Интерференция света

Ю.ЧЕШЕВ

ВОПРОС о том, что такое свет, волновал человечество еще со времен Аристотеля, Лукреция и Демокрита. По мере накопления фактов, касающихся природы света, возникали различные теории, которые в конечном итоге сводились к двум концепциям: корпускулярной и волновой. Убедительным доказательством волновой природы световых явлений стали экспериментальные работы по интерференции Т.Юнга (начало XIX в.).

Прежде чем перейти к самому опыту Юнга, рассмотрим вопрос о представлении света в виде бегущих волн. Любой волновой процесс характеризуется амплитудой волны A, частотой ω, длиной волны λ, так что волну, бегущую вдоль какого-либо выбранного направления r, можно представить в виде

$$u = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}r + \varphi\right).$$

Здесь u — колеблющаяся величина, частота ω определяет ее изменение во времени в заданной точке пространства, величина $2\pi/\lambda$ отвечает за изменение величины u вдоль направления распространения волны в фиксированные моменты времени, φ — некая постоянная величина, называемая начальной фазой колебаний.

При наложении двух (или нескольких) бегущих волн одинаковых частот может наблюдаться явление интерференции — усиление колебаний в одних точках пространства и ослабление в других. При этом интерференционная картина будет устойчивой, если за время наблюдения разность фаз колебаний от разных источников остается неизменной. Такие колебания называются когерентными. Именно в связи с требованием когерентности все интерференционные опыты со светом, как правило, проводятся не с двумя разными источниками, а с одним, свет от которого каким-либо образом разделяется на два потока.

Рассмотрим несколько конкретных задач на интерференцию света.

Задача 1 (Опыт Юнга). *Свет от точечного монохроматического источника S с длиной волны λ падает на экран M, в котором просверлены маленькие отверстия S_1 и S_2 (рис.1). На расстоянии L от экрана M перпендикулярно оси симметрии OO' расположен экран Э, на котором наблюдается интерференционная картина. Расстояние между отверстиями S_1 и S_2 равно d. Считая $d \le L$, определите положение максимумов и минимумов интенсивности вдоль экрана Э, а также ширину интерференционных полос.*

Проделав два отверстия в экране M, мы создали два когерентных источника света S_1 и S_2 (рис.2). Согласно принципу Гюйгенса, эти отверстия можно рассматривать как вторичные источники, излучающие свет в виде двух монохроматических пучков. Интерференция возникает в той части экрана Э, где эти пучки перекрываются. В нашем случае этой областью является отрезок CD. Пусть P — точка наблюдения интерференции, расположенная на отрезке CD на расстоянии x от оси симметрии OO', проходящей через середину отрезка S_1S_2 перпендикулярно к нему и экрану Э, так что $x = PK$. Проведем в точку P из S_1 и S_2 лучи S_1P и S_2P. Длины этих отрезков определяют длины оптических путей от вторичных источников:

$$l_1 = S_1P = \sqrt{\left(\frac{d}{2} - x\right)^2 + L^2},$$

$$l_2 = S_2P = \sqrt{\left(\frac{d}{2} + x\right)^2 + L^2}.$$

Запишем уравнение бегущей волны, пришедшей в точку наблюдения P от каждого из источников:

$$u_1 = A_1\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}l_1 + \varphi_1\right),$$

$$u_2 = A_2\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}l_2 + \varphi_2\right).$$

В силу симметрии задачи относительно оси OO', получаем $A_1 = A_2 = A$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$. Таким образом, наложение колебаний u_1 и u_2 дает суммарное колебание

$$u = u_1 + u_2 = 2A\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(l_1 - l_2)\right) \times \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(l_1 + l_2) + \varphi\right).$$

Обозначив

$$B = 2A\cos\left(\frac{\pi}{\lambda}(l_1 - l_2)\right),$$

для результирующего поля волны в точке P имеем

$$u = B\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(l_1 + l_2) + \varphi\right).$$

Реально на экране Э наблюдается интенсивность волнового поля, равная квадрату волнового поля, усредненно-

