухе, тогда как корпускулярная теория Ньютона утверждает обратное. Эксперимент, в котором была действительно измерена скорость света в воде и тем самым подтверждено предсказание волновой теории, был проделан лишь в 1850 г. (французским физиком Жаном Фуко); к тому времени волновая теория, как мы увидим в следующем разделе, была полностью принята.

Нетрудно показать, что закон преломления Снеллиа следует непосредственно из принципа Гюйгенса, если скорость света v в любой среде связана со скоростью света c в вакууме и показателем преломления n соотношением (34.1): $v = c/n$. Из построения Гюйгенса на

¹⁾ По существу, те же соображения мы использовали при обсуждении рис. 15.19.

рис. 36.3 видно, что угол ADC равен θ_2 , а угол BAD равен θ_1 . Поскольку два треугольника имеют общую сторону AD , то

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 t}{AD}, \quad \sin \theta_2 = \frac{v_2 t}{AD}.$$

Разделив одно соотношение на другое, получим

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2},$$

или, так как $v_1 = c/n_1$ и $v_2 = c/n_2$,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2,$$

а это и есть закон преломления Снелля. (Аналогично можно вывести из принципа Гюйгенса и закон отражения, но мы оставляем этот вывод в качестве задачи 1 в конце главы).

Когда световая волна переходит из одной среды в другую, ее частота остается прежней, а длина волны изменяется. Это видно из рис. 36.3, где по предположению каждая линия, изображающая волновой фронт, соответствует гребню (пику) волны. Следовательно,

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2 t}{v_1 t} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Если среда 1 – вакуум (или воздух), то $n_1 = 1$, $v_1 = c$, и, обозначив λ_1 просто λ , получим, что длина волны в среде с показателем преломления n ($= n_2$) равна

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}. \quad (36.1)$$

Этот результат согласуется с постоянством частоты f , так как $c = f\lambda$. Комбинируя последнее соотношение с соотношением $v = f\lambda_n$ в среде, где $v = c/n$, получаем $\lambda_n = v/f = c/nf = f\lambda/nf = \lambda/n$.

36.3. Интерференция. Опыт Юнга: интерференция от двух щелей

В 1801 г. англичанин Томас Юнг (1773–1829) получил убедительное подтверждение волновой природы света и даже сумел измерить длину световой волны. Схема знаменитого опыта Юнга интерференции от двух щелей изображена на рис. 36.4. Свет от источника (Юнг использовал Солнце) проходит через щель S и затем падает на второй экран, в котором на близком расстоянии друг от друга прорезаны две щели – S_1 и S_2 . Если свет состоит из частиц, то на экране, расположенном позади щелей, можно ожидать две яркие линии, как на рис. 36.4, б. Но Юнг наблюдал целую серию ярких линий, как показано

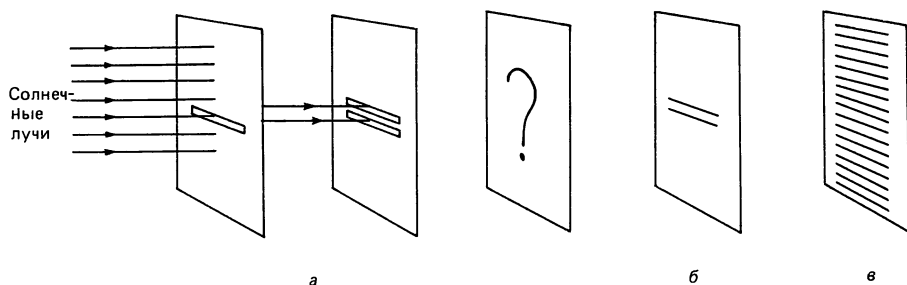


Рис. 36.4. *а* – опыт Юнга с двумя щелями; *б* – если свет – поток корпускул, то на экране, поставленном за щелями, можно было бы ожидать появления двух светлых линий; *в* – Юнг наблюдал много линий.

на рис. 36.4, *в*, и объяснил эту картину как результат интерференции волн. Чтобы понять ход рассуждений Юнга, представим себе плоские волны света с определенной частотой (такой свет называется *монохроматическим*), падающие на две щели, как показано на рис. 36.5. Вследствие дифракции волны после прохождения двух узких щелей распространяются, как это изображено на рисунке. Точно такую же интерференционную картину можно наблюдать, бросив в озеро два камня (рис. 15.21) или изучая акустическое поле двух громкоговорителей (рис. 16.4).

Чтобы понять, каким образом возникает интерференционная картина на экране, воспользуемся рис. 36.6. На нем изображены волны длиной λ , проходящие через щели S_1 и S_2 на расстоянии d одна от другой. За щелями волны распространяются по всем направлениям, но на рисунке изображены только волны под тремя различными углами θ . На рис. 36.6, *а* показаны волны, попадающие в центр экрана ($\theta = 0$). От каждой из двух щелей волны проходят одинаковое расстояние и достигают экрана в одной фазе. И в этом случае происходит усиливающая интерференция и в центре экрана появляется светлое пятно. Усиливающая интерференция возникает всякий раз, когда разность хода двух лучей равна одной длине волны (или любому целому числу длин волн), как показано на рис. 36.6, *б*. Но если один из лучей проходит дополнительно еще половину длины волны (т.е. разность хода равна $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$ и т.д.), то обе волны попадут на экран в противофазе

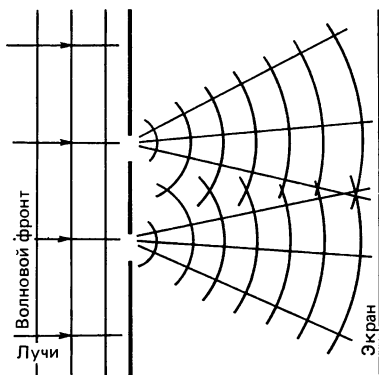


Рис. 36.5. Если свет – волна, то, проходя через одну из двух щелей, он интерферирует со светом, проходящим через другую щель.

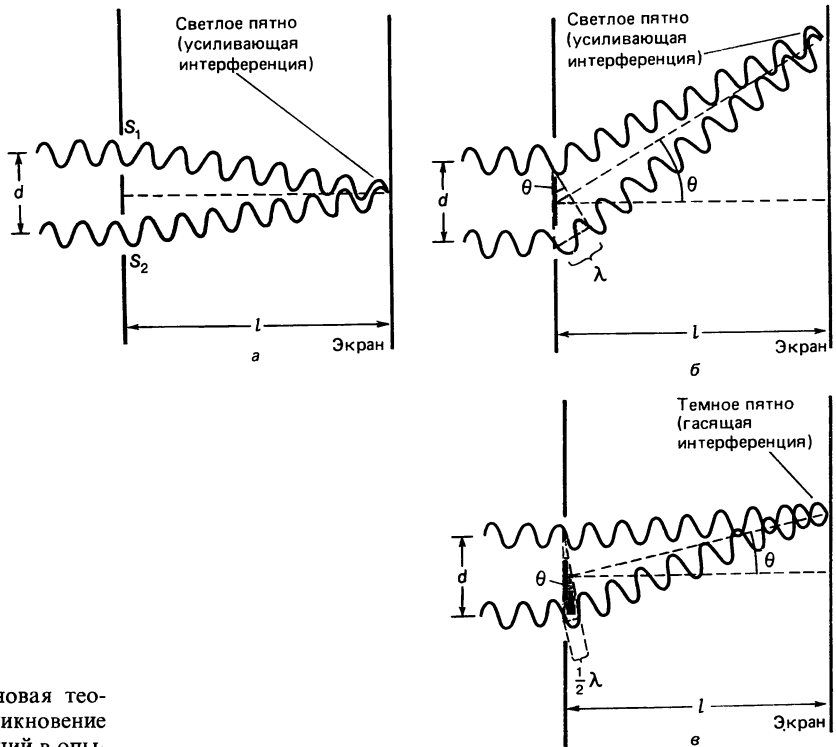


Рис. 36.6. Как волновая теория объясняет возникновение и расположение линий в опыте с двумя щелями.

(рис. 36.6, в). В этом случае происходит ослабляющая (гасящая) интерференция и экран оказывается темным. Так образуется серия светлых и темных полос (или *линий*).

