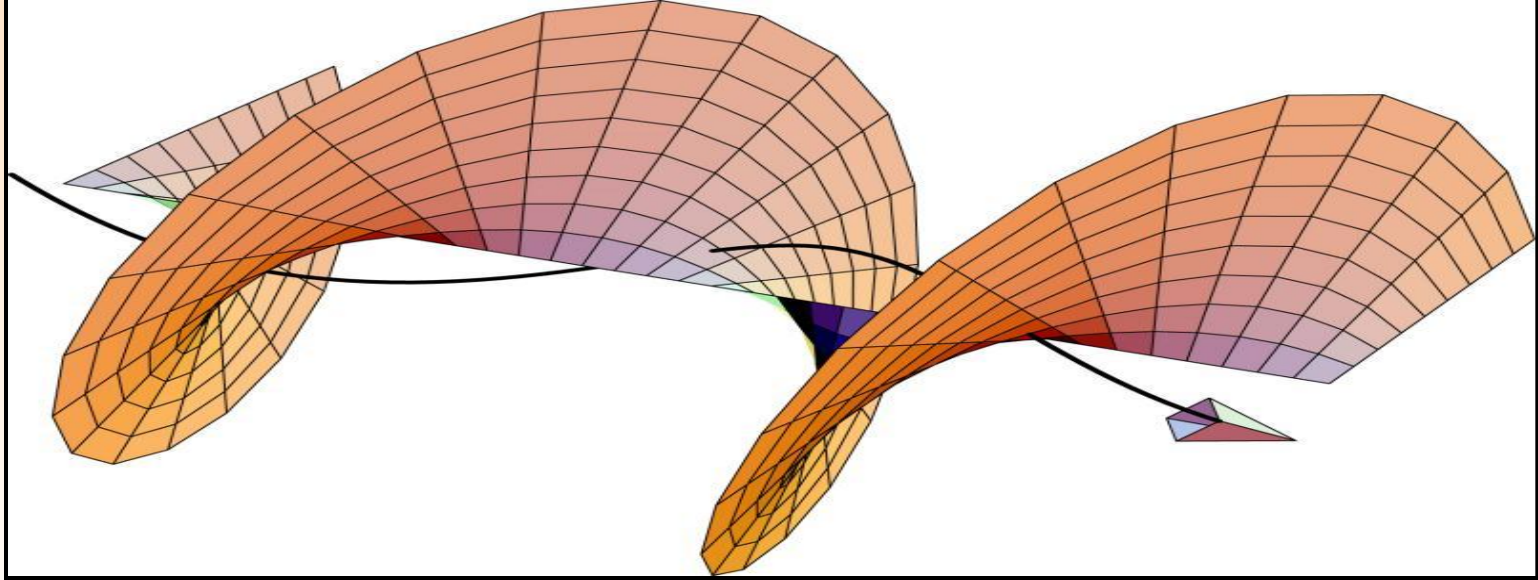




Краткий курс лекций по физике

Кузнецов Сергей Иванович
доцент к. ОФ ЕНМФ ТПУ





Раздел V Колебания и волны

Тема 7 КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

7.1 Развитие взглядов на природу света

7.2 Интерференция световых волн

7.3 Опыт Юнга

7.4 Когерентность и монохроматичность

7.5 Методы наблюдения интерференции

7.6 Интерференция в тонких пленках

7.7 Применение интерференции света

7.1 Развитие взглядов на природу света

Основные законы геометрической оптики известны ещё с древних времен. Так, Платон (430 г. до н.э.) установил закон прямолинейного распространения света. В трактатах Евклида формулируется закон прямолинейного распространения света и закон равенства углов падения и отражения. Аристотель и Птоломей изучали преломление света. Но точных формулировок этих *законов геометрической оптики* греческим философам найти не удалось.

В конце XVII века, на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две мощные теории света – *корпускулярная* (Ньютон-Декарт) и *волновая* (Гук-Гюйгенс).

Из этих представлений он легко вывел законы отражения и преломления света (рисунок 7.1):

$\alpha = -\alpha$; (угол падения равен углу отражения);

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{c} = n$ (отношение синуса угла падения к синусу угла преломления – величина

постоянная равная отношению скорости света в среде v к скорости света в вакууме c).

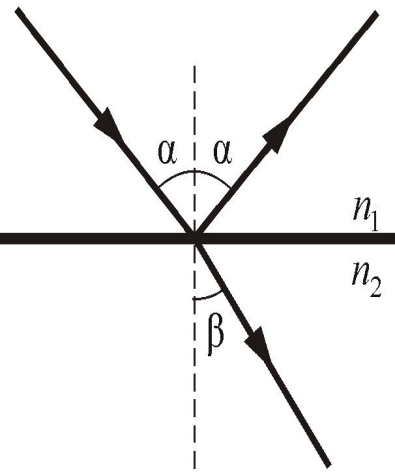


Рисунок 7.1

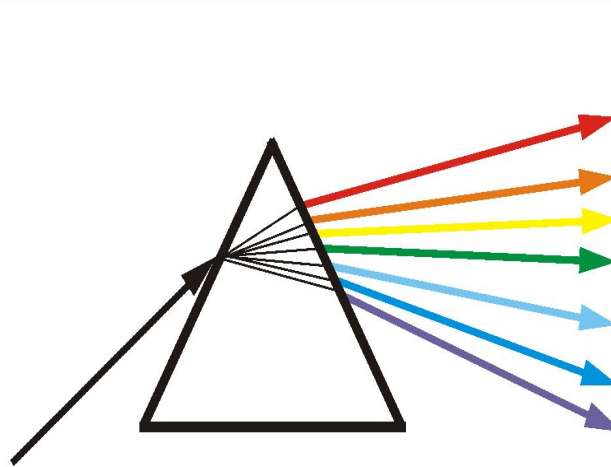


Рисунок 7.2

Таким образом, Ньютон утверждал, что скорость света в веществе больше скорости света в вакууме.

Принцип Гюйгенса

Каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.



Гюйгенс Христиан (1629 – 1695), нидерландский ученый. В 1665 – 81 гг. работал в Париже. Изобрел (1657 г.) маятниковые часы со спусковым механизмом, дал их теорию, установил законы колебаний физического маятника. Опубликовал в 1690 г. созданную им в 1678 г. волновую теорию света, объяснил двойное лучепреломление. Усовершенствовал телескоп; сконструировал окуляр, названный его именем. Открыл кольцо у Сатурна и его спутник Титан. Автор одного из первых трудов по теории вероятностей (1657 г.).



Ферма Пьер (1601 – 1665) – французский математик и физик. Родился в Бомон-де-Ломань. Получил юридическое образование. С 1631 г. был советником парламента в Тулузе. Физические исследования относятся в

большинстве к оптике, где он установил (примерно в 1662 г.) основной принцип геометрической оптики (принцип Ферма). Аналогия между принципом Ферма и вариационными принципами механики сыграла значительную роль в развитии современной динамики и теории оптических инструментов.

Согласно *принципу Ферма*, свет распространяется между двумя точками по пути, для прохождения которого необходимо *наименьшее время*.



Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике (6.III.1787- 7.VI.1826) - немецкий физик. С 1823 года - профессор Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике. Внёс существенный

вклад в исследование дисперсии и дифракции света в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является использование (с 1821 года) дифракционных решёток линз. Фраунгофер изучал дифракцию в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является



Эдинбургского королевского общества (с 1855 года) и Лондонского королевского общества (13.VI.1831 - 5.XI.1879) - английский физик, член Эдинбургского королевского общества (с 1855 года) и Лондонского королевского общества (с 1861

лаборатория даф. Фадрижов в Кембридже, которую он возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике, молекулярной физике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике, молекулярной физике, общей статистике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни.