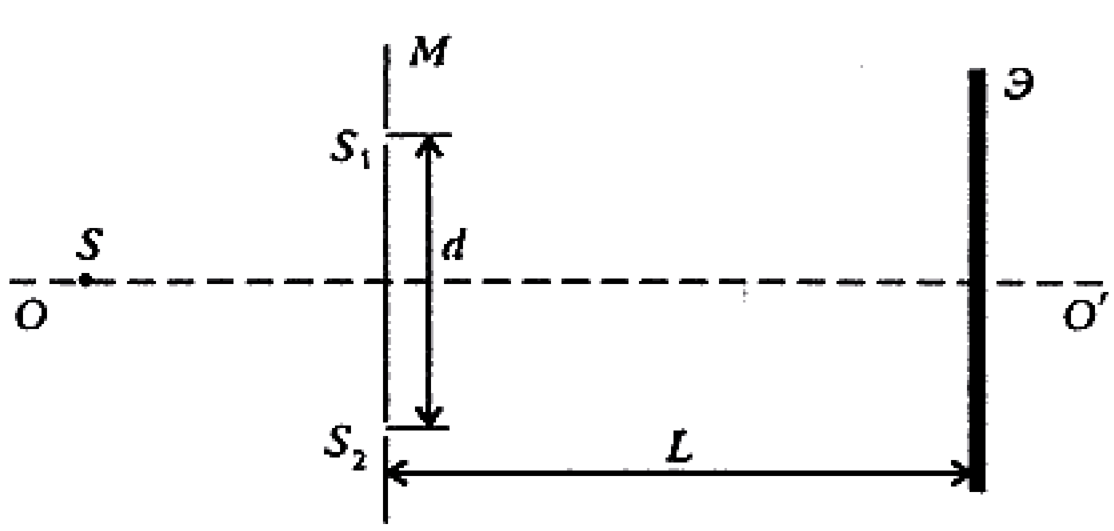

Рис. 1

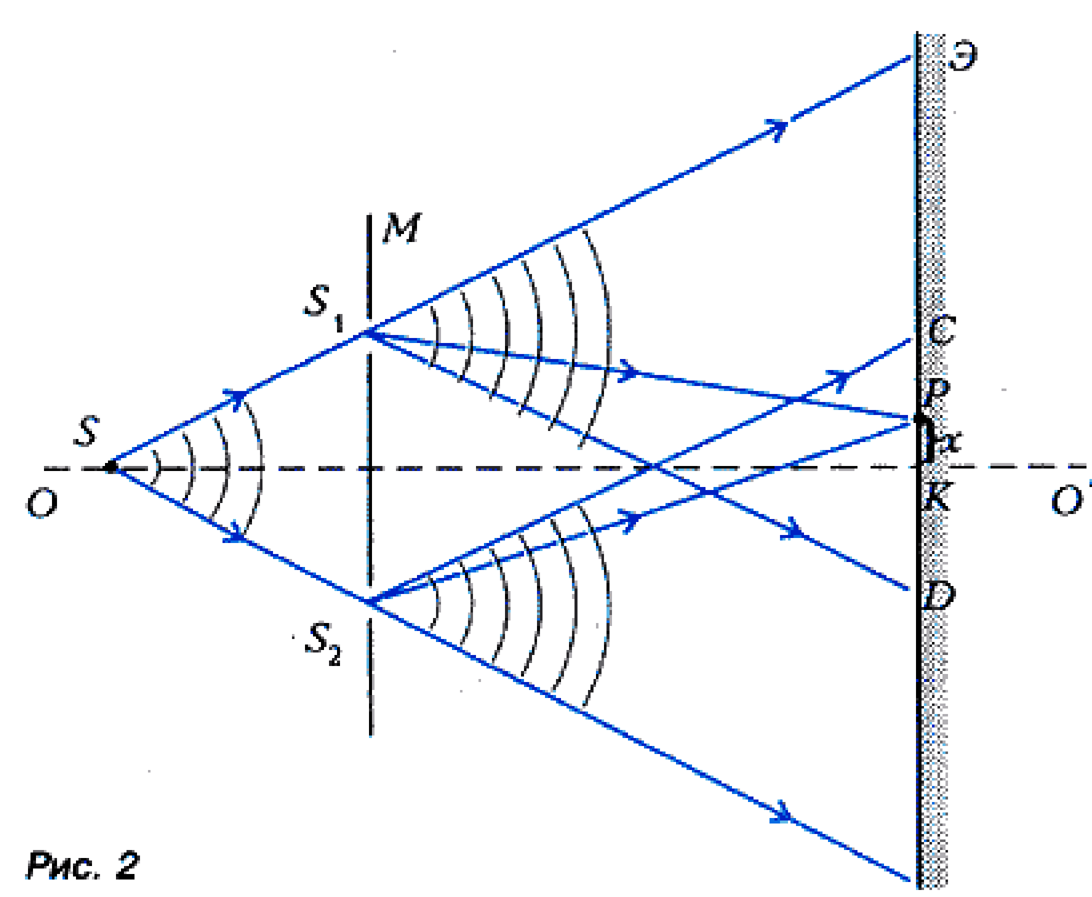

Рис. 2

му по времени, т.е.

$$2A^2\cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\left(l_1-l_2\right)\right)=2A^2\cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\Delta l\right),$$

где $\Delta l = l_1 - l_2$ называется разностью хода лучей S_1P и S_2P. Максимумы интенсивности будут наблюдаться, когда разность хода равна целому числу длин волн:

$$\frac{\pi}{\lambda}\Delta l_{\max} = k\pi\text{, или }\Delta l_{\max} = k\lambda.$$

Соответственно для минимумов разность хода равна нечетному числу полуволн:

$$\frac{\pi}{\lambda}\Delta l_{\min} = \frac{2k-1}{2}\pi\text{, или }\Delta l_{\min} = \frac{2k-1}{2}\lambda.$$