Определим теперь точное положение светлых линий. Прежде всего заметим, что на рис. 36.6 масштаб несколько нарушен. В действительности расстояние d между щелями очень мало по сравнению с расстоянием l до экрана. Поэтому лучи от каждой щели, по существу, параллельны, и θ — угол, образуемый ими с горизонталью. Из затемненного треугольника на рис. 36.6, б видно, что дополнительное расстояние, проходимое нижним лучом, равно $d \sin \theta$. Усиливающая интерференция наблюдается на экране, если величина $d \sin \theta$ равна целому числу длин волн:

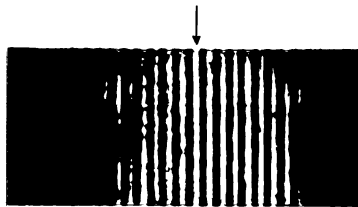
$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \left[\begin{array}{l} \text{усиливающая} \\ \text{интерференция} \end{array} \right]. \quad (36.2a)$$

Значение m называется *порядком* интерференционной полосы. *Ослабляющая (гасящая) интерференция* наблюдается в том случае, когда разность хода $d \sin \theta$ равна $1/2$, $3/2$, ... и т. д. длин волн:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \left[\begin{array}{l} \text{ослабляющая} \\ \text{интерференция} \end{array} \right]. \quad (36.2b)$$

Рис. 36.7. Интерференционные полосы в опыте с двумя щелями, обнаруженные на фотопленке, помещенной на экране. Стрелкой указана нулевая полоса. (Из книги: *Sears F. W., Zemansky M. W., Young H. D. College Physics 4th ed.*—Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Co., 1974, Figure 42-3. Печатается с разрешения.)

На рис. 36.7 показана интерференционная картина от двух щелей (интерференционные полосы зафиксированы на пленке, помещенной на экране).



Пример 36.1. Две щели находятся на расстоянии 0,100 мм друг от друга и отстоят на 1,20 м от экрана. От удаленного источника на щели падает свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. На каком примерно расстоянии друг от друга расположены светлые полосы на экране?

Решение. Так как $d = 0,100$ мм = $1,00 \cdot 10^{-4}$ м и $l = 1,20$ м, полоса первого порядка ($m = 1$) наблюдается при угле θ_1 , задаваемом соотношением

$$\sin \theta_1 = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(500 \cdot 10^{-9} \text{ м})}{1,00 \cdot 10^{-4} \text{ м}} = 5,00 \cdot 10^{-3}.$$

Это очень маленький угол, поэтому можно положить $\sin \theta = \theta$. Расстояние x_1 , на котором полоса первого порядка находится от центра экрана, определяется соотношением $x_1/l = \theta_1$, поэтому

$$x_1 = l\theta_1 = (1,20 \text{ м})(5,00 \cdot 10^{-3}) = 6,00 \text{ мм}.$$

Вторая полоса ($m = 2$) находится на расстоянии

$$x_2 = l\theta_2 = l \frac{2\lambda}{d} = 12,0 \text{ мм}$$

от центра и т. д. Таким образом, светлые полосы отстоят друг от друга примерно на 6,00 мм.

Из соотношения (36.2) видно, что положение всех полос, за исключением полосы нулевого порядка, зависит от длины волны. Следовательно, когда на две щели падает белый свет, то центральная полоса на экране будет белой, но полосы первого (и более высокого) порядка напоминают крошечные радуги. Угол θ будет наименьшим для фиолетового света и наибольшим для красного света. Измеряя положение интерференционных полос, Юнг сумел впервые определить длину волны видимого света [с помощью соотношения (36.2)]. Это позволило ему показать, что физические цвета различаются длиной волны.

Пример 36.2. Белый свет проходит через две щели, отстоящие друг от друга на расстоянии 0,50 мм. Интерференционная картина наблюдается на экране, который находится на расстоянии 2,5 м. Полоса первого порядка напоминает радугу, фиолетовую с одного края и красную с другого. Фиолетовый цвет находится примерно в 2,0 мм, а красный — в 3,5 мм от середины центральной белой полосы. Оцените длины волн фиолетового и красного цветов.

Решение. Воспользуемся соотношением (36.2а) при $m = 1$ и $\sin \theta \approx \theta$. Так как для фиолетового света $x = 2,0$ мм,

$$\lambda = \frac{d\theta}{m} = \frac{dx}{ml} = \frac{(5,0 \cdot 10^{-4} \text{ м})(2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м})}{2,5 \text{ м}} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

или 400 нм. Для красного света $x = 3,5$ мм, поэтому $\lambda \approx 700$ нм.

36.4. Когерентность

Две щели на рис. 36.6 действуют подобно источникам излучения. Такие источники называются **когерентными**, поскольку сдвиг фаз между испускаемыми ими волнами остается неизменным. Интерференционная картина наблюдается только для когерентных источников. Если заменить две щели двумя маленькими лампами (или освещать каждую щель своей лампой), то интерференционной картины не будет: свет одной лампы имеет случайный сдвиг по фазе относительно света другой лампы, и экран будет более или менее равномерно освещен. Два таких источника называются **некогерентными**. Когерентность – тема сложная, и мы лишь кратко коснемся ее. Два пучка света не обязательно должны совпадать по фазе, чтобы возникла интерференционная картина. Например, предположим, что перед нижней щелью на рис. 36.6 поместили стеклянную пластинку такой толщины, что пучок света, пройдя через нижнюю щель, отстает от пучка света, проходящего через верхнюю щель, на половину длины волны. Сдвиг фаз между верхним и нижним пучками будет постоянно равен 180° , тем не менее на экране будет наблюдаться интерференционная картина. (Не можете ли вы угадать, как она выглядит? Подсказка: центральное пятно будет не светлым, а темным.) Два пучка могут быть когерентными и в том случае, когда они в фазе и когда между ними существует фазовый сдвиг – важно **лишь**, чтобы сдвиг по фазе был **постоянным** во времени.

Когерентные источники волн на воде или звуковых волн гораздо легче получить, чем когерентные источники света: когерентными источниками будут два динамика, издающие звук одной и той же чистой частоты. Две антенны, соединенные с одним и тем же LC -генератором, будут когерентными источниками низкочастотных электромагнитных волн. Но LC -генераторов высокочастотных волн в области видимого света (10^{15} Гц) не существует, так как L и C невозможно сделать достаточно малыми. В качестве источников видимого света нам приходится использовать колебания (или ускорение) электрических зарядов в атомах. Например, атомы в нити лампы накаливания возбуждаются нагревом и отдают избыток энергии в виде «цугов» световых волн, каждый из которых длится лишь около 10^{-8} с. Видимый нами свет представляет собой сумму огромного числа таких волновых цугов со случайными сдвигами фаз. Поэтому две лампы накаливания представляют собой некогерентные источники света, и интерференция не происходит. Если в качестве источника света взять одну лампу, то опыт с интерференцией на двух щелях даст положительный результат при условии, что обе щели освещаются одной и той же частью нити, т. е. каждый пуг сферических волн проходит в равной мере через обе щели, так что пучки света,

проходящие через обе щели, имеют, в сущности, одинаковую амплитуду и постоянный сдвиг по фазе. Если же свет, проходящий через щели, испущен различными частями нити, то когерентность отсутствует, так как цуги волн от различных частей нити (т.е. испускаемые различными атомами, которые в данном случае служат микроскопическими источниками света) имеют случайный сдвиг по фазе. Интерференционная картина размывается: две щели оказываются не вполне когерентными источниками.

Так как любой макроскопический источник состоит из множества микроскопических источников (атомов), мы можем говорить о когерентности отдельного источника. Лампа накаливания – не очень когерентный источник света, поскольку между светом, испускаемым различными частями ее нити, отсутствует постоянный сдвиг фаз. Подлинно когерентный источник света – *лазер* – был разработан только в 50-х годах XX в. Каким образом в лазере возникает узкий пучок когерентного излучения, а также некоторые из приложений лазера, мы рассмотрим в гл. 41. При освещении двойной щели лазерным светом вследствие его когерентности интерференционная картина получается очень четкой.

Когерентность – понятие относительное: идеально когерентный пучок соответствовал бы идеальной синусоидальной световой волне (т.е. волне одной частоты), которая существует бесконечно долго. Полной некогерентности отвечает набор волн, сдвиг фаз между которыми хаотически меняется во времени. В качестве меры «относительной когерентности» можно принять четкость интерференционной картины от двух щелей.

Когерентность существенно зависит от интервала частот, присутствующих в волне. Рассмотрим, например, два динамика, издающих звук на одной и той же частоте. Сдвиг по фазе между волнами будет зависеть от положения слушателя (см. пример 16.8), но, где бы тот ни находился, этот сдвиг останется постоянным по времени, и поэтому звуковые волны будут когерентны. Если же частоты слегка различны, то сдвиг фаз медленно изменяется (будут слышны биения), и звуковые волны окажутся некогерентными. Предположим теперь, что динамики издают один и тот же звук, содержащий многие частоты, которые изменяются во времени (например, звучит музыка). Если вы находитесь точно посередине между динамиками, то обе звуковые волны достигают вас в фазе. Но при любом другом положении волны должны проходить неодинаковые пути, и различные их составляющие будут интерферировать. Следовательно, сдвиг фаз между двумя волнами будет непрерывно меняться, и волны окажутся некогерентными относительно друг друга.