Араго Доминик Франсуа (26.II.1786 - 2.X.1853) - французский учёный, член Парижской академии наук (с 1809 года), с 1830 года - неперемный секретарь Парижской АН и директор Парижской обсерватории. Научные работы относятся к астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области оптики и электромагнетизма. По указаниям Араго французские физики И.Физо астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области оптики и электромагнетизма. По указаниям Араго французские физики И.Физо и Ж.Фуко астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области



Пуассон Симеон Дени (21.VI.1781 - 25.IV.1840) - французский механик, математик, физик, член Парижской академии наук (с 1812 года). Физические

исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний, теории света. Член Петербургской академии наук

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической *теории колебаний и волн* и ее приложением к объяснению ряда оптических явлений. В связи с работами Т. Юнга и О. Френеля, победа временно перешла к *волновой оптике*:

1801 г. Т. Юнг сформулировал принцип интерференции и объяснил цвета тонких пленок;

1818 г. О. Френель получает премию Парижской Академии за объяснение дифракции;

1840 г. О. Френель и Д. Арго исследуют интерференцию поляризованного света и доказывают поперечность световых колебаний;

1841 г. О. Френель строит теорию кристаллооптических колебаний;

1849 г. А. Физо измерил скорость света и рассчитал по волновой теории коэффициент преломления воды $n = 1,33$, что совпало с экспериментом;

1848 г. М. Фарадей открыл вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея);

1860 г. Дж. Максвелл основываясь на открытии Фарадея пришел к выводу, что свет есть электромагнитные, а не упругие волны;

1888 г. Г. Герц экспериментально подтвердил, что электромагнитное поле распространяется со скоростью света c ;

1899 г. П.Н. Лебедев измерил давление света;

В 1900 г. Макс Планк показал, что излучение абсолютно черного тела можно объяснить, если предположить, что свет излучается не непрерывно, а порциями, квантами с энергией $E_0 = h\nu$, где ν – частота, h – постоянная Планка.



Макс Планк (1858 – 1947). С 1874 г. он изучал физику у Густава Кирхгофа и Германа Гельмгольца в Мюнхенский университете. В 1930 г. Макс Планк возглавил Институт физики кайзера

Вильгельма (теперь Институт Макса Планка) и занимал этот пост до конца жизни. В 1900 г. в работе, посвященной равновесному тепловому излучению, Планк впервые ввел предположение о том, что энергия осциллятора принимает дискретные значения, пропорциональные частоте колебаний, чем положил начало квантовой физики. Также Макс Планк внес большой вклад в развитие термодинамики.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах – «квантах» света, «фотонах», масса которых

$$m_{\phi} = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

Это соотношение связывает *корпускулярные характеристики излучения – массу и энергию кванта – с волновыми – частотой и длиной волны.*

Работы Планка и Эйнштейна явились началом развития *квантовой физики.*

Геометрическая оптика является предельным случаем волновой оптики, когда длина световой волны стремится к нулю.

Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках геометрической оптики. В основу формального построения последней положено четыре закона, установленных опытным путем:

- закон прямолинейного распространения света;
- закон независимости световых лучей;
- закон отражения;
- закон преломления света.

Наиболее важное событие в современной оптике — экспериментальное обнаружение методов генерации вынужденного излучения атомов и молекул — создание оптического квантового генератора (лазера) (А.М. Прохоров, Н.Г. Басов и Ч. Таунс 1954 г.).

В современной физической оптике квантовые представления не противоречат волновым, а сочетаются на основе квантовой механики и квантовой электродинамики.

7.2 Интерференция световых волн

Волновые свойства света наиболее отчетливо обнаруживают себя в *интерференции* и *дифракции*.

Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления.

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний направленных вдоль одной прямой

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.1)$$

Если разность фаз колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ непрерывно изменяется.

Для некогерентных источников интенсивность результирующей волны всюду одинакова и, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$J = J_1 + J_2 = 2J_1$$

В случае когерентных волн $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$ (для каждой точки пространства) так, что

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.2)$$

Последнее слагаемое в этом выражении $2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ называется

интерференционным членом.

В точках пространства, где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, $J > J_1 + J_2$ (в максимуме $J = 4J_1$), где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность $J < J_1 + J_2$

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение тела складывается из волн, испускаемыми многими атомами. Фазы каждого *цуга волны* никак не связаны друг с другом. Атомы излучают хаотически.

*Периодическая последовательность горбов и впадин волны и образующиеся в процессе акта излучения одного атома, называется **цугом волн** или **волновым цугом**.*

Процесс излучения одного атома длится примерно 10^{-8} . При этом, длина цуга

$$l = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3 \text{ м}$$

В одном цуге укладывается примерно 10^7 длин волн.

Условие максимума и минимума интерференции

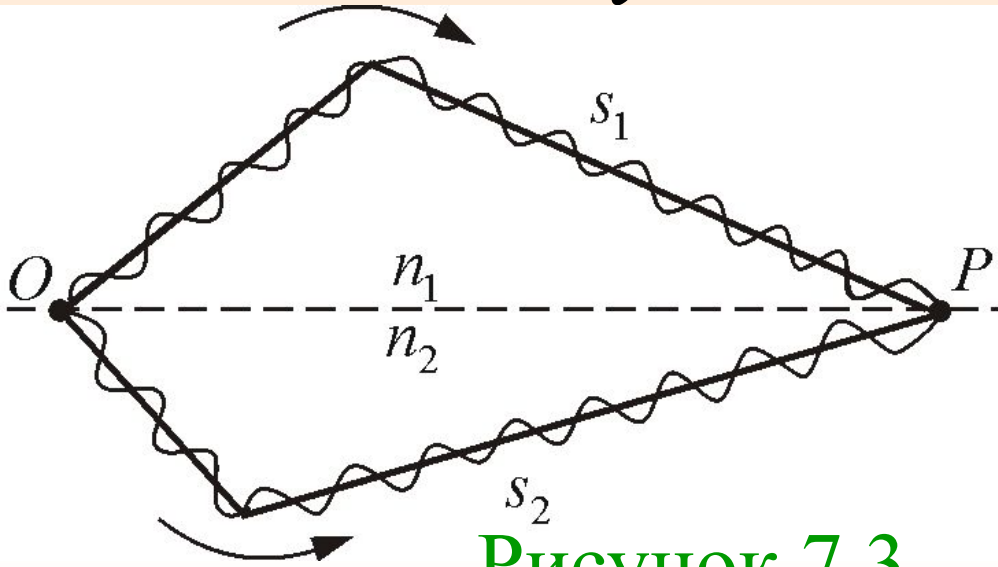


Рисунок 7.3

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right)$$

а вторая

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$

разности фаз двух когерентных волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$ *оптическая разность хода*

L – оптическая длина пути.

Если разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.3)$$

условие интерференционного максимума.

Если оптическая разность хода

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.4)$$

то $\delta = \pm (2m + 1)\pi$

(7.2.4) условие интерференционного минимума.