Здесь k пробегает целые значения (k = 1, 2, 3,...). Из выражений для l_1 и l_2 имеем

$$l_1^2 - l_2^2 = 2xd\text{, или }l_1 - l_2 = \frac{2xd}{l_1+l_2}.$$

Принимая во внимание, что $d \ll L$, можно положить

$$l_1 + l_2 = 2L$$

и, следовательно,

$$\Delta l = \frac{2xd}{2L} = \frac{xd}{L}.$$

Используя условия для минимумов и максимумов интенсивности, получим

$$x_{\max} = \frac{\lambda L}{d}k,\ x_{\min} = \frac{\lambda L}{2d}(2k-1)$$

$$(k = 1,\ 2,\ \ldots).$$

Ширина интерференционной полосы равна расстоянию между двумя минимумами (или максимумами):

$$\Delta = \frac{\lambda L}{d} = \frac{\lambda}{d/L} = \frac{\lambda}{\psi},$$

где ψ угол, под которым видны источники S_1 и S_2 из центра экрана Э (точка K). В самом деле,

$$\operatorname{tg}\frac{\psi}{2} = \frac{\psi}{2} = \frac{d}{2L},$$

откуда

$$\psi = \frac{d}{L}\text{, и }\Delta = \frac{\lambda}{\psi}.$$

Эти соотношения имеют большое значение и используются практически во всех экспериментах по интерференции.

Задача 2. *При нормальном падении света на бипризму Френеля (рис.3) пучки монохроматического света с длиной волны λ = 6000 Å, преломленные каждой из половинок бипризмы, интерферируют между собой. На каком максимальном расстоянии L от бипризмы еще будет наблюдаться интерференционная картина? Определите также ширину интерференционных полос. Расстояние между вершинами бипризмы a = 4 см, показатель преломления материала бипризмы n = 1,4, преломляющий угол α = 10^{-3} рад. Считать угол α малым, так что α = = sin α = tg α.*

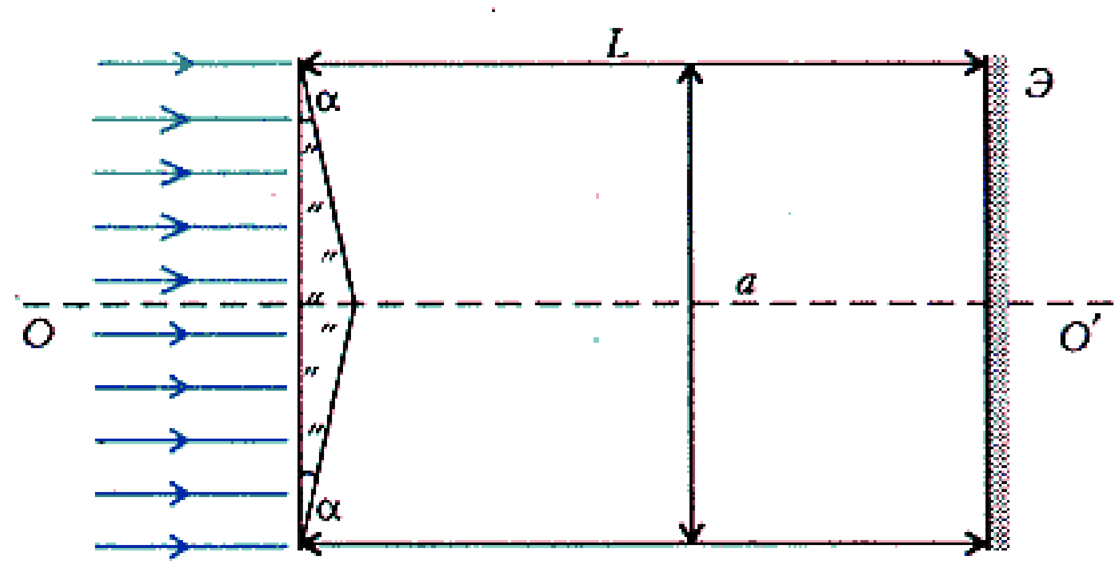

Рис. 3

Рассмотрим луч света, падающий на бипризму (рис.4). При условии малости угла α для угла отклонения светового луча θ имеем (см., например, «Квант», 1995, №4, с.52)

$$\theta = \alpha(n-1).$$

Следовательно, две половинки бипризмы создают два параллельных когерентных пучка плоских световых волн, идущих под равными углами θ к линии OO' (оси симметрии). Точка B — крайняя, дальше которой пучки света не перекрываются, поэтому интерференция будет наблюдаться на экране, расположенном левее точки B. Из геометрии (см. рис.4) легко находим искомое расстояние:

$$L = \frac{a}{2\operatorname{tg}\theta} = \frac{a}{2\theta} = \frac{a}{2\alpha(n-1)} = 50\text{ м}.$$

Ширину интерференционной полосы определим из последнего соотношения задачи 1, где ψ — угловой размер источников. В нашем случае источники мнимые и расположены на очень большом расстоянии от экрана Э. Их угловой размер $\psi = 2\theta$. Тогда для ширины интерференционных полос получим

$$\Delta = \frac{\lambda}{\psi} = \frac{\lambda}{2\theta} = \frac{\lambda}{2\alpha(n-1)} = 0{,}075\text{ см}.$$