36.5. Видимый спектр и дисперсия

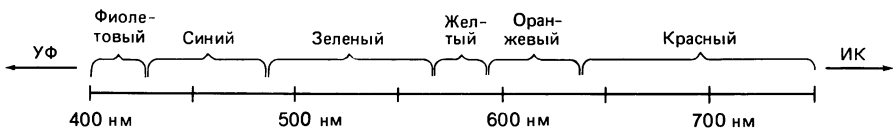
Волновая теория позволяет успешно описать два наиболее важных свойства света: его интенсивность (яркость) и цвет. *Интенсивность* света определяется квадратом амплитуды волны, как и для любой другой волны [см. разд. 15.3 или формулы (33.15) и (33.17)]. *Цвет* зависит от длины волны или частоты света. Видимый свет (тот, который воспринимает наш глаз) соответствует диапазону длин волн от 400 до 750 нм¹⁾. Это *видимая область спектра* (или *оптический диапазон*). Она включает различные цвета — от фиолетового до красного (рис. 36.8). Свет с длинами волн короче 400 нм называется ультрафиолетовым (УФ), а с длинами волн больше 750 нм — инфракрасным (ИК)²⁾. Хотя человеческий глаз не воспринимает УФ- и ИК-излучение, некоторые типы фотопленок обладают чувствительностью к УФ и ИК.

Известно, что призма разлагает белый цвет на все цвета радуги. Происходит это из-за того, что показатель преломления зависит от длины волны. Характер такой зависимости для некоторых сред показан на рис. 36.9. Белый свет представляет собой смесь всех длин волн видимого диапазона. Падая на призму (рис. 36.10), волны различной длины преломляются на различные углы. Так как показатель преломления больше для более коротких волн, фиолетовый свет преломляется сильнее, а красный — слабее, что и показано на рисунке. Подобное разложение белого света в полный спектр называют *дисперсией*.

Ярким примером дисперсии (например, на капельках воды) служит радуга. Ее можно наблюдать, глядя на водопад, если солнце находится у вас за спиной. На рис. 36.11 показано, как красные и фиолетовые лучи преломляются сферическими капельками воды и отражаются от их внутренней поверхности. Красные лучи преломляются меньше и попадают в глаз наблюдателя от капелек, находящихся на большей высоте. Именно поэтому верхняя полоса радуги всегда оказывается красного цвета.

В основе великолепной игры бриллиантов (ограненных и отшлифованных алмазов) лежит совместный эффект дисперсии и полного внутреннего отражения. Так как

Рис. 36.8. Спектр видимой области спектра (показаны диапазоны длин волн, соответствующие различным цветам).



¹⁾ Иногда длины волн света измеряют в ангстремах (Å): 1 Å = 1 · 10⁻¹⁰ м. В этих единицах видимый свет занимает диапазон от 4000 до 7500 Å.

²⁾ Полный спектр электромагнитных волн изображен на рис. 33.10.

Рис. 36.9. Показатель преломления как функция длины волны.

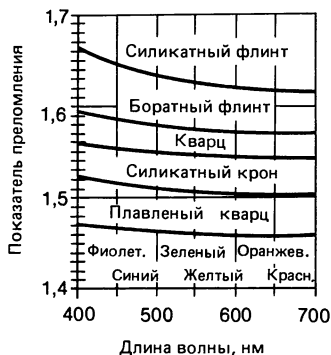


Рис. 36.10. Белый свет разлагается призмой в видимый спектр.

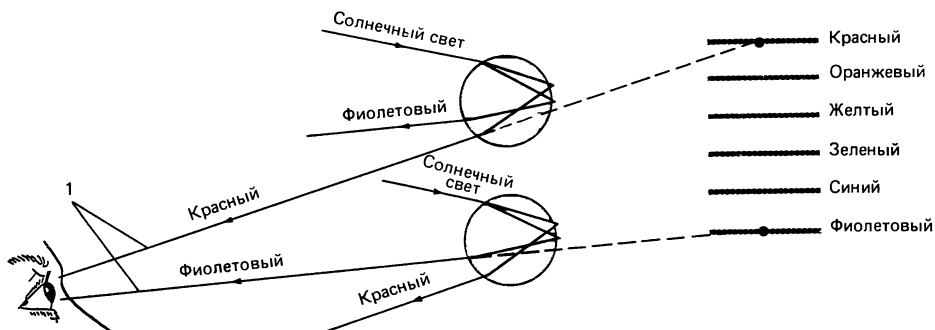
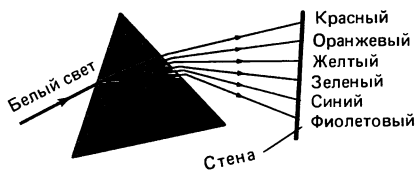


Рис. 36.11. Образование радуги. 1 – эти два луча видит наблюдатель (не в масштабе).

алмазы имеют необычайно высокий показатель преломления (около 2,4), критический угол полного внутреннего отражения составляет у них всего лишь 25°. Поэтому падающий свет успевает многократно отразиться от внутренних граней, прежде чем приобретет угол падения меньше 25° и выйдет наружу. В процессе многочисленных отражений свет проходит внутри бриллианта достаточно большой путь для разделения цветов, что позволяет увидеть яркий блеск и переливы всех цветов.

36.6. Распределение интенсивности в интерференционной картине от двух щелей

В разд. 36.3 было показано, что интерференционная картина, создаваемая когерентным светом, падающим на две щели – S_1 и S_2 (рис. 36.6 и 36.7), имеет вид чередующихся светлых и темных полос. Если две монохроматические

волны с длиной λ попадают на щели в фазе, то максимумы (середины ярких полос) возникают под углами θ , удовлетворяющими соотношению

$$d \sin \theta = m\lambda,$$

а минимумы (середины темных полос) – под углами θ , удовлетворяющими соотношению

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

где m – целое число ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Определим распределение интенсивности света в интерференционной картине (т.е. при всех углах θ). Для простоты предположим, что если закрыть любую из щелей, то свет дифрагирует на другой щели, равномерно освещая значительную часть экрана. Интенсивность I света в любой точке пропорциональна квадрату амплитуды световой волны (разд. 15.3). Поскольку свет – электромагнитная волна, то интенсивность I пропорциональна квадрату электрического поля E или магнитного поля B (разд. 33.7). Но величины E и B пропорциональны, поэтому несущественно, какую из них выбрать. Обычно выбирают E и записывают: $I \sim E^2$. Напряженность электрического поля E в любой точке P (рис. 36.12) представляет собой сумму напряженностей электрического поля E_1 и E_2 волн, прошедших через каждую из двух щелей. Так как векторы E_1 и E_2 , по существу, параллельны, величина напряженности электрического поля под углом θ (т.е. в точке P) равна

$$E_\theta = E_1 + E_2.$$

Слагаемые E_1 и E_2 синусоидально изменяются во времени с частотой $f = c/\lambda$, но различаются по фазе, которая зависит от расстояния, проходимого волной от щели. Таким образом, мы можем записать величину напряженности электрического поля в точке P для света, приходящего от каждой из двух щелей:

$$E_1 = E_{10} \sin 2\pi f t,$$

$$E_2 = E_{20} \sin (2\pi f t + \delta),$$

(36.3)

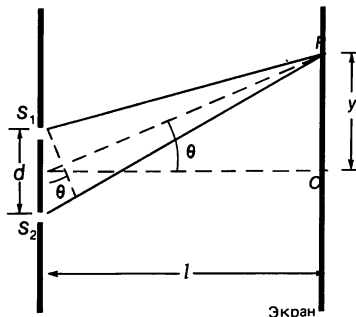
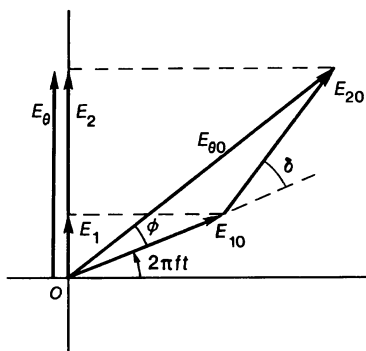


Рис. 36.12. Определение интенсивности в интерференции от двух щелей.

Рис. 36.13. Фазовая диаграмма для интерференционной картины от двух щелей.