7.3 Опыт Юнга

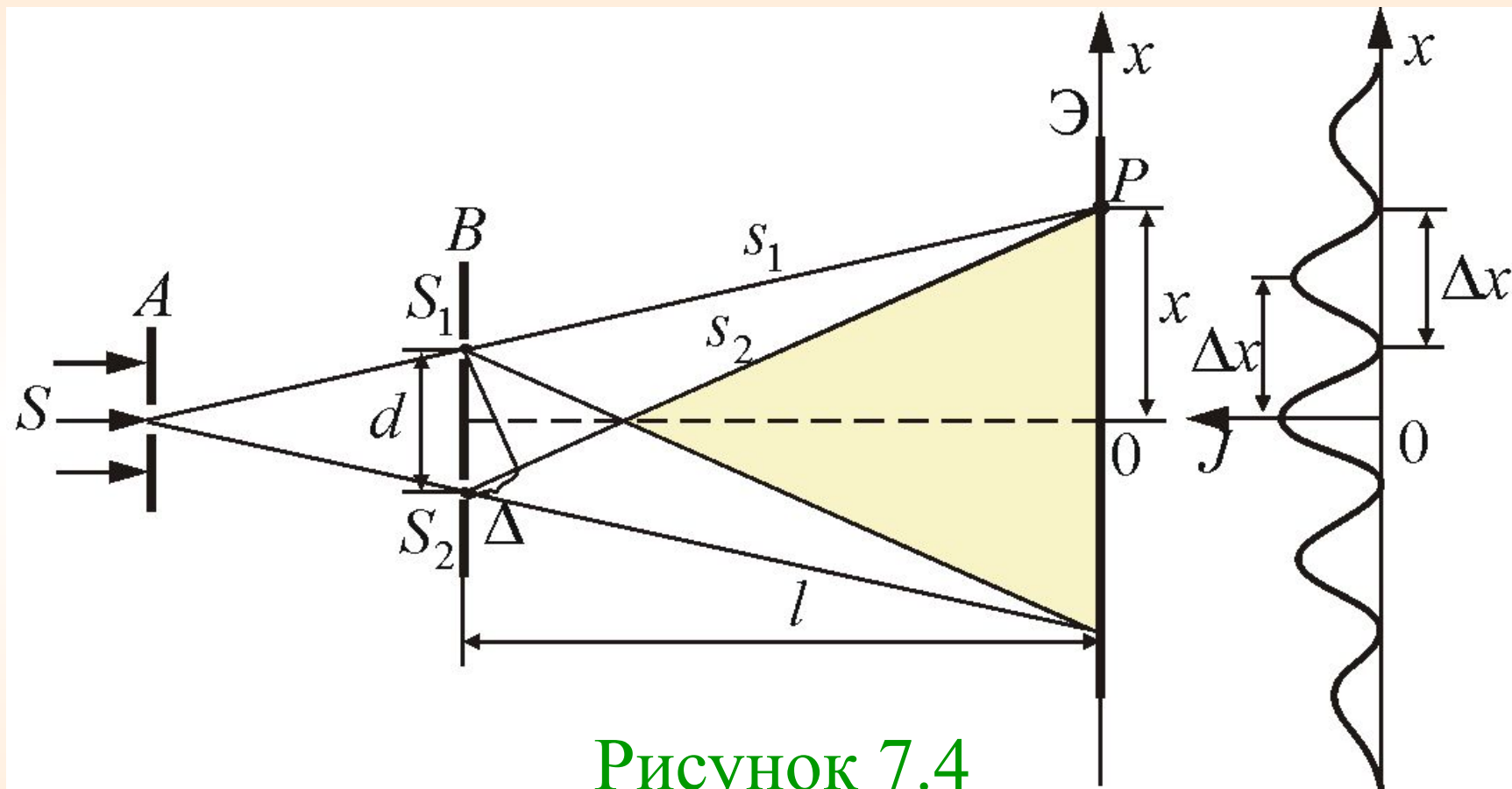


Рисунок 7.4

Расстояние l от щелей, причем $l \gg d$

Показатель преломления среды – n .

максимумы интенсивности будут наблюдаться в случае, если

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (7.3.2)$$

а **минимумы** – в случае, если

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (7.3.3)$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (7.3.4)$$

ширина интерференционной полосы.

Главный максимум, соответствующий $m = 0$, проходит через точку O . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) порядков, и т. д.

7.4 Когерентность и монохроматичность

Необходимым условием интерференции волн является их *когерентность*, т.е. согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Этому условию удовлетворяют *монохроматические волны* – неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты.

волну можно приближенно считать
монохроматической только в течение времени

$$\Delta t \ll \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \quad (7.4.1)$$

где $\tau_{\text{ког}}$ – *время когерентности*
немонохроматической волны.

за промежуток времени $\tau_{\text{ког}}$ разность фаз колебаний
изменится на π .

Время когерентности – время, по истечению
которого разность фаз волны в некоторой, но
одной и той же точке пространства, изменяется
на π .

$$l_{\text{КОГ}} = v\tau_{\text{КОГ}} = \frac{\pi v}{\Delta\omega} \quad (7.4.2)$$

где $l_{\text{КОГ}}$ — *длина когерентности (длина гармонического цуга, образующегося в процессе излучения одного атома) — расстояние между точками, разность фаз в которых π .*

Когерентность колебаний которые совершаются в одной и той же точке пространства, определяемая степенью монохроматичности волн, называется временной когерентностью.

Два источника, размеры и взаимное расположение которых позволяют наблюдать интерференцию, называются *пространственно-когерентными*. *Радиусом когерентности (или длиной пространственной когерентности)* называется максимальное, поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