Задача 3. *Точечный источник монохроматического света S с длиной волны λ = 6000 Å расположен между двумя неподвижными плоскопараллельными зеркалами, расстояние между которыми b = 3 см (рис.5). На удаленном расстоянии L = 1м от источника расположен экран $Э_1$, на котором наблюдается интерференционная картина, создаваемая двумя пучками света, отраженными от зеркал. Прямой пучок света от источника перекрывается экраном $Э_2$. В плоскости экрана $Э_1$ симметрично относительно зеркал расположен приемник П, сигнал которого пропорционален интенсивности падающего на него света. Размер приемника мал по сравнению с шириной интерференционных полос на экране $Э_1$. Учитывая только однократные отражения света от зеркал, определите частоту переменного сигнала, регистрируемого приемником, который возникает при движении источника в направлении, перпендикулярном зеркалам, со скоростью v = 0,1 мм/с. Указание: при β ≪ 1 считать $\sqrt{1+\beta}$ = 1 + β/2.*

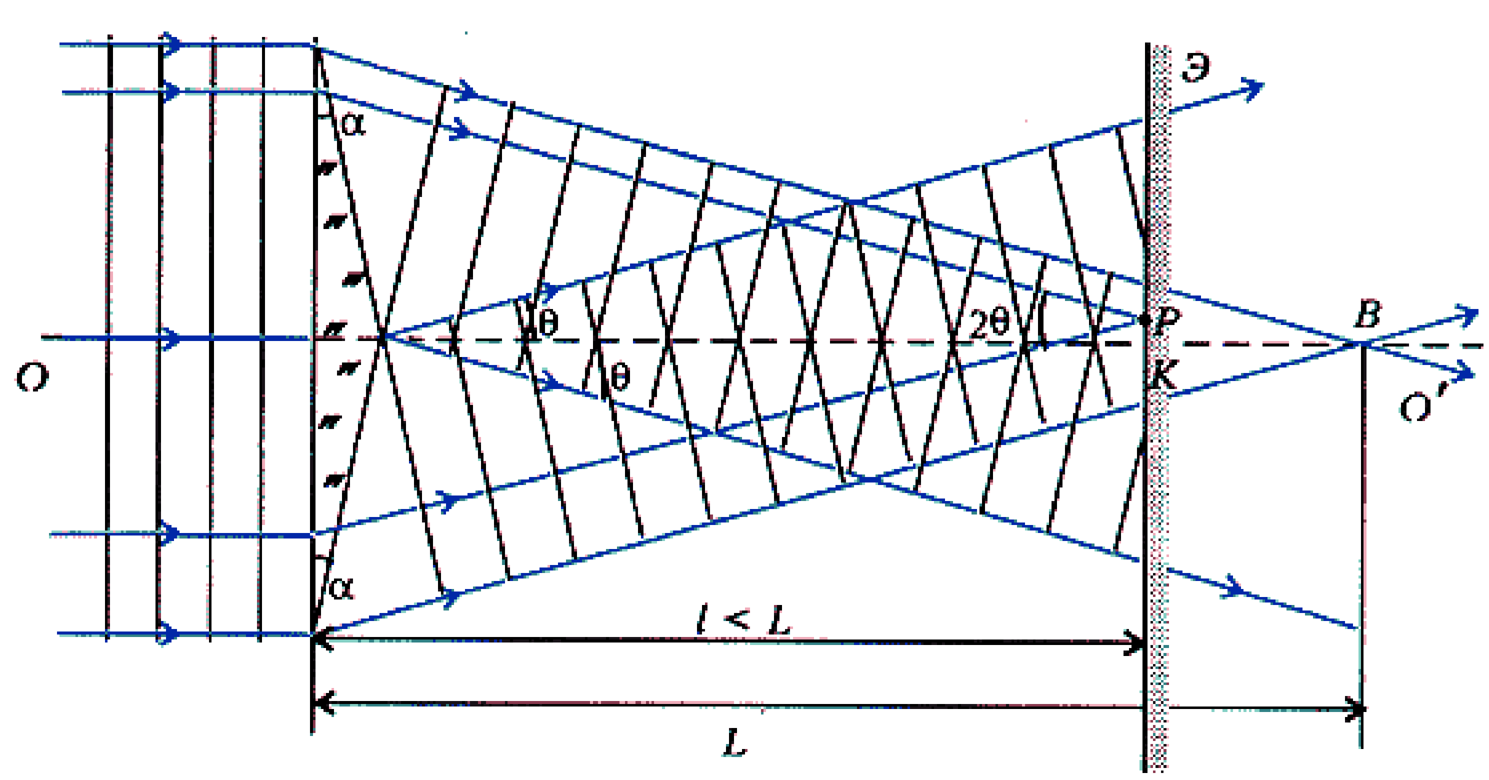

Рис. 4

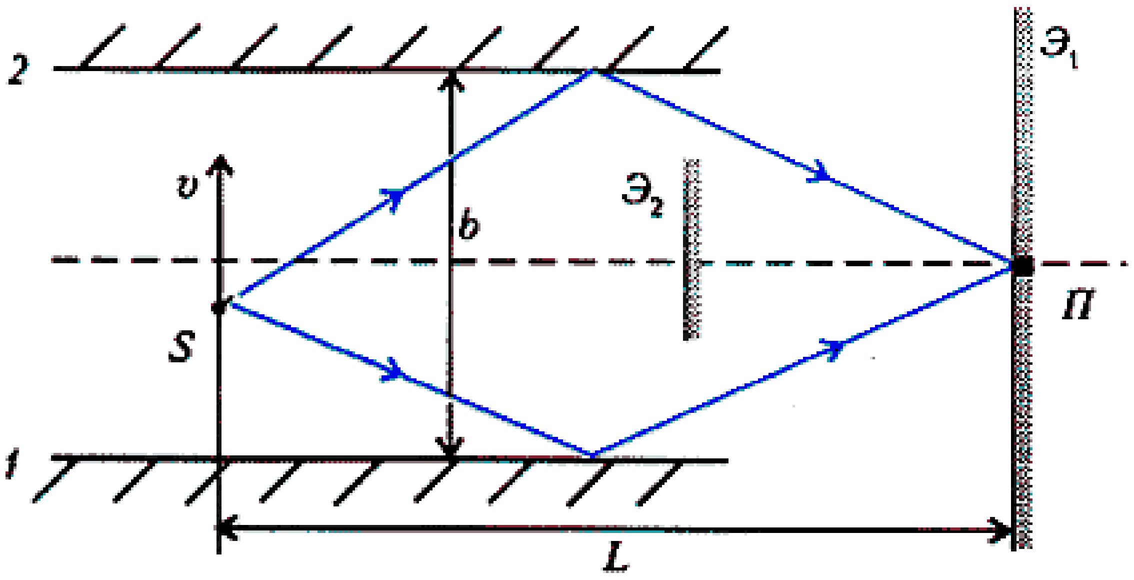

Рис. 5

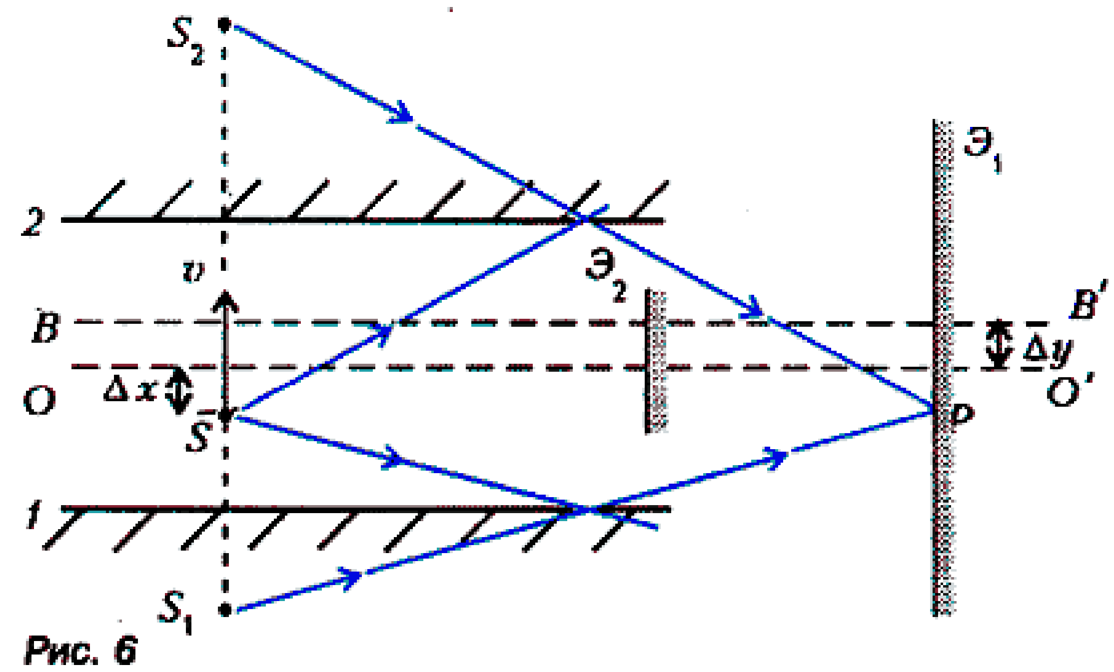

Рис. 6

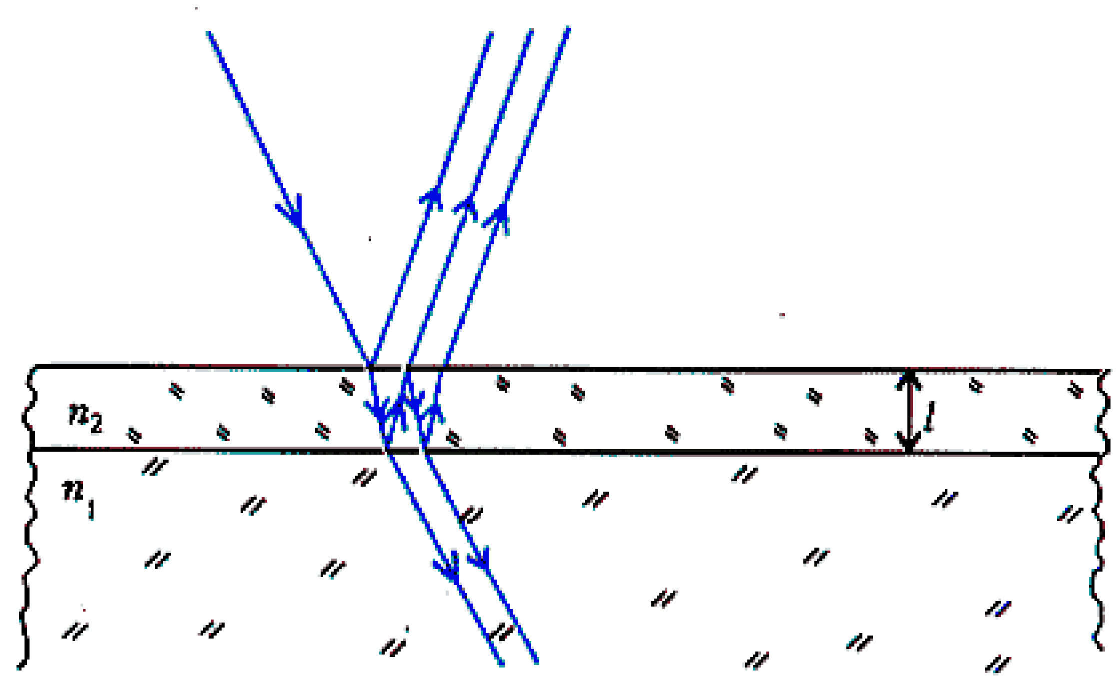

