

*Лекция 15.* Интерференция света  
в тонких пленках. Применения  
интерференции

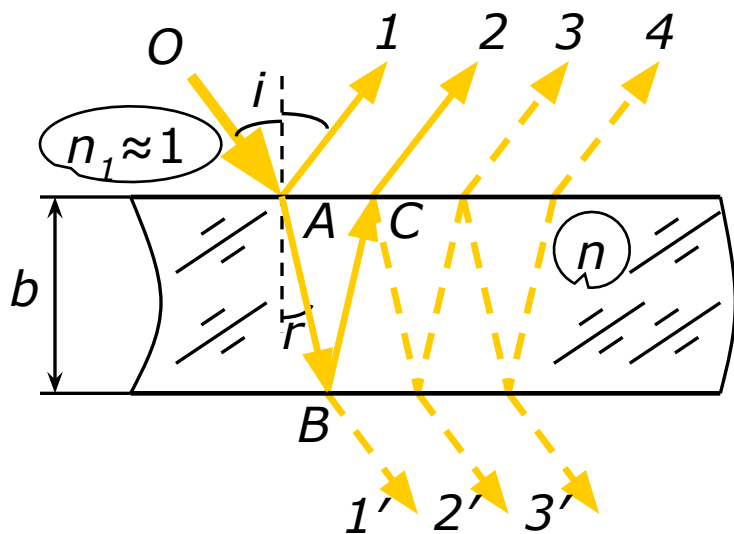
## ***Вопросы:***

- Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок
- Применения интерференции света: просветление оптики, интерферометры

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равного наклона

Пусть на прозрачную плоскопараллельную пластинку падает плоская монохроматическая световая волна, которую можно рассматривать как параллельный пучок лучей (на рис. представлен один из лучей  $OA$ ). В результате отражений от обеих поверхностей (верхней и нижней) пластинки исходная волна расщепится на две световые волны (лучи  $1$  и  $2$ ), которые при определенных условиях могут интерферировать.



Амплитуды (и интенсивности) этих волн мало отличаются друг от друга, а это важно для получения контрастной интерференционной картины.

*Замечание.* Кроме волн  $1$  и  $2$  возникают также многократноотраженные волны (лучи  $3, 4, \dots$ ) и волны, прошедшие пластинку (лучи  $1', 2', 3', \dots$ ), однако ввиду их малой интен-

сивности (при каждом отражении теряется до 95% светового потока) далее рассматривать эти пучки не будем.

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равного наклона

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 равна

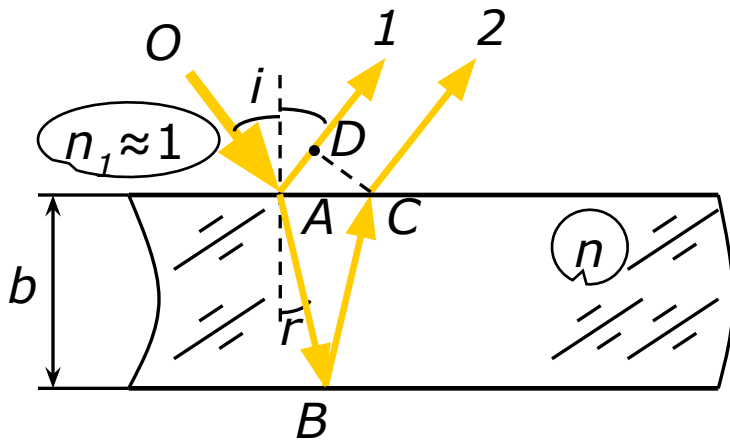
$\Delta = l_{оп2} - l_{оп1} = n \cdot (AB + BC) - AD$ , где  $n$  – показатель преломления пластинки. Так как  $(AB + BC) = 2 \cdot b / \cos r$ ,  $AD = (2 \cdot b \cdot \operatorname{tg} r) \cdot \sin i$ , то после их подстановки в  $\Delta$  получаем

$$\Delta = 2 \cdot n \cdot b \cdot \cos r \quad (1)$$

Следует учесть, что при отражении света от границы раздела с оптически более плотной средой (луч 1) происходит скачок фазы колебаний на  $\pi$  у отраженной волны, т.е., как говорят, происходит «приобретение» (или «потеря») этой волной полуволны  $\lambda/2$ .