7.5 Методы наблюдения интерференции

Опыт Юнга

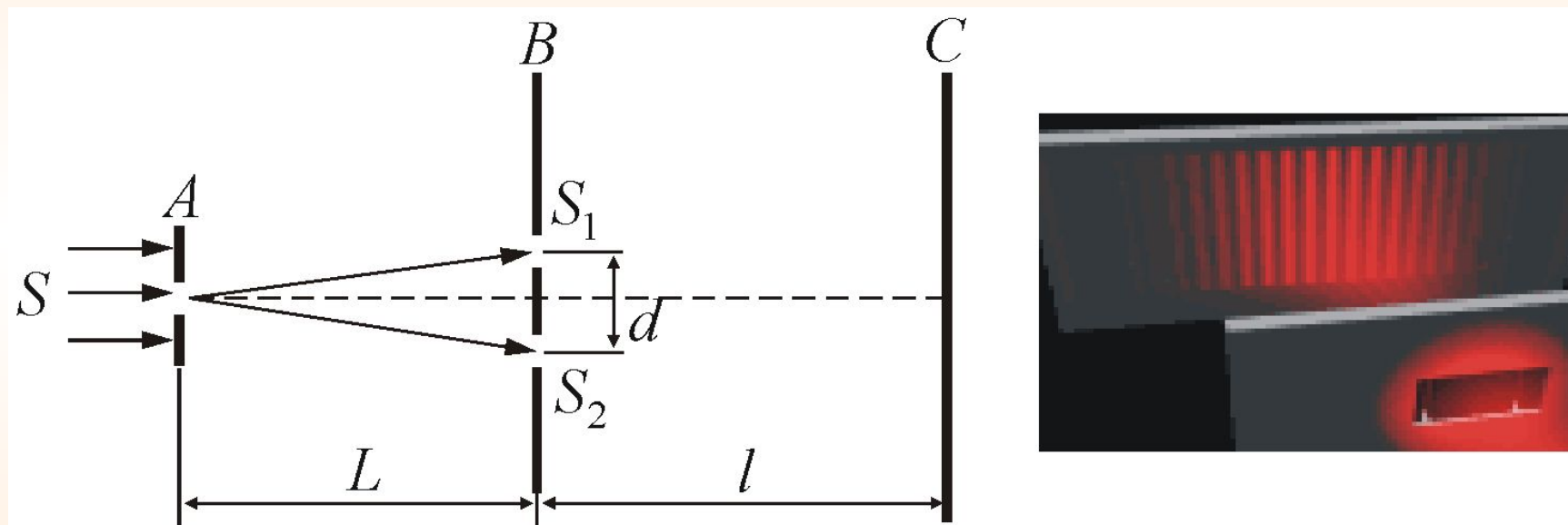


Рисунок 7.5

Зеркала Френеля

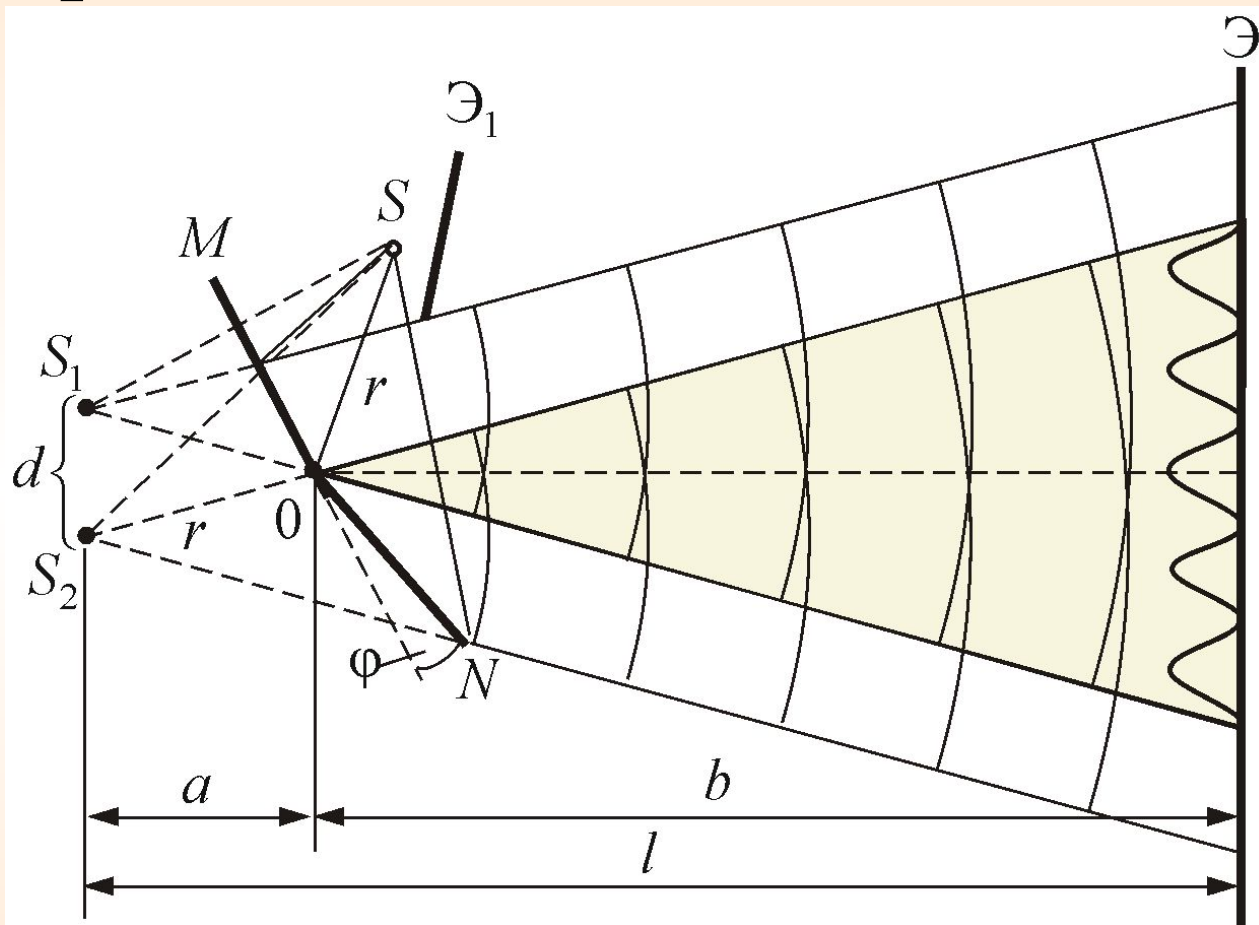


Рисунок 7.6

Бипризма Френеля

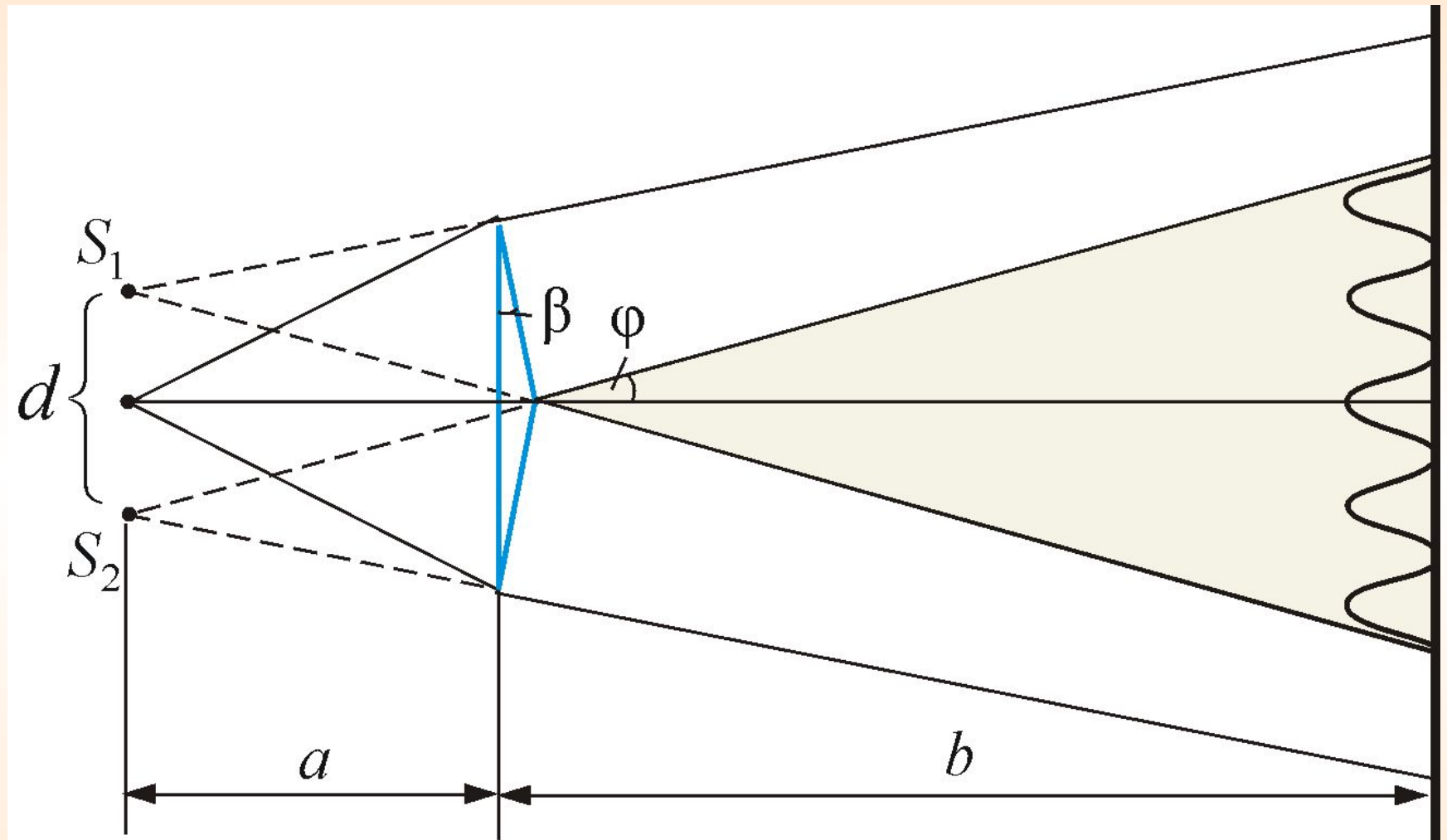