где E_{10} и E_{20} – амплитуды, а δ – разность фаз. Величина δ зависит от угла θ . Определим характер этой зависимости. В центре экрана (в точке O) $\delta = 0$. Если разность хода от точки P до S_1 и S_2 равна $d \sin \theta = \lambda/2$, то обе волны придут в точку P в противофазе, и $\delta = \pi$ (или 180°). Если же $d \sin \theta = \lambda$, то обе волны различаются по фазе на $\delta = 2\pi$. В общем случае разность фаз δ связана с углом θ соотношением

$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{d \sin \theta}{\lambda},$$

или

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta. \quad (36.4)$$

Чтобы определить $E_\theta = E_1 + E_2$, нам необходимо сложить скаляры E_1 и E_2 , которые являются синусоидальными функциями времени с разностью фаз δ . Один из способов вычисления суммы E_1 и E_2 состоит в построении *фазовой диаграммы*. (В гл. 32 мы уже прибегали к этому способу.) Как видно из рис. 36.13, сначала надо построить вектор длиной E_{10} , изображающий амплитуду поля E_1 [см. соотношение (36.3)], и вектор E_{20} , образующий заданный угол δ с E_{10} и изображающий амплитуду поля E_2 . При вращении диаграммы с частотой f относительно начала координат проекции E_{10} и E_{20} на вертикальную ось описывают зависимость E_1 и E_2 от времени [см. соотношение (36.3)]. Пусть $E_{\theta 0}$ – «векторная сумма» E_{10} и E_{20} ¹⁾. В действительности $E_{\theta 0}$ – амплитуда суммы $E = E_1 + E_2$, и проекция $E_{\theta 0}$ на вертикальную ось равна E_θ . Если щели освещены одинаково, то $E_{10} = E_{20} = E_0$. Из чертежа (рис. 36.13) видно, что угол ϕ равен $\delta/2$, и поэтому

¹⁾ Следует подчеркнуть, что мы производим сложение не реальных векторов напряженностей электрического поля, а вспомогательных «фазовых векторов» для получения амплитуды с учетом разности фаз обеих волн.

$$E_{\theta} = E_{\theta 0} \sin \left(2\pi f t + \frac{\delta}{2} \right). \quad (36.5a)$$

Кроме того, видно также, что

$$E_{\theta 0} = 2E_0 \cos \phi = 2E_0 \cos \frac{\delta}{2}, \quad (36.5b)$$

и разность фаз δ определяется соотношением (36.4).

В действительности нас интересует не E_{θ} как функция времени, поскольку частота видимого света (от 10^{14} до 10^{15} Гц) слишком велика, а средняя интенсивность, пропорциональная квадрату амплитуды $E_{\theta 0}^2$. Отбросим слово «средняя». Пусть I_{θ} ($I_{\theta} \sim E_{\theta}^2$) – интенсивность в произвольной точке P экрана под углом θ к горизонтали, а I_0 – интенсивность в точке O (центр экрана), где $\theta = \delta = 0$ [$I_0 \sim (E_{10} + E_{20})^2 = (2E_0)^2$]. Тогда отношение I_{θ}/I_0 равно отношению квадратов амплитуд электрического поля в этих точках:

$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \frac{E_{\theta 0}^2}{(2E_0)^2} = \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

[мы воспользовались формулой (36.5b)]. Таким образом, интенсивность I в любой точке связана с максимальной интенсивностью I_0 в центре экрана соотношением

$$I_{\theta} = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (36.6)$$

где разность фаз δ определяется формулой (36.4). Именно это соотношение и требовалось найти. Из соотношения (36.6) видно, что максимумы появляются там, где $\cos \delta/2 = \pm 1$, т. е. при $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$; из формулы (36.4) мы заключаем, что δ принимает эти значения при

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Минимумы возникают там, где $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$, что соответствует

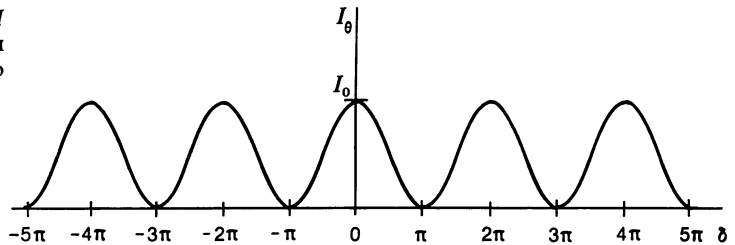
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Эти результаты совпадают с полученными в разд. 36.3. Но теперь мы не только знаем положения максимумов и минимумов, но и можем по формуле (36.6) определить интенсивность во всех точках.

Если расстояние l от щелей до экрана велико по сравнению с расстоянием d между щелями ($l \gg d$) и мы имеем дело только с точками P , отстоящими от центра O на расстояние y , малое по сравнению с l ($y \ll l$), то (рис. 36.12)

$$\sin \theta = \frac{y}{l}.$$

Рис. 36.14. Интенсивность I как функция разности фаз δ и положения на экране y (по предположению $y \ll l$).



Отсюда следует, что

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} y,$$

и соотношение (36.6) принимает вид

$$I = I_0 \left[\cos \left(\frac{\pi d}{\lambda l} y \right) \right]^2 \quad [y \ll l, d \ll l]. \quad (36.7)$$

Зависимость интенсивности I от разности фаз δ представлена на рис. 36.14. В приближении (36.7) можно считать, что по горизонтальной оси отложено также и y — расстояние от центра экрана.

Распределение интенсивности, описываемое формулами (36.6) и (36.7) и показанное на рис. 36.14, представляет собой серию максимумов одинаковой высоты. Оно основано на предположении, что каждая щель (одна) может равномерно освещать весь экран. Такое допущение никогда не выполняется, в чем мы убедимся при рассмотрении дифракции в следующей главе. Будет показано, что центральный максимум самый высокий, а каждый последующий максимум (по обе стороны) убывает по величине.

36.7. Интенсивность при когерентном и некогерентном источниках

Рассмотрим кратко, каким будет распределение интенсивности, если щели заменить двумя *некогерентными* источниками света одинаковой интенсивности ($E_{10} = E_{20} = E_0$). Предположим вновь, что каждый источник в отдельности равномерно освещает экран. Разность фаз δ (двух волн в произвольной точке P) изменяется хаотически; поэтому в соотношении (36.6) нам необходимо взять среднее по времени от $\cos^2 \delta/2$, которое равно $1/2$. Соответственно интенсивность $I_{\text{неког}}$ от двух некогерентных источников будет равна

$$I_{\text{неког}} = \frac{1}{2} I_{\text{ког}},$$

где $I_{\text{ког}}$ — интенсивность от двух когерентных источников в

центрального максимуме [$I_{\text{ког}}$ совпадает с I_0 в формуле (36.6)]. Этот результат, подтверждаемый экспериментом, может быть получен и другим способом. Когда источники когерентны, мы находим интенсивность, суммируя амплитуды испускаемых ими волн и возводя полученную сумму в квадрат:

$$I_{\text{ког}} \sim (E_{10} + E_{20})^2,$$

как это делалось в предыдущем разделе. Но когда два источника некогерентны, интенсивность одной волны никак не связана с интенсивностью другой волны; обе интенсивности суммируются:

$$I_{\text{неког}} \sim E_{10}^2 + E_{20}^2,$$

т.е. сначала возводим в квадрат амплитуды волн, а уже *затем* складываем их. При $E_{10} = E_{20} = E_0$ два выписанных выше соотношения принимают вид

$$I_{\text{ког}} \sim (2E_0)^2 = 4E_0^2,$$

$$I_{\text{неког}} \sim E_0^2 + E_0^2 = 2E_0^2,$$

откуда

$$I_{\text{неког}} = \frac{1}{2} I_{\text{ког}},$$

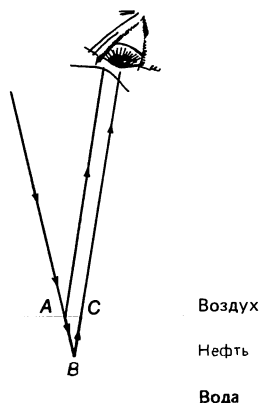
что соответствует полученному выше результату.

Следует подчеркнуть, что полная энергия, падающая на экран, будет одной и той же как при когерентности, так и при некогерентности источников (в предположении, что источники имеют одну и ту же интенсивность). Различие состоит в том, что в случае некогерентных источников энергия распределяется равномерно с интенсивностью $1/2 I_0$, в то время как в случае когерентных источников она концентрируется в максимумах, но ее средняя интенсивность равна $1/2 I_0$, так как среднее от $\cos^2 \delta/2$ в соотношении (36.6) по большому числу пиков равно $1/2$. Таким образом, не возникает никакого противоречия с законом сохранения энергии.

36.8. Интерференция в тонких пленках

Интерференция света порождает многочисленные явления, наблюдаемые нами в повседневной жизни, например радужные переливы мыльных пузырей или тонких пленок нефти на воде. В этих и во многих других случаях окраска возникает в результате усиливающей интерференции света, отраженного двумя поверхностями тонкой пленки. Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим тонкую пленку нефти на воде (рис. 36.15). Часть падающего света (от солнца или уличного фонаря) отражается в точке A от верхней поверхности, а часть света проходит внутрь пленки и отражается в точке B от ее нижней поверхности.

Рис. 36.15. Свет отражается от верхней и нижней поверхностей тонкой пленки нефти, лежащей на воде.



Свет, отраженный от нижней поверхности, проходит дополнительное расстояние ABC . Если расстояние ABC равно длине волны или целому числу длин волн, то обе волны (когерентные, так как они возникают в одной точке источника), интерферируя, усилят друг друга, и мы увидим свет¹⁾. Если же путь ABC равен $1/2\lambda$, $3/2\lambda$ и т. д., то обе волны окажутся в противофазе и, интерферируя, погасят друг друга. Под длиной волны λ здесь следует иметь в виду длину волны в пленке нефти [см. формулу (36.1)].