В соответствии с законом преломления  $\sin i = n \cdot \sin r$  получаем  $\cos r = \sqrt{n^2 - \sin^2 i} / n$  и выражение (1) принимает вид:

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = \lambda / 2 \quad (2)$$



# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равного наклона

Таким образом, в случае когерентности волн 1 и 2 и при их соответствующем наложении получаем условие наблюдения максимумов  $I_{max}$  отражения:

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \lambda / 2 = m \cdot \lambda \quad \text{или} \quad 2 \cdot b \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m + 1) \lambda / 2 \quad (3)$$

где  $m = 0; 1; 2; \dots$  - интерференционный порядок.

В случае падения света, распространяющегося в среде с показателем преломления  $n_1$ , на границу раздела со средой более плотной ( $n_2 > n_1$ ) имеем условие наблюдения максимумов интенсивности в отраженном свете:

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 i} - n_1 \cdot \lambda_1 / 2 = m(n_1 \cdot \lambda_1) \quad (4)$$

или с учетом, что длина волны света в вакууме  $\lambda_0 = n_1 \cdot \lambda_1$ :

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 i} = (m + 1/2) \lambda_0 \quad (4')$$

Условие минимумов интенсивности в отраженном свете:

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 i} - \lambda_0 / 2 = (m + 1/2) \lambda_0 \quad (5)$$

или

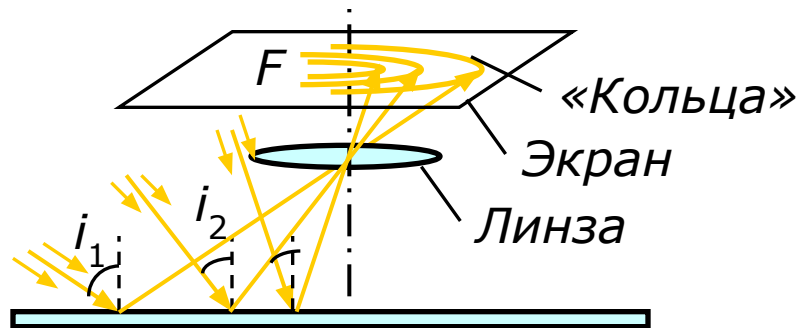
$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 i} = (m + 1) \lambda_0$$

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равного наклона

Меняя угол падения  $i$  света на пластинку, мы будем наблюдать последовательную смену интерференционных максимумов и минимумов отражения. Иначе говоря, будут наблюдаться *интерференционные полосы равного наклона*, т. е. соответствующие определенным углам падения лучей  $i$ .

Для получения картины полос равного наклона можно использовать в качестве падающего – рассеянный монохроматический свет (он содержит лучи, падающие на пластинку одновременно под самыми разными углами), а на пути отраженного света поставить собирающую линзу и в ее фокальной плоскости разместить экран (см. рис.).



*Замечания.* В данном эксперименте «полосы» представляют собой вид концентрических колец с центром  $F$  (фокус линзы), имеющие определенную интенсивность ( $I_{max}$  или  $I_{min}$ ).

При таком положении экрана говорят, что полосы равного наклона локализованы на бесконечности.

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

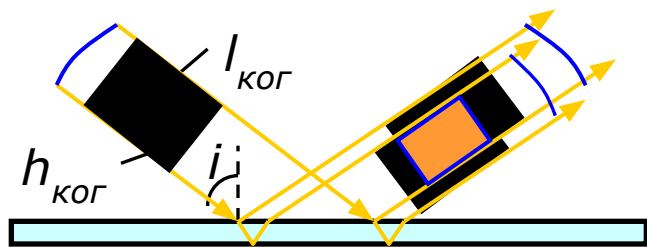
- Интерференционные полосы равного наклона

*Замечания.* 1. Если удастся наблюдать интерференционную картину в проходящем свете, то последовательность чередования полос изменится на обратную: соответствующий  $I_{min}$  в отраженном свете становится  $I_{max}$  в проходящем свете. 2. При освещении пластинки белым светом получается окрашенная интерференционная картина (для некоторых  $\lambda_i$  выполняются условия максимумов, а для других  $\lambda_{i+1}$  – условия минимумов).