Рисунок 7.7

Билинза Бийе

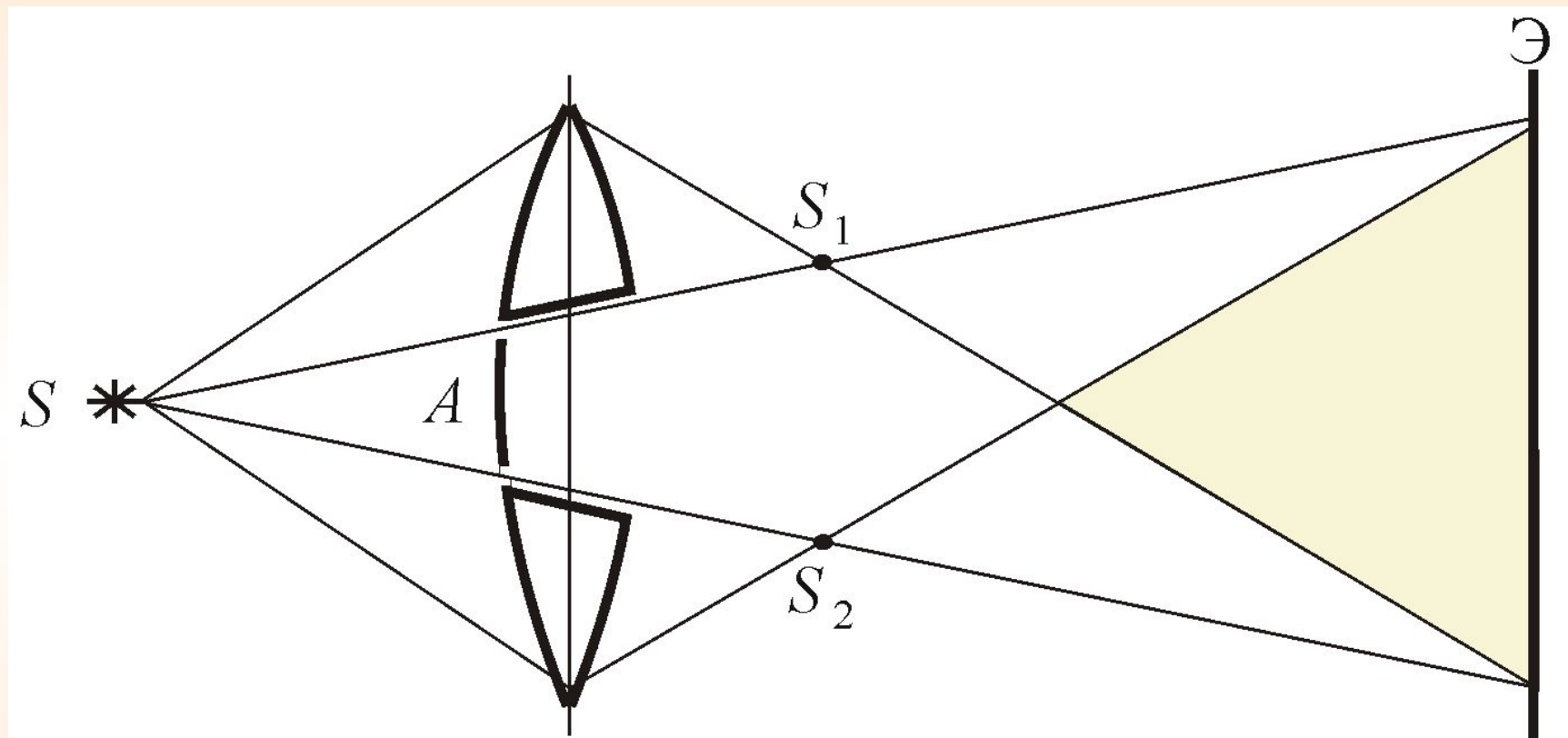


Рисунок 7.8

7.6 Интерференция в тонких пленках

Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*. Один из способов, использующих такой метод – *опыт Поля*.