Рис. 7

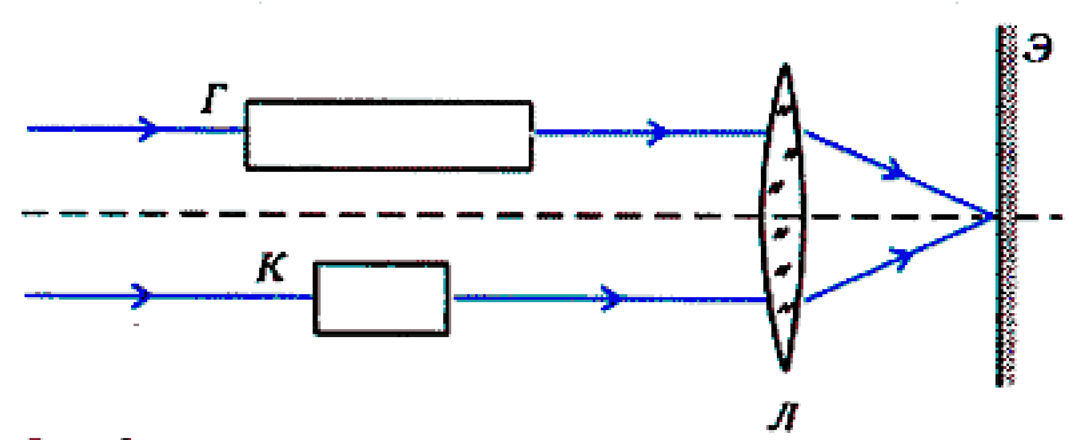

Рис. 8

В этой задаче речь идет об интерференции от двух мнимых источников S_1 и S_2, даваемых источником S в зеркалах *1* и *2* соответственно (рис.6). Если OO' — ось симметрии экспериментальной установки, Δx — расстояние от источника S до этой оси, то легко видеть, что расстояние между S_1 и S_2 равно

$$S_1S_2 = 2\left(\frac{b}{2} - \Delta x\right) + 2\left(\frac{b}{2} + \Delta x\right) = 2b.$$

Считая скорость перемещения источника S много меньшей скорости света и воспользовавшись формулой для ширины интерференционных полос, получим

$$\Delta y = \frac{\lambda}{2b/L} = \frac{\lambda L}{2b}.$$

В свою очередь, Δy — это расстояние от оси BB', проходящей параллельно оси OO' через середину отрезка S_1S_2, т.е.

$$\Delta y = b - \Delta x - 2\left(\frac{b}{2} - \Delta x\right) =$$

$$= b - \Delta x - b + 2\Delta x = \Delta x = v\Delta t.$$

Таким образом,

$$v\Delta t = \frac{\lambda L}{2b},$$

где Δt — период колебаний интенсивности в точке P. Частота изменения интенсивности сигнала в точке приема равна

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{2vb}{\lambda L} = 10 \text{ Гц}.$$

Задача 4. *В целях борьбы с потерями при отражении света от поверхности оптического прибора (линзы) используется метод просветления оптики, суть которого заключается в том, что на поверхность стекла линзы напыляется слой постороннего вещества с таким показателем преломления и такой толщины, чтобы минимизировать отраженные от линзы волны. Оцените толщину нанесенного покрытия, если используется стеклянная линза с показателем преломления $n_1 = 4/3$, а показатель преломления напыляемого вещества $n_2 = 5/4$. Фотографирование объекта ведется на длине волны $\lambda = 600$ нм.*

Пусть на линзу перпендикулярно ее поверхности падает плоская волна (рис.7). Толщину l напыленного вещества требуется подобрать так, чтобы лучи, отраженные от верхней и нижней границ этого слоя, благодаря интерференции, взаимно погасились. (При этом показатель преломления выбирается таким, чтобы интенсивности этих лучей были близки между собой.) При учете отражений только первого порядка в произвольной точке, расположенной на некотором расстоянии от линзы, имеет место интерференция двух лучей с разностью хода