Определим условия, при которых отраженные волны будут когерентными и, следовательно, будут интерферировать, т.е. на практике для них выполняются соотношения:

$$l_{\text{ког}} \geq 2 \cdot \Delta \text{ и } h_{\text{ког}} \geq 2 \cdot d \quad (6)$$

Рассмотрим область когерентности ( $l_{\text{ког}} \cdot h_{\text{ког}}$ ) в падающей волне (на рис. заштрихована) и проследим за ее динамикой.



После «расщепления» падающей волны расщепится и область когерентности, причем так, что в отраженных волнах эти области сместятся относительно друг друга. Если при этом они

перекрываются, то будет наблюдаться интерференция, и тем отчетливее, чем больше степень перекрытия.

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

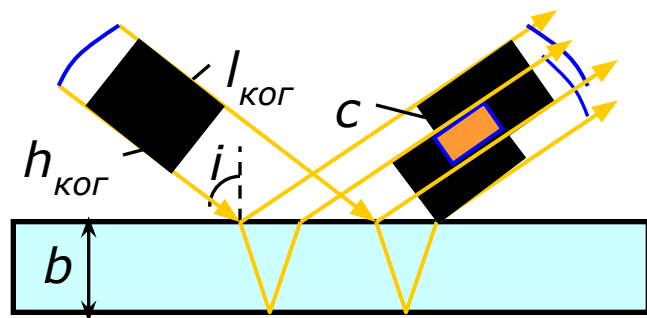
- Интерференционные полосы равного наклона

При увеличении толщины  $b$  пластинки область когерентности уменьшается и интерференционная картина становится все менее отчетливой и, начиная, с некоторой  $b$  интерференция исчезает.

Согласно (3) и (6) условие когерентности отраженных волн:

$$2 \cdot b \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \lambda/2 \leq l_{\text{ког}}/2 \quad (7)$$

Из последнего соотношения можно оценить критическую толщину пластинки (полагая  $\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \approx 1$  пренебрегая  $\lambda/2$  и с учетом  $l_{\text{ког}} = \lambda^2/\Delta\lambda$ ):  $b \leq \lambda^2/(4 \cdot \Delta\lambda)$ .



Также поперечный сдвиг ( $c$ ) частей области когерентности не должен превосходить половины ширины когерентности, т.е.  $c \leq h_{\text{ког}}/2$ . При этом чем меньше угол падения света  $i$ , тем меньше величина  $c$  и, следовательно, тем меньшая требуется ширина когерентности.

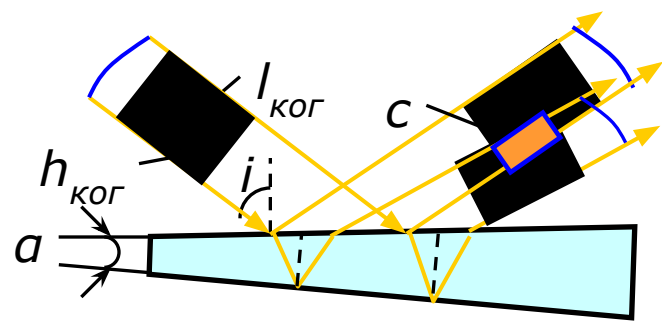


# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равной толщины

Если стеклянная пластинка имеет форму клина с малым углом раскрытия  $a \ll 1$ , и на нее падает плоская монохроматическая световая волна, то в этом случае отраженные от поверхностей клина волны будут распространяться под разными углами.

Выясним, где будет локализована интерференционная картина; это проще сделать при исследовании области когерентности после расщепления волны при отражении от поверхностей клина.



Ясно, что при небольших  $l_{\text{ког}}$  и  $h_{\text{ког}}$  область перекрытия когерентных участков отраженных волн локализована в основном вблизи поверхности клина и становится все более узкой по мере перемещения в сторону утолщения клина, исчезая совсем.