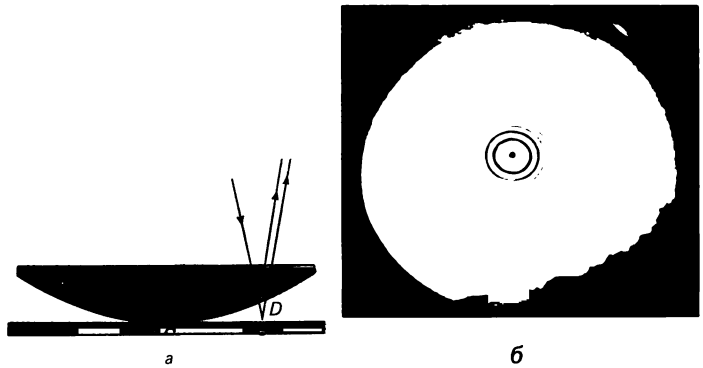
Если на такую пленку падает белый свет, путь ABC будет равен λ (или $m\lambda$, где m — целое число) при данном угле зрения только для определенной длины волны. Соответствующая окраска будет очень яркой. Для света, падающего под иным углом, путь ABC будет короче или длиннее, и усиливающая интерференция происходит для другого цвета. Таким образом, при наличии протяженного (неточечного) источника белого света мы увидим яркие разноцветные полосы, расположенные друг за другом. Неоднородность пленки по толщине также изменяет путь ABC и, следовательно, влияет на окраску наиболее ярко отраженного света.

Если искривленная стеклянная поверхность соприкасается с плоской стеклянной поверхностью (рис. 36.16, а), то при освещении сверху монохроматическим светом можно наблюдать серию концентрических кругов. Они называются *кольцами Ньютона*²⁾ и возникают вследствие интерференции света, отраженного верхней и нижней гра-

¹⁾ Мы уже кратко упоминали о том, что это верно, если показатель преломления нефти меньше, чем показатель преломления воды.

²⁾ Хотя Ньютон дал подробное описание этих колец, их впервые наблюдал и описал его современник Роберт Гук. Ньютон не осознал важности этого явления как подтверждения правильности волновой теории света.

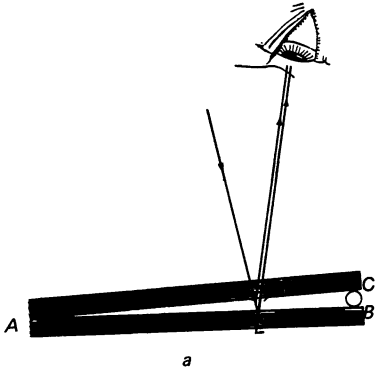
Рис. 36.16. Кольца Ньютона. (Круглые пятна в различных местах фотографии возникли из-за муарового рисунка при печати. Фотография воспроизводится с разрешения компании Bausch and Lomb, Inc.)



ницами *воздушного зазора* между стеклами. Поскольку толщина этого зазора (эквивалентного тонкой пленке) растет по мере удаления от центральной точки касания к краям, дополнительный путь нижнего луча (*BCD*) также увеличивается. Там, где он последовательно равен 0 , $1/2\lambda$, $3/2\lambda$, 2λ и т. д., происходит соответственно ослабляющая и усиливающая интерференция, и мы наблюдаем серию светлых и темных кругов (рис. 36.16, б).

Заметим, что точка соприкосновения двух стекол (точка *A* на рис. 36.16, а) оказывается темной (рис. 36.16, б). Так как разность хода в этой точке равна нулю, можно было бы ожидать, что лучи, отражающиеся от верхней и нижней границ воздушного зазора, находятся в фазе, и точка соприкосновения будет светлой. Но в действительности она оказывается темной, и это свидетельствует о том, что лучи находятся в противофазе. Так может происходить только вследствие того, что одна из волн при отражении изменяет свою фазу на 180° . Как показывают опыт с кольцами Ньютона и другие эксперименты, *при отражении света от среды с большим показателем преломления его фаза изменяется на 180°* . При отражении света от среды с меньшим показателем преломления его фаза не изменяется. (Это следует из уравнений Максвелла; аналогией служит волна, бегущая вдоль веревки, связанной из двух кусков различной толщины и плотности: если второй кусок веревки тяжелее первого, волна, отражаясь от границы их раздела, обращается, как на рис. 15.16; если же второй кусок легче первого, то изменения фазы волны не происходит.) Таким образом, свет, отражающийся от искривленной поверхности, ограничивающей воздушный зазор сверху (рис. 36.16, а), не изменяет своей фазы. На нижней поверхности, где свет падает из воздуха на стекло, при его отражении фаза изменяется на 180° . В результате разность фаз двух лучей, отражающихся в точке касания *A* стекол (где толщина воздушного зазора близка к нулю), равна 180° , или $1/2\lambda$, т. е. лучи оказываются в противофазе, и возникает темное пятно. Следующие темные кольца воз-

никают при условии, что разность хода BCD на рис. 36.16, a равна целому числу длин волн. Светлые кольца возникают там, где разность хода равна $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$ и т. д., так как изменение фазы на одной из поверхностей означает дополнительную разность хода $\frac{1}{2}\lambda$.



б

Рис. 36.17. a – световые лучи, отражаясь от верхней и нижней поверхностей тонкого воздушного клина, интерферируют и образуют светлые и темные полосы; b – интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин (воспроизводится с разрешения The Van Keuren Co); $в$ – интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин (воспроизводится с разрешения фирмы Bausch and Lomb, Inc.).



в

Пример 36.3. Очень тонкий провод диаметром $7,35 \cdot 10^{-3}$ мм помещен между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами (рис. 36.17, a). Свет с длиной волны в воздухе 600 нм падает (и наблюдается) перпендикулярно пластинам. Наблюдатель видит серию светлых и темных полос (рис. 36.17, b). Сколько светлых и темных полос видит наблюдатель в данном случае? Какой будет полоса рядом с проводом – светлой или темной?

Решение. Тонкой пленкой в данном случае служит воздушный клин между

двумя стеклянными пластинами. Из-за изменения фазы при отражении от нижней поверхности темные полосы соответствуют разности хода $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ и т. д. Так как световые лучи перпендикулярны пластинам, разность хода равна $2t$, где t – толщина воздушного зазора в данной точке. Следовательно, темные полосы наблюдаются там, где

$$2t = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Светлые полосы наблюдаются там, где

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m - \text{целое число. В том}$$

месте, где находится провод, $t = 7,35 \cdot 10^{-6}$ м. В этой точке разность хода составляет $2 \cdot (7,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}) / (6,00 \times 10^{-7} \text{ м}) = 24,5$ длины волн. Так как это — полуцелое число, примыкающая к проводу полоса будет светлой. Всего вдоль пластин уложится 25 темных полос, соответствующих разности хода $0\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, 24\lambda$, включая одну «полосу» в

точке касания A ($m = 0$). Между ними расположатся 24 светлые полосы плюс одна полоса у провода, т.е. всего 25 светлых полос. Светлые и темные полосы будут ровными только при идеальной гладкости стеклянных пластин. В противном случае полосы искривятся (рис. 36.17, в). Это очень чувствительный метод проверки на гладкость поверхности.

Если клин между двумя стеклянными пластинами из примера 36.3 заполнить каким-нибудь прозрачным веществом, отличным от воздуха (например, водой), то картина сместится. Происходит это вследствие изменения длины волны света. В среде с показателем преломления n длина волны равна $\lambda_n = \lambda/n$, где λ — длина волны в вакууме. Если тонкий клин из примера 36.3 заполнен водой, то $\lambda_n = 600 \text{ нм} / 1,33 = 450 \text{ нм}$, и вместо 25 темных линий их будет 33.

Если на тонкий клин, изображенный на рис. 36.16, а или 36.17, а, падает белый, а не монохроматический свет, то наблюдается серия окрашенных полос. Окраска обусловлена тем, что при отражении света усиливающая интерференция отраженного света для различных длин волн происходит в различных участках клина. Различие в толщине отчасти объясняет и радужные переливы при отражении света от мыльного пузыря или тонкой пленки нефти на поверхности лужи или озера. Длина волны, отвечающая самой яркой окраске, как мы уже знаем, зависит от угла зрения.

Пример 36.4. Мыльный пузырь кажется зеленым ($\lambda = 540 \text{ нм}$) в точке, ближайшей к наблюдателю. Какова его минимальная толщина? Предположим, что $n = 1,35$.

Решение. От ближайшей к наблюдателю точки сферической поверхности свет отражается перпендикулярно. Следовательно, разность хода равна $2t$, где t — тол-

щина мыльной пленки. При отражении света от наружной поверхности пузыря фаза изменяется на 180° . При отражении света от внутренней поверхности пузыря изменения фазы не происходит. Следовательно, зеленый свет отвечает минимальной разности хода $\frac{1}{2}\lambda$. Таким образом, $2t = \lambda/2n$, откуда $t = 540 \text{ нм} / (4 \cdot 1,35) = 100 \text{ нм}$.