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda/n_2} l + \frac{2\pi}{\lambda/n_2} l = \frac{4\pi l}{\lambda} n_2.$$

Используя выражение для минимизации отраженных волн (см. задачу 1), имеем

$$\frac{4\pi l}{\lambda} n_2 = (2k-1)\pi,$$

где k — любое целое число. Тогда для минимальной толщины слоя ($k = 1$) получаем

$$l_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} = 120 \text{ нм}.$$

Упражнения

1. Интерферометр Рэлея (рис.8) используется для точного измерения показателя преломления газов. Для этого на пути одного из интерферирующих лучей ставится кювета *Г* прямоугольной формы и длиной $L = 10$ см с исследуемым газом, а на пути другого — стеклянный компенсатор *К*, с помощью которого добиваются, чтобы в центральном максимуме разность хода между интерферирующими лучами равнялась нулю. Чему равен показатель преломления газообразного азота, если после замены в кювете воздуха на азот интерференционная картина в плоскости наблюдения сместилась ровно на одну полосу в сторону, что соответствовало увеличению показателя преломления? Показатель преломления воздуха $n_в = 1{,}000292$. Измерения проводились на длине волны света $\lambda = 500$ нм.

2. В интерференционной схеме пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 5000$ Å падает под углом $\alpha = 60°$ на