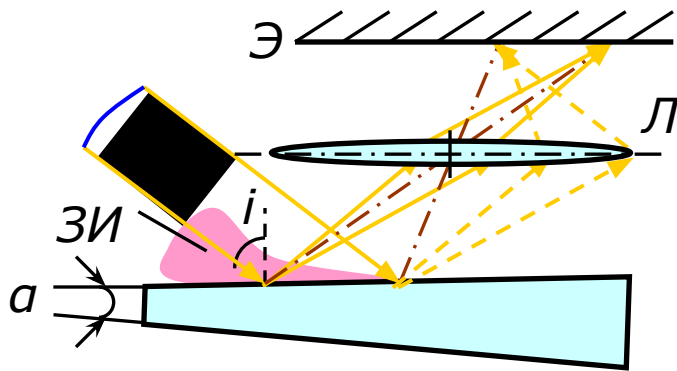
Так как разность хода лучей, отразившихся от различных мест клина, неодинакова, в зоне интерференции появятся светлые и темные полосы, параллельные ребру клина.

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равной толщины

Каждая из этих полос возникает при суперпозиции отраженных лучей от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют *полосами равной толщины*.

С помощью линзы, сфокусированной на верхнюю грань клина, интерференционную картину с его поверхности можно отобразить на экран, расположенный за линзой в плоскости, сопряженной с плоскостью клина, где пересекаются отраженные лучи (они обладают когерентностью).



В этом случае картина будет наблюдаться даже тогда, когда пространственная когерентность падающей волны – мала.

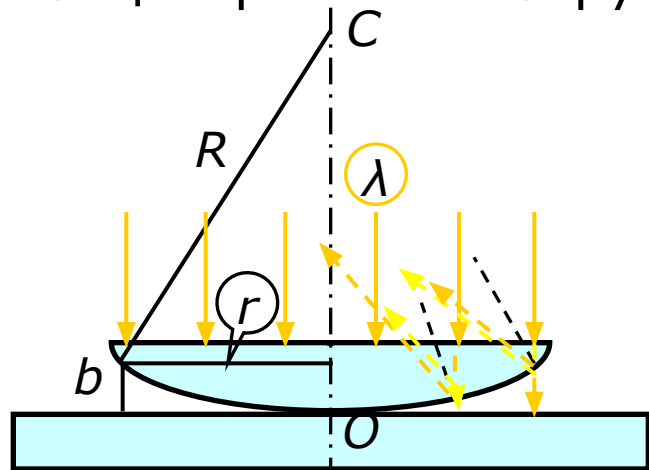
Полосы равной толщины можно также наблюдать в тонкой клиновидной прослойке воздуха между поверхностями двух прозрачных (относительно толстых) пластинок. Это явление используется при контроле качества шлифованных поверхностей плоскопараллельных пластинок.

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Интерференционные полосы равной толщины

Кольца Ньютона – это кольцевые полосы равной толщины, наблюдаемые при отражении света от поверхностей (воздушного) зазора между стеклянной пластиной и соприкасающейся с ней плоско-выпуклой линзой.

При нормальном падении света кольца имеют вид concentрических окружностей с центром в точке касания  $O$ .



Из рисунка видно, что для радиуса некоторого кольца выполняется  $r^2 = R^2 - (R-b)^2$ , а при условии  $b \ll R$  имеем  $r^2 \approx 2 \cdot b \cdot R$ , откуда  $b = r^2 / 2R$ .

Условие образования темных колец:

$$\Delta = 2b + \lambda/2 = (2m + 1) \cdot \lambda/2, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, \dots \text{ или } 2b = m \cdot \lambda, \text{ а с учетом } b$$

получаем радиус  $m$ -го темного кольца  $r_m = \sqrt{m \cdot \lambda \cdot R}$

Условие наблюдения светлых колец (условие  $I_{max}$ ):

$$\Delta = 2b + \lambda/2 = m \cdot \lambda, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots; \text{ при этом радиус } m\text{-го светлого кольца } r_m = \sqrt{(m - 1/2) \lambda \cdot R}$$

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## *Просветление оптики*

В основе технологии просветления оптики (объективов) лежит интерференция света при отражении от тонких пленок. Дело в том, что при прохождении света через каждую преломляющую поверхность линзы (призмы и т.п.) отражается до 4...5 % падающего света. В сложных объективах такие отражения могут происходить многократно, и суммарная потеря светового потока оказывается весьма ощутимой. Например, в призмённом бинокле – больше 50 %. Кроме того, отражения от поверхностей линз приводят к возникновению бликов.

С целью устранения потерь на отражение применяют просветление оптики, т.е. на каждую свободную поверхность линзы наносится (напыляется) тонкая пленка прозрачного диэлектрика с показателем преломления  $n' \cong \sqrt{n_1 \cdot n_2}$  (8) где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред, между которыми находится пленка. Диэлектриком могут быть соединения  $\text{CdF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ .