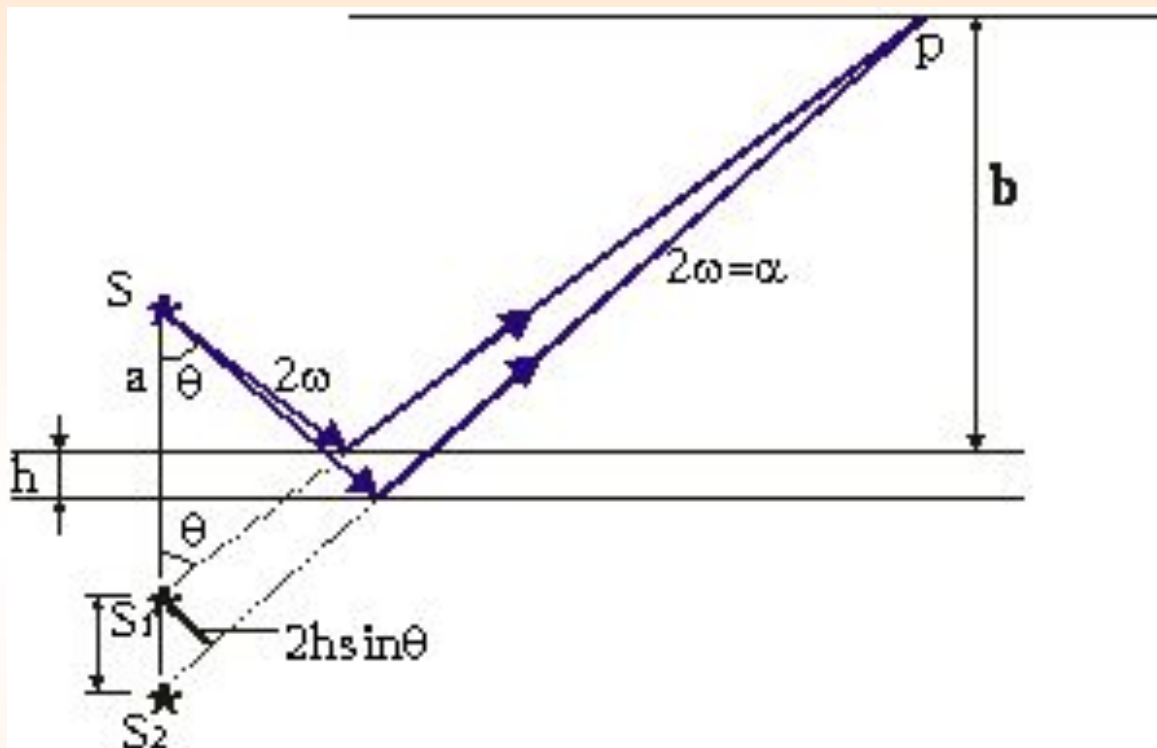


Рисунок 7.9

Полосы равного наклона

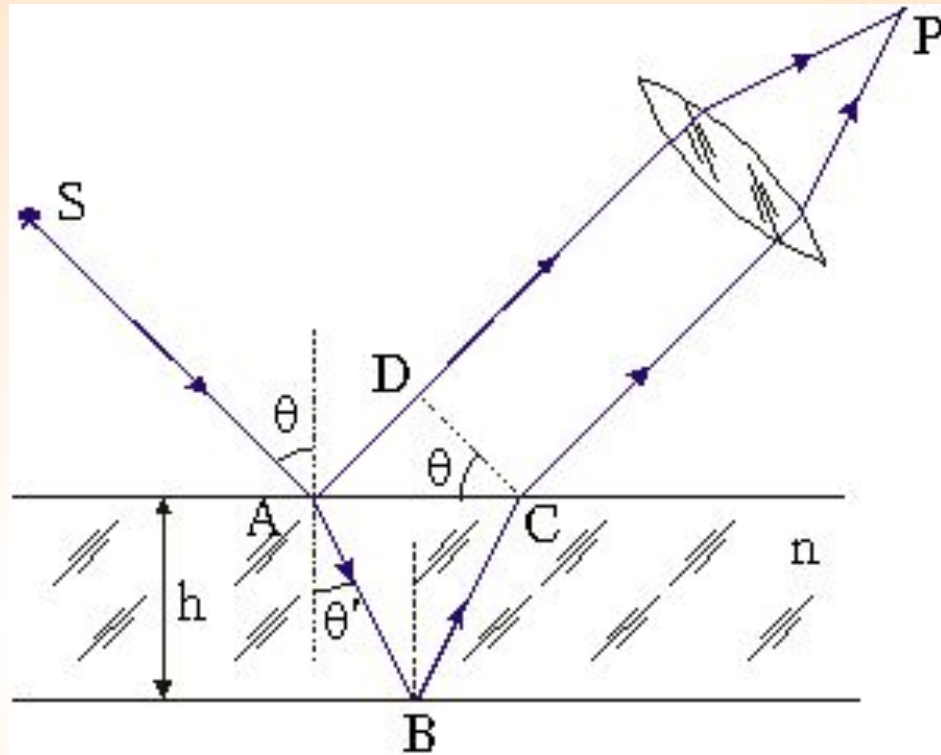
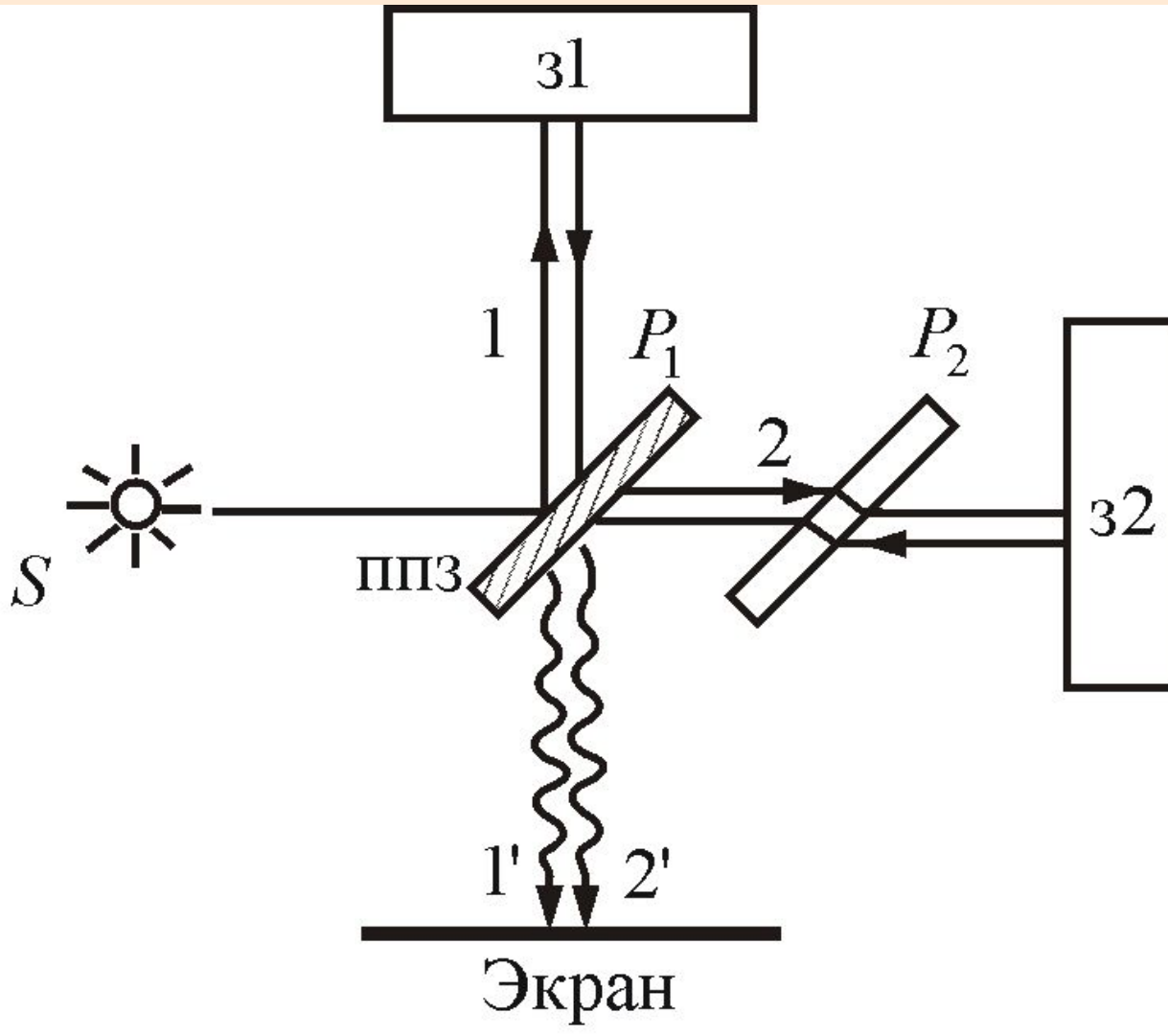


Рисунок 7.10

$$\Delta = 2nh \cos \beta$$

интерференционные полосы равного наклона.



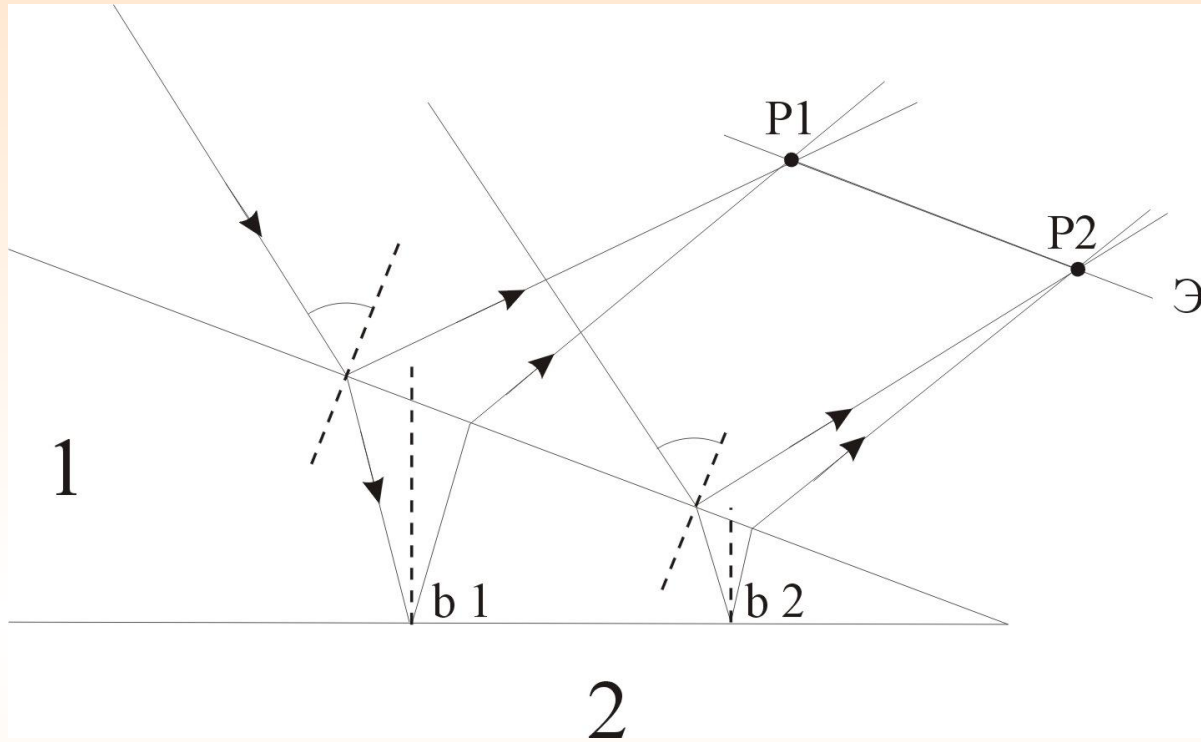
Для наблюдения
полос равного
наклона вместо
плоскопараллель-
ной пластинки
удобно
использовать
*интерферометр
Майкельсона*