Важным применением интерференции в тонких пленках служит создание неотражающей «просветленной» оптики, в частности линз, путем покрытия такими пленками. Стекло отражает около 4% падающего на него света. Высококачественные камеры, микроскопы и прочие оптические устройства могут содержать от 6 до 10 линз. Отражение всех их поверхностей может существенно уменьшить интенсивность света, а многократные отражения приводят к возникновению «вуали», ухудшающей качество изображения. Нанесение на поверхность линз очень тонкого покрытия позволяет значительно умень-

шить влияние этих факторов. Коэффициент отражения света на границе зависит от разности показателей преломления двух сред. В идеальном случае покрытие должно иметь показатель преломления, равный среднему геометрическому между показателями преломления воздуха и стекла; тогда коэффициент отражения на каждой поверхности будет примерно одинаковым, и при определенной длине волны, зависящей от толщины покрытия, произойдет почти полная ослабляющая интерференция. При близких длинах волн интерференция будет по крайней мере частично ослабляющей, но ясно, что с помощью однослойного покрытия нельзя устранить отражения при всех длинах волн. Тем не менее даже однослойное покрытие позволяет уменьшить коэффициент отражения падающего света от 4 до 1%. Нередко покрытие выбирается с таким расчетом, чтобы исключить центральную часть спектра (вблизи 550 нм). Крайя спектра – красный и фиолетовый – будут ослабляться меньше. Поскольку смесь фиолетового и красного дает пурпурный цвет, линзы с просветляющим покрытием отливают пурпуром. Линзы с двумя и тремя слоями покрытий будут еще слабее отражать свет в более широком диапазоне длин волн.

Пример 36.5. Чему равна толщина оптического покрытия из MgF_2 ($n = 1,38$), предназначенного для гашения света в окрестности длин волн 550 нм при нормальном падении на стекло с $n = 1,50$?

Решение. При отражении света от передней и от задней поверхностей покрытия происходит сдвиг по фазе на 180° . Следовательно, для того чтобы при нормальном падении возникла ослабляющая

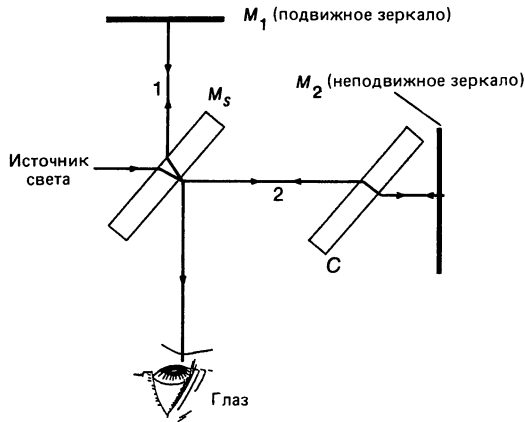
интерференция, на толщине покрытия должно укладываться полуцелое число длин волн, т. е. $2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$, где m – целое число. Обычно выбирают минимальную толщину ($m = 0$), так как при этом ослабляющая интерференция возникает в самом широком диапазоне углов. При $m = 0$ получаем $t = \lambda_n/4 = \lambda/4n = (550 \text{ нм})/(4 \cdot 1,38) = 99,6 \text{ нм}$.

*36.9. Интерферометр Майкельсона

На интерференции в тонкой пленке основан принцип действия *интерферометра Майкельсона* (рис. 36.18)¹⁾. Он был изобретен американским физиком Альбертом А. Майкельсоном (разд. 34.2). Монохроматический свет от отдельной точки протяженного источника падает на полупрозрачное (посеребренное) зеркало M_s (которое *расщепляет пучок*). Половина интенсивности пучка направляется к неподвижному зеркалу M_2 и отражается обратно. Другая половина отражается от зеркала M_s , падает на подвижное зеркало M_1 (которое перемещается винтом с тонкой резьбой) и отражается от него. Отраженный пучок

¹⁾ Существуют интерферометры и других типов, но интерферометр Майкельсона наиболее известен.

Рис. 36.18. Интерферометр Майкельсона.



1 проходит через M_s и попадает в глаз наблюдателя. Часть пучка 2 отражается от зеркала M_s и также попадает в глаз наблюдателя. Обычно на пути пучка 2 помещают компенсатор C в виде пластины из прозрачного стекла (его изготавливают из той же пластины, что и зеркало M_s), чтобы оба пучка проходили с точностью до долей длины волны слой стекла одинаковой толщины. Если оба пути одинаковы, то будет происходить усиливающая интерференция, и наблюдатель увидит свет. Если подвижное зеркало отодвинуть на расстояние $\lambda/4$, то пучок 1 будет проходить дополнительное расстояние, равное $\lambda/2$ (так как расстояние $\lambda/4$ ему придется пройти туда и обратно), будет происходить ослабляющая интерференция и наблюдатель обнаружит темноту. Если зеркало M_1 продолжать двигать дальше, вновь появится свет (когда разность хода пучков станет равной длине волны λ), затем снова будет темнота и т. д.

Глаз наблюдателя видит изображение зеркала M_2 вблизи подвижного зеркала M_1 , поэтому в действительности между изображением зеркала M_2 и зеркалом M_1 существует тонкий слой воздуха («тонкая пленка»). Если зеркало M_1 слегка наклонить, то воздушный зазор принимает форму клина, как на рис. 36.17, и наблюдатель увидит серию светлых и темных полос. Если теперь изменять положение зеркала M_1 , то светлые и темные полосы будут перемещаться влево или вправо. Когда разность хода составит большое число длин волн, наблюдатель при строго параллельных зеркалах M_1 и M_2 уже не увидит почти равномерной освещенности или затемнения. Из-за неодинаковой разности хода при различных углах зрения наблюдатель увидит картину, состоящую из колец, напоминающих кольца Ньютона (см. 36.16, б). При перемещении зеркала M_1 будет казаться, что темные и светлые кольца возникают (или исчезают) в центре картины.

Интерферометр Майкельсона позволяет проводить очень точные измерения длин волн. При перемещении

зеркала M_1 всего лишь на $\frac{1}{4}\lambda$ происходит явственный переход от освещенности к затемнению. Для $\lambda = 400$ нм это соответствует точности в 100 нм, или 10^{-4} мм! Еще большей точности можно достичь, наблюдая перемещения полос в случае непараллельных зеркал. Подсчитывая число полос или их долей, можно достичь необычайной точности в измерении длин.

Майкельсон понимал, что его интерферометр можно использовать для выражения эталона длины (стандартного метра) через число длин волн какой-нибудь линии спектра. В 1960 г. в качестве стандарта была выбрана определенная оранжево-красная линия в спектре криптона-86 (атомов криптона с атомной массой 86). Тщательно повторенные измерения длины старого эталона метра (т.е. расстояния между двумя делениями на платино-иридиевом стержне, хранящемся в Париже), позволили установить, что 1 м равен 1 650 763, 73 длины волн этого света. Эта величина и принята ныне за *определение метра*. В 1983 г. был принят новый эталон метра, выраженный через скорость света (разд. 1.4).

* 36.10. Сила света

Хотя *интенсивность* света (как и любой электромагнитной волны) характеризуется величиной вектора Пойнтинга и измеряется в ваттах на квадратный метр, полная выходная мощность источника может измеряться в ваттах (соответствующая величина называется *поток излучения*), но ни интенсивность света, ни мощность источника не позволяют адекватно характеризовать зрительное ощущение яркости света. Дело в том, что нас интересует только видимая область спектра, в то время как названные выше величины учитывают все длины волн. Кроме того, необходимо иметь в виду различную чувствительность глаза к разным длинам волн: человеческий глаз наиболее чувствителен к центральной (желтой) части спектра (550 нм), поэтому желтый источник кажется нам ярче красного или синего источника такой же мощности.

Все эти факторы учтены в величине, получившей название *световой поток* F и измеряемой в люменах (лм); 1 лм экспериментально определяется как яркость поверхности платины площадью $1/60$ см² при температуре плавления (1770 °С). Это эквивалентно мощности света с длиной волны 550 нм при $1/621$ Вт.

Так как световой поток от источника может оказаться неоднородным, вводится *сила света* I_s , т.е. световой поток, приходящийся на единицу телесного угла — стерадиан (ср). Сила света измеряется в канделах (кд); 1 кд = 1 лм/ср.

Освещенностью E называется световой поток, падающий на единичную площадку: $E = F/A$. Освещенность

измеряется в люменах на квадратный метр (лм/м²) и позволяет судить об интенсивности светового потока, падающего на поверхность.