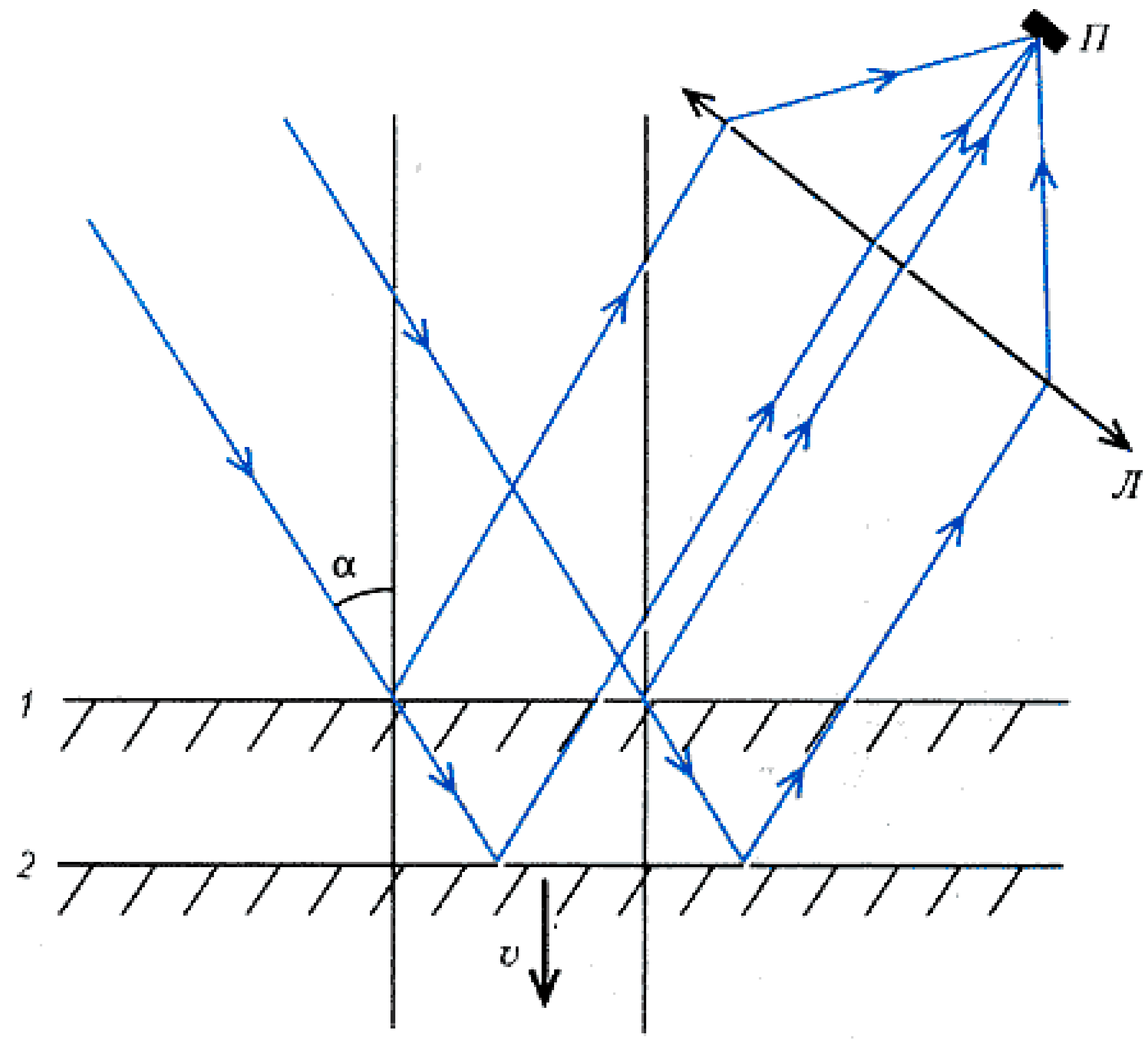

Рис. 9

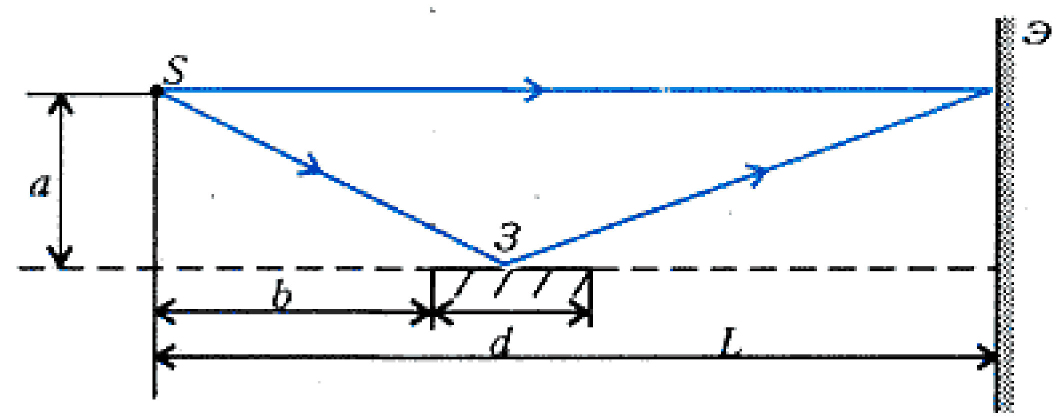

Рис. 10

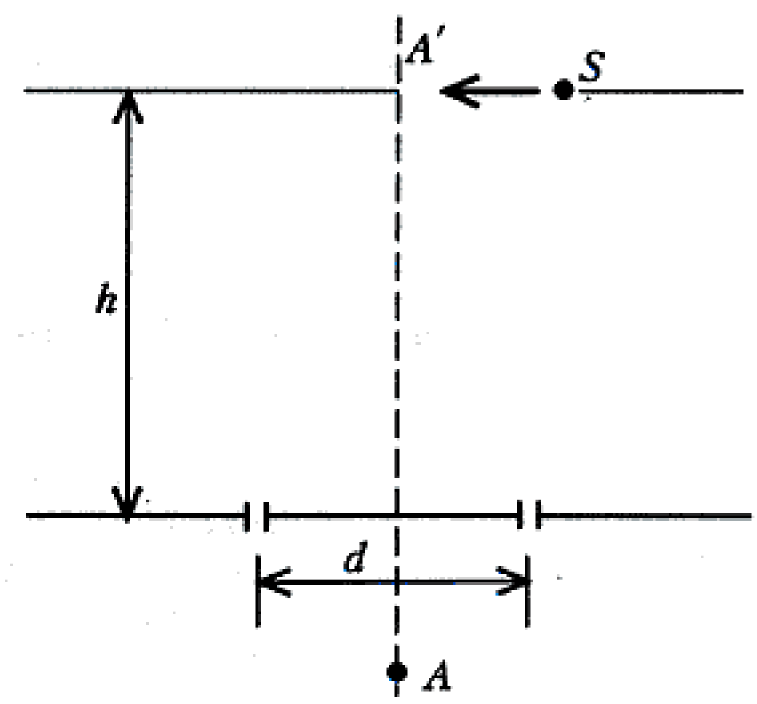

Рис. 11

систему из двух плоскопараллельных полупрозрачных зеркал *1* и *2* (рис.9). Часть светового пучка отражается от зеркала *1*, оставшаяся часть, пройдя зеркало *1*, отражается от зеркала *2* и, снова пройдя зеркало *1*, вместе с пучком, отраженным от зеркала *1*, с помощью собирающей линзы *Л* фокусируется на приемник *П*, сигнал которого пропорционален интенсивности падающего на него света. Какова будет частота переменного сигнала, регистрируемого приемником, в случае равномерного движения второго зеркала (относительно первого) со скоростью v = 0,01 см/с?

3. На рисунке 10 изображена схема интерференционного опыта Ллойда. Точечный источник света S расположен на расстоянии b = 20 см от плоского зеркала *З* на высоте a = 10 см над плоскостью зеркала. Длина зеркала d = 10 см. На расстоянии L = 1 м от источника расположен экран *Э*. Определите вертикальный размер интерференционной картины на экране.

4. Точечный источник света S равномерно движется параллельно плоскости, в которой имеются два маленьких отверстия на расстоянии d друг от друга (рис.11). Расстояние от источника до плоскости h. Приемник A, расположенный на оси системы, регистрирует периодически изменяющуюся интенсивность света. Определите скорость движения источника, если частота колебаний интенсивности f = 15 Гц, длина волны λ = 600 нм, d = 2 мм, h = 1 м. Во время измерения источник движется вблизи оси системы AA'.

5. С целью уменьшения доли отраженного света от поверхности стекла на него наносят тонкую пленку, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла (просветление оптики). Пучок белого света (длина волн от 400 до 700 нм) падает нормально на нанесенную на стекло пленку. Показатель преломления пленки 4/3, ее толщина 600 нм. На каких длинах волн отраженный свет максимально ослабляется?