Рисунок 7.11

Интерференция от клина. Полосы равной толщины

В белом свете интерференционные полосы окрашены. Поэтому такое явление называют *цветами тонких пленок*. Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов при закалке, и т.п.

Полосы равной толщины





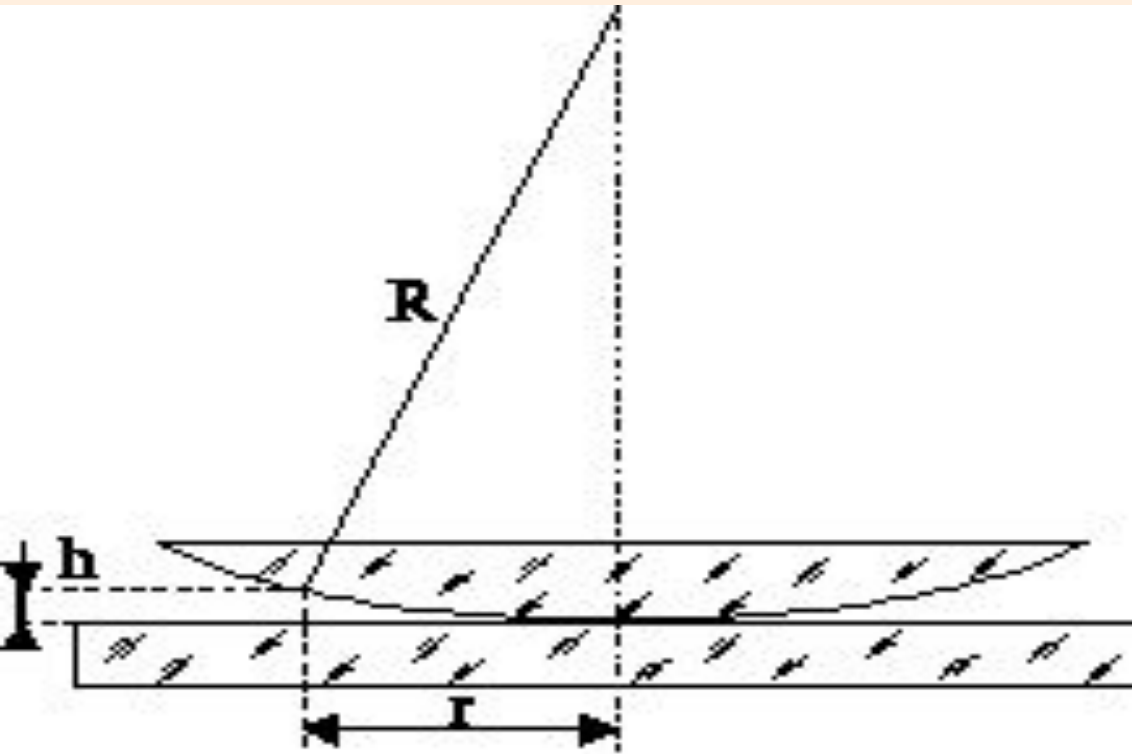
Кольца Ньютона

*Кольцевые полосы
равной толщины,
наблюдаемые в
воздушном зазоре*

*между соприкасающимися выпуклой сферической
поверхностью линзы малой кривизны и плоской
поверхностью стекла, называют **кольцами
Ньютона.***

НЬЮТОН объяснил это явление на основе
корпускулярной теории света.

Кольца Ньютона



$$r_m = \sqrt{mR\lambda} \quad \text{радиус } m\text{-го темного кольца}$$

Полосы равной толщины можно наблюдать и с помощью интерферометра Майкельсона, если одно из зеркал $З1$ или $З2$ (рисунок 7.11) отклонить на