Мы не будем подробнее вдаваться в этот круг вопросов. О них было упомянуто лишь для полноты, так как *сила света*, измеряемая в системе СИ в канделах (кд), является одной из семи основных величин этой системы. (См. разд. 1.5 и табл. 1.2.) С шестью остальными величинами (и единицами их измерения) мы уже встречались: длина (м), время (с), масса (кг), электрический ток (А), температура (К) и количество вещества (моль).

Пример 36.6. Яркость одного из типов 100-ваттной лампы оценивается в 1700 лм. Определите а) силу света и б) освещенность на расстоянии 2,0 м. Предполагается равномерность светового потока по всем направлениям.

Решение. а) Полная сфера соответствует 4π ср. Следовательно, $I_t = 1700 \text{ лм}/4\pi \text{ ср} = 135 \text{ кд}$. Сила света от

расстояния не зависит. б) На расстоянии $d = 2,0 \text{ м}$ от источника световой поток, приходящийся на единичную площадку, равен

$$E = F/4\pi d^2 = 1700 \text{ лм}/(4\pi)(2,0 \text{ м})^2 = 34 \text{ лм}/\text{м}^2.$$

Освещенность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Заключение

Явления интерференции и дифракции света служат серьезными аргументами в пользу волновой теории света. Эта теория позволяет также объяснить преломление света и более медленное распространение света в прозрачных твердых телах и жидкостях, чем в воздухе. Длина волны света в среде с показателем преломления n равна $\lambda_n = \lambda/n$, где λ – длина волны в вакууме; частота света остается в среде неизменной.

Интерференция света была убедительно доказана в опыте Юнга с двумя щелями. Наблюдавшиеся светлые полосы волновая теория объяснила усиливающей интерференцией пучков, прошедших через две щели, при разности хода, равной целому числу длин волн. Темные полосы между светлыми возникали в результате ослабляющей интерференции при разности хода, равной $1/2\lambda$, $3/2\lambda$ и т. д. Углы θ , при которых происходит усиливающая интерференция, определяются соотношением $\sin \theta = m\lambda/d$, где λ – длина волны света, d – расстояние между щелями m – целое число (0, 1, 2, ...). Гасящая интерференция происходит при углах θ , определяемых соотношением $\sin \theta = (m + 1/2)\lambda/d$. Интенсивность света I в любой точке интерференционной картины может быть вычислена с помощью фазовой диаграммы, которая предсказывает, что $I = I_0 \cos^2 \delta/2$, где I_0 – интенсивность при $\theta = 0$, а фазовый угол δ определяется по формуле $\delta = 2\pi d \sin \theta/\lambda$.

Два источника света идеально *когерентны*, если испускаемые ими волны синусоидальны, имеют одинаковую

частоту и постоянную во времени разность фаз. Если разность фаз световых волн, испускаемых двумя источниками, хаотически меняется во времени (как, например, в случае двух ламп накаливания), то такие источники *некогерентны*.

Цвет определяется длиной световой волны. Видимая область спектра простирается от 400 нм (фиолетовый цвет) примерно до 750 нм (красный цвет). Стеклообразные призмы (и другие прозрачные тела) могут разлагать белый цвет на составные части, так как показатель преломления зависит от длины волны (явление, известное под названием *дисперсия*).

Свет, отраженный от передней и задней поверхностей тонкой пленки прозрачного материала, может интерферировать. Интерференция в тонких пленках находит много практических приложений, например при просветлении линз и в кольцах Ньютона.

Вопросы

1. Применим ли принцип Гюйгенса к звуковым волнам? К волнам на поверхности воды?
2. Какие явления свидетельствуют о том, что свет переносит энергию?
3. Почему свет иногда описывают как лучи, иногда как волны?
4. Мы слышим звуки, доносящиеся из-за угла, но не видим того, что происходит за углом, хотя и звук, и свет – волны. Объясните, в чем их различие.
5. Можно ли определить длину световой волны, измеряя отражение или преломление света?
6. Почему интерференция от двух щелей служит более убедительным подтверждением волновой теории света, чем дифракция?
7. Предположим, что белый свет падает на две щели (рис. 36.6), одна из которых закрыта красным фильтром (700 нм), а другая – голубым (450 нм). Опишите, какая интерференционная картина возникнет на экране.
8. На каком основании мы считаем, что частота света не меняется при переходе из одной среды в другую?
9. Сравните эксперимент по интерференции от двух щелей для звуковых и световых волн. В чем сходство и в чем различия?
10. Каким должна быть разность хода двух лучей, чтобы их интерференция была ослабляющей?
11. Как изменилась бы интерференционная картина в опыте Френеля с двумя щелями, если всю экспериментальную установку погрузить в воду?
12. Как можно было бы создать «биения» световых волн – явления, хорошо известные в случае звуковых волн? Как можно было бы обнаружить такие «биения»?
13. Для чего на рис. 36.4. предназначен первый экран с одной щелью? Что произойдет, если эта щель будет не очень узкой? Что произойдет, если источником света вместо Солнца будет лазер?
14. Почему не возникает интерференционной картины от двух фар удаленной автомашины?
15. Объясните, почему, проходя через плоское оконное стекло, белый свет не разлагается на составные цвета, как при прохождении призмы?
16. Насколько различаются фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз для красного и для фиолетового света?
17. Опираясь на сведения, почерпнутые из разд. 36.6, проведите четкое различие между углами θ , ϕ и δ .
18. Почему интерференционные полосы хорошо различимы только в *тонких* пленках, например в мыльных пузырях, и не наблюдаются, например, в случае толстого куска стекла?
19. Почему по мере удаления от центра кольца Ньютона (рис. 36.16) располагаются все более тесно?
20. Некоторые просветленные линзы в отраженном свете отливают зеленым. Отражение каких длин волн должно полностью гаситься таким покрытием?
21. Капля нефти на поверхности пруда кажется наиболее яркой у краев, где ее толщина гораздо меньше длины волны видимого света. Что можно сказать о показателе преломления нефти?

22. Опишите, каким образом интерферометр Майкельсона можно было бы использовать для измерения показателя преломления воздуха.

Задачи

Раздел 36.2

1. (II) Используя принцип Гюйгенса, выведите закон отражения волн, т. е. покажите, что угол падения в случае плоской поверхности равен углу отражения.

Раздел 36.3

2. (I) Падая на две щели, расположенные на расстоянии 0,026 мм друг от друга, монохроматический свет образует полосу четвертого порядка под углом $6,4^\circ$. Чему равна длина волны света?

3. (I) Свет с длиной волны 680 нм падает на две щели и создает интерференционную картину, в которой полоса четвертого порядка находится на расстоянии 28 мм от центральной полосы. Экран отстоит от щелей на расстоянии 1,0 м. Чему равно расстояние между щелями?

4. (II) Телевизионные волны и радиоволны могут отражаться от соседних гор или самолетов, и отраженные сигналы могут интерферировать с прямым сигналом от станции. а) Определите, какая интерференция, — ослабляющая или усиливающая, — произойдет, когда приемника достигнут прямые сигналы телевизионной станции, работающей на частоте 75 МГц, и сигналы, отраженные от самолета, пролетающего на высоте 118 м над приемником. (Предполагается, что при отражении не возникает сдвига фаз.) б) Какой будет интерференция, если самолет снизится на 22 м?

5. (II) Видимый свет с самой короткой длиной волны падает на две щели, находящиеся на расстоянии $2,80 \cdot 10^{-2}$ мм друг от друга. Щели и экран, отстоящий от них на расстояние 18,5 см, погружены в воду. Определите расстояние между интерференционными полосами на экране.

6. (II) Свет с длинами волн 520 и 660 нм проходит через две щели, расстояние между которыми 0,50 мм. На какое расстояние смещены относительно друг друга интерференционные полосы второго порядка для этих двух длин волн на экране, расположенном на расстоянии 1,5 м?

7. (II) Предположим, что перед нижней щелью на рис. 36.6 помещен тонкий кусок стекла и поэтому падающие на щели волны оказыва-

ются в противофазе. Опишите подробно возникающую на экране интерференционную картину.

8. (II) Заряженная частица, например протон, двигаясь в прозрачной среде со скоростью v_p , превышающей скорость света ($v = c/n$) в этой среде, испускает электромагнитное излучение (свет), известное под названием *черенковского излучения*. Это излучение эквивалентно ударной волне (разд. 16.8) и сосредоточено под определенным углом, зависящим от v_p и v . Определите этот угол для протона, движущегося со скоростью $2,21 \cdot 10^8$ м/с в пластике с показателем преломления 1,52.

9. (II) Одна из двух щелей, освещаемых светом с длиной волны 510 нм, закрыта очень тонким листом пластика ($n = 1,60$). В центре экрана вместо максимума света — темная полоса. Чему равна (минимальная) толщина пластика?

10. (II) Свет с длиной волны λ падает под углом θ_i к нормали на экран с двумя щелями, расстояние между которыми равно d . Определите угол θ_m , под которым расположен максимум m -го порядка.

Раздел 36.4

11. (I) Оцените величины индуктивности L и емкости C , необходимые для генерации частот видимого света. Разумны ли такие величины?

Раздел 36.5

12. (I) На сколько (примерно) процентов скорость красного света (700 нм) превышает в силикатном флинте скорость фиолетового света (400 нм)? (См. рис. 36.9.)

13. (II) Пучок света с длинами волн 500,0 и 712,0 нм падает на кусок стекла под углом $35,00^\circ$. Показатель преломления стекла для этих длин волн соответственно равен 1,4810 и 1,4742. Чему равен угол между двумя преломленными лучами?

14. (II) Параллельный пучок света с длинами волн $\lambda_1 = 400$ нм и $\lambda_2 = 650$ нм падает на кусок силикатного флинта под углом $56,0^\circ$. Вычислите угол между лучами двух цветов внутри флинта (рис. 36.9).

15. (II) Двояковыпуклая линза с радиусами кривизны 18,0 см изготовлена из крона. Найдите расстояние между фокальными точками для фиолетового (400 нм) и красного (700 нм) света.

Раздел 36.6

16. (I) Во сколько раз изменится интенсивность в центре экрана на рис. 36.12, если одну щель закрыть?

17. (II) Докажите, что полная угловая ширина на половине высоты центрального пика в интерференционной картине от двух щелей определяется выражением

$$\Delta\theta = \lambda/2d,$$

если $\lambda \ll d$.

18. (II) Выведите соотношение (36.56) аналитически, не пользуясь фазовой диаграммой.

19. (II) Предположим, что одна из щелей в опыте с интерференцией от двух щелей шире другой и поэтому интенсивность проходящего через нее света вдвое больше. Определите зависимость I интерференционной картины от положения на экране (θ) для случая когерентного света.

20. (III) а) Рассмотрим три находящиеся на одинаковом расстоянии друг от друга когерентных источника света одинаковой интенсивности (например, к двум щелям на рис. 36.12 добавим третью щель). Пользуясь фазовой диаграммой, найдите зависимость интенсивности от разности фаз δ [формула (36.4)]. б) Определите положения максимумов и минимумов.

21. (III) Постройте фазовую диаграмму для случая четырех параллельных щелей, находящихся на одном и том же расстоянии d друг от друга. Предполагая когерентность света, определите зависимость интенсивности от положения на экране и положения максимумов и минимумов.

Раздел 36.8

22. (I) Мыльный пузырь имеет толщину 120 нм. Какой цвет увидит наблюдатель в центре, если мыльный пузырь осветить белым светом? Предполагается, что для мыльной пленки $n = 1,34$.

23. (I) Какой должна быть минимальная толщина воздушного слоя между двумя плоскими стеклянными пластинами, чтобы стекло при нормальном падении света с длиной волны 640 нм казалось темным? светлым?

24. (II) Стеклянная линза отливает зеленова-то-желтым светом (максимум интенсивности

приходится на длину волны $\lambda = 570$ нм) при отражении от нее белого света. Какова минимальная толщина оптического покрытия ($n = 1,25$) и такой линзы и почему?

25. (II) Предположим, что вы рассматриваете свет, прошедший сквозь тонкую пленку на плоском куске стекла. По аналогии с рис. 36.15 начертите ход лучей и опишите условия возникновения максимумов и минимумов. Рассмотрите все возможные значения показателя преломления. Обсудите относительные размеры минимумов по сравнению с размерами максимумов и с нулем.

26. (II) Зеркало Ллойда служит одним из экспериментальных способов получения интерференционной картины от двух щелей с единственным когерентным источником света. Как видно из рис. 36.19, свет, отражающийся от плоского зеркала, кажется выходящим из мнимого изображения щели. Опишите подробно интерференционную картину на экране.

27. (II) При нормальном падении света с длиной волны 450 нм на плоско-выпуклую линзу, находящуюся на плоской стеклянной поверхности (рис. 36.16), наблюдатель видит 33 светлых и 33 темных колец Ньютона. Насколько линза толще в центре, чем по краям?

28. (II) Тонкая металлическая фольга разделяет с одной стороны две оптически плоские стеклянные пластины, как на рис. 36.17. При нормальном падении света с длиной волны 450 нм наблюдатель видит 52 темные полосы. Какова толщина фольги?

29. (II) Когда прибор для наблюдения колец Ньютона (рис. 36.16) погрузили в жидкость, диаметр восьмого темного кольца уменьшился от 2,92 до 2,48 см. Чему равен показатель преломления жидкости?

30. (II) Монохроматический свет падает по нормали на тонкий лист пластмассовой пленки. Доля отраженного света минимальна только при $\lambda = 470$ нм и $\lambda = 650$ нм. Чему равна толщина пленки ($n = 1,60$)?

31. (II) Тонкая пленка спирта ($n = 1,36$) покрывает плоскую стеклянную пластину ($n = 1,58$). При нормальном падении монохроматическо-

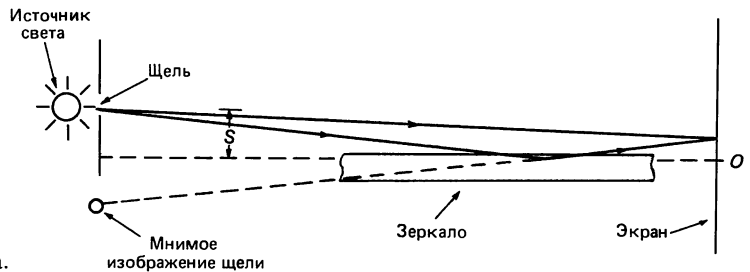


Рис. 36.19. Зеркало Ллойда.

го света доля отраженного света минимальна при $\lambda = 520$ нм и максимальна при $\lambda = 640$ нм. Чему равна толщина пленки?

32. (II) Покажите, что радиус r m -го кольца Ньютона при наблюдении по нормали сверху (рис. 36.16, б) определяется выражением $r = \sqrt{m\lambda R}$, где R – радиус кривизны поверхности стекла, а λ – длина волны используемого света. Предполагается, что толщина воздушного зазора всюду намного меньше радиуса кривизны R и что $r \ll R$.

33. (II) Используя формулу предыдущей задачи, покажите, что расстояние между соседними темными кольцами Ньютона для m -го кольца равно

$$\Delta r \approx \sqrt{\lambda R / 4m}$$

в предположении, что $m \gg 1$.

34. (II) Плоско-выпуклая линза из люцита диаметром 3,4 см помещена на плоский кусок стекла (рис. 36.16). При падении света с длиной волны 580 нм по нормали наблюдатель видит 88 светлых колец, причем последнее кольцо находится на самом краю линзы. Чему равен радиус кривизны выпуклой поверхности линзы и фокусное расстояние линзы?

35. (II) Однослойное оптическое покрытие снижает до нуля отражение света $\lambda = 550$ нм. Во сколько раз снижает отражение то же покрытие при $\lambda = 450$ нм и $\lambda = 700$ нм по сравнению со случаем, когда покрытие отсутствует?

* Раздел 36.9

* 36. (II) Чему равна длина волны света, падающего на интерферометр, если при перемещении подвижного зеркала на 0,356 мм наблюдатель насчитывает 850 полос?

* 37. (II) Микрометр связан с подвижным зеркалом интерферометра. Когда микрометр опирается на тонкую металлическую фольгу по сравнению с микрометром без фольги про-

исходит перемещение на 328 колец. Чему равна толщина фольги? Длина волны света 586 нм.

* 38. (II) Один из лучей интерферометра проходит через небольшой стеклянный контейнер шириной 1,40 см. При заполнении контейнера через отсчетную линию прибора проходит 225 темных полос. Длина волны света равна 546 нм. Вычислите показатель преломления газа в предположении, что интерферометр находится в вакууме.

* 39. (III) Предположим, что зеркала в интерферометре Майкельсона строго параллельны и длины путей до зеркал M_1 и M_2 одинаковы, так что наблюдатель видит свет в центре поля зрения. Выведите формулу для зависимости интенсивности в центре поля зрения от x – смещения подвижного зеркала относительно начального положения.

* 40. (III) Желтые D -линии натрия имеют длины волн 589,0 и 589,6 нм. Замечено, что если этот свет используется в интерферометре Майкельсона, то интерференционные полосы по мере перемещения подвижного зеркала M_1 периодически появляются и исчезают. Почему так происходит? Насколько перемещается зеркало между двумя исчезновениями интерференционных полос?

* Раздел 36.10

* 41. (I) Освещенность Земли прямым солнечным светом составляет около 10^5 лм/м². Оцените силу света и световой поток Солнца.

* 42. (II) Светоотдачей лампы называется отношение светового потока к расходуемой мощности. а) Чему равна светоотдача лампы на 100 Вт и 1700 лм? б) Сколько люминесцентных ламп на 40 Вт и 60 лм/Вт потребуется для того, чтобы создать освещенность 250 лм/м² на полу цеха площадью 25 м × 30 м? Лампы подвешены на высоте 10 м над полом. Предположим, что пола достигает половина светового потока.