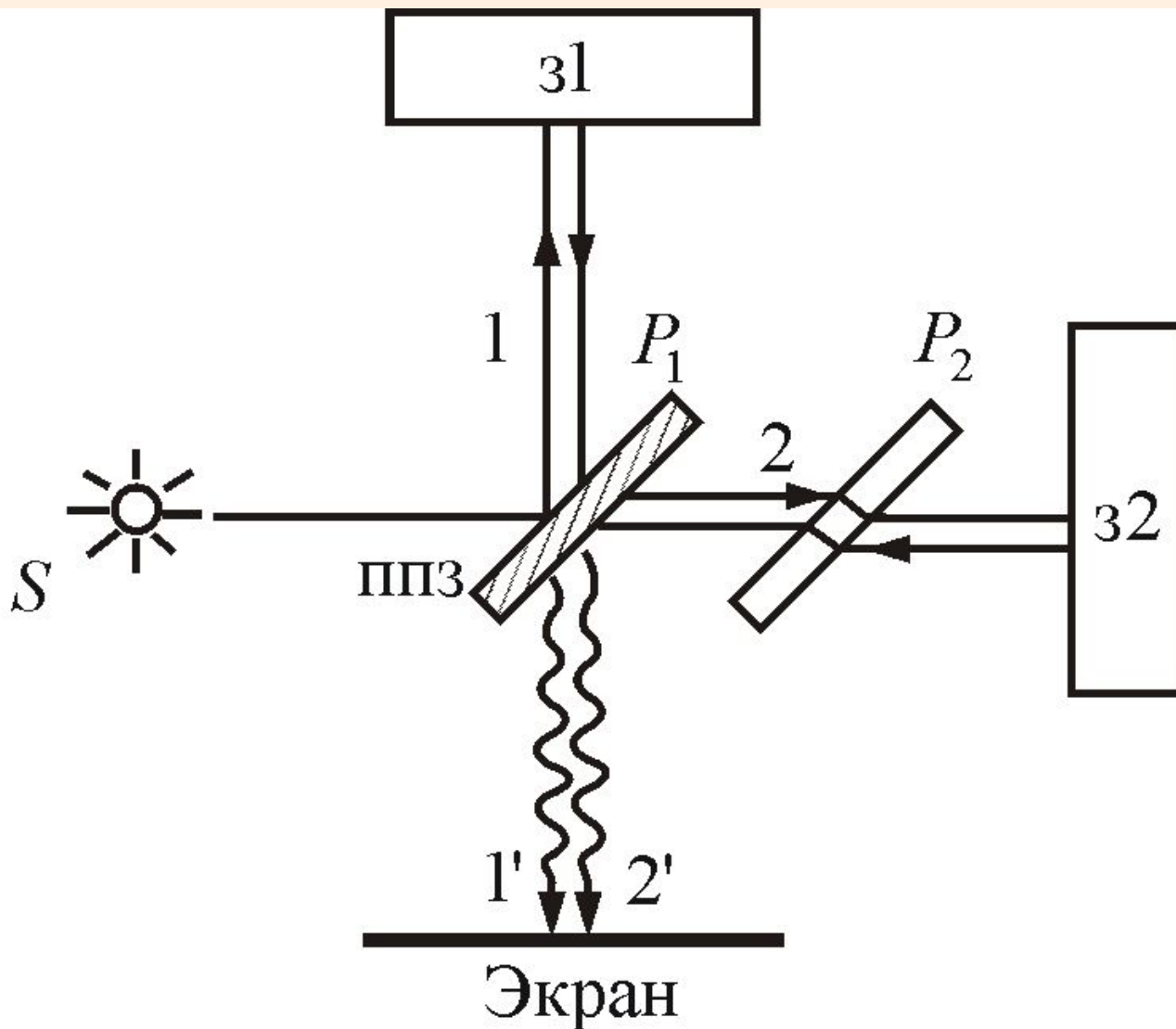


Рисунок 7.11

Итак: *полосы равного наклона* получаются при освещении пластинки постоянной толщины ($b = \text{const}$) *рассеянным светом* в котором содержатся лучи разных направлений. *Полосы равной толщины* наблюдаются при освещении пластинки переменной толщины (клина) ($b \neq \text{const}$) *параллельным пучком света*.

7.7 Применение интерференции света

- Тот факт, что расположение интерференционных полос зависит от длины волны и разности хода лучей, позволяет по виду интерференционной картины (или их смещению) проводить точные измерения расстояний при известной длине волны или, наоборот, определять спектр интерферирующих волн (*интерференционная спектроскопия*).

- Кроме того, по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.
- Явление интерференционных волн, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с «опорной» волной лежит в основе *голографии* (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии).

- Интерференционные волны от отдельных «элементарных» излучателей используется при создании сложных излучающих систем (антенн) для электромагнитных и акустических волн.
- *Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.*

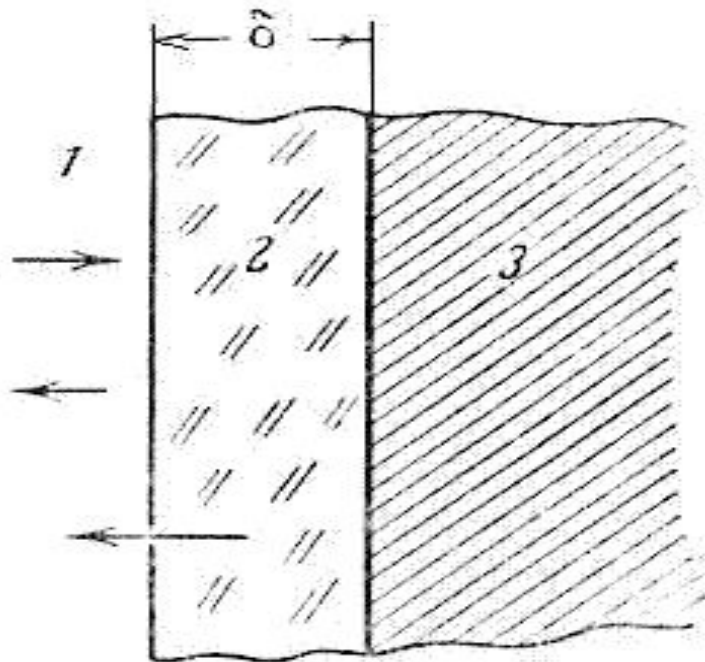
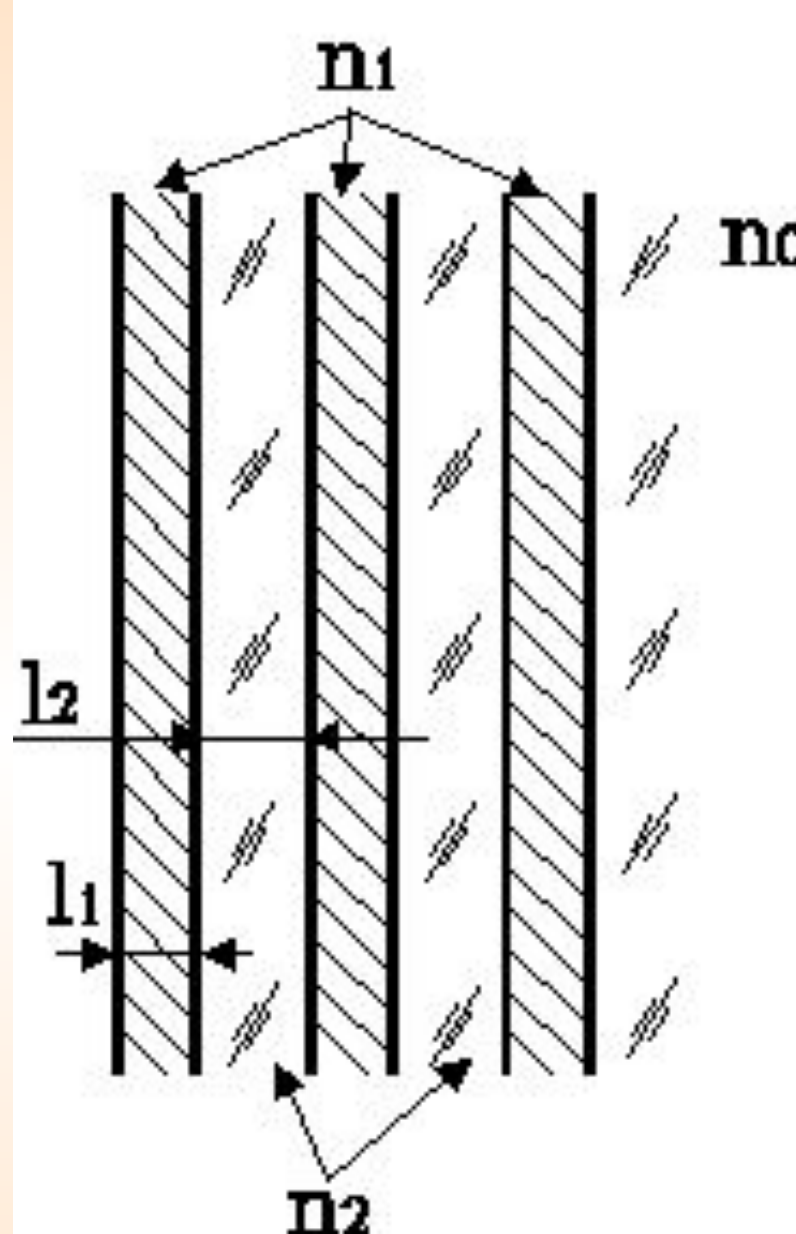


Рисунок 7.15

Рисунок 7.16



$$\delta = (2m + 1)\lambda / 4 \quad (7.7.1)$$

- *Получение высокоотражающих электрических зеркал*

Для получения коэффициента отражения $R = 0,99$ (такие зеркала используются в лазерных резонаторах) надо нанести 11 – 13 слоев.

КОНЕЦ ЛЕКЦИИ

ЕЩЕ НЕ БЛИЗОК!!!



НЕ ТОРМОЗИ, ФИЗИКОЙ ЗАРЯЖАЙ МОЗГИ!!!