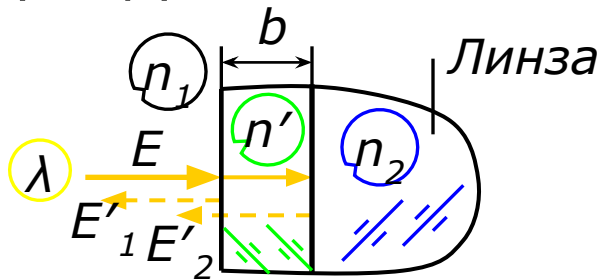
# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## Просветление оптики

В этом случае амплитуды отраженных от обеих поверхностей пленки волн оказываются [см. теорию  $E'_m/E_m = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ ] практически одинаковыми, и для них можно записать равенство  $E'_1/E \approx E'_2/E$ , а в случае исходной воздушной среды  $n_1 \approx 1$  получаем  $(1 - n')/(1 + n') \approx (n' - n_2)/(n' + n_2)$ , откуда собственно следует условие (8) для  $n'$ .

Толщина пленки  $b$  выбирается такой, чтобы отраженные волны оказывались в противофазе, т.е. при наложении гасили друг друга. Следовательно из условия минимумов при нор-



мальном падении света с длиной волны  $\lambda$ :  $2b \cdot n' = (m + 1/2) \cdot \lambda$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$  и учтено, что обе волны отражаются от оптически более плотных сред и испытывают скачок фазы

на « $\pi$ » (потеря ими  $\lambda/2$ ), можно определить ряд возможных толщин  $b = (m + 1/2) \cdot \lambda / 2n'$ . При этом с целью минимизации поглощения света пленкой следует выбирать:

$$b_{min} = \lambda / 4 \sqrt{n_2} \text{ при } m = 0.$$

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

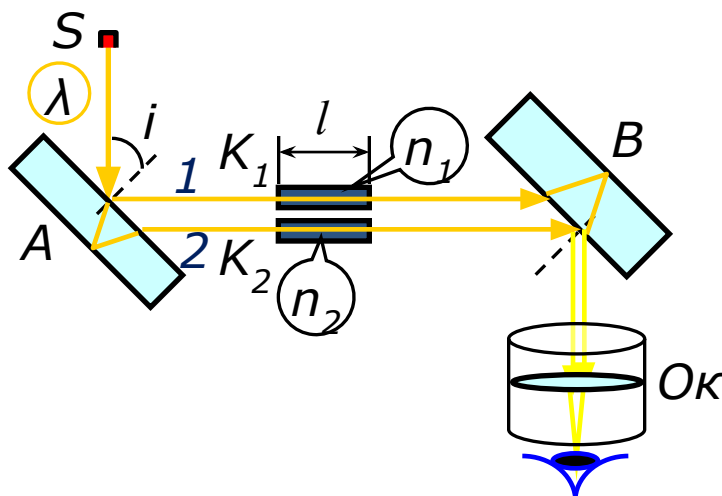
## Интерферометры

Интерферометр Жамена выполняет роль *интерференционного рефрактометра*, т.е. прибора для измерения показателя преломления.

Интерферометр состоит из двух плоскопараллельных пластин  $A$  и  $B$ , источника света (щель)  $S$ , двух калиброванных кювет  $K_1$  и  $K_2$  и окуляра  $Ok$ .

Узкий пучок света от источника  $S$  падает под углом  $i = 45^\circ$  на достаточно тонкую пластинку  $A$ , где в результате отражений и преломлений расщепляется на два пучка (луча)  $1$  и  $2$ . Далее эти лучи проходят через кюветы калиброванной

длины  $l$ , попадают на пластинку  $B$  для повторных отражений и преломлений, которая направляет их в окуляр  $Ok$ . Лучи  $1$  и  $2$  – когерентны и могут интерферировать, поэтому в окуляре наблюдается интерференционная картина, положение полос которой зависит от разности хода лучей  $\Delta = (n_2 - n_1) \cdot l$ .



# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## *Интерферометры*

Интерферометр Жамена обычно настраивается по картине в окуляре при заполнении кювет воздухом, когда  $n_1 = n_2 \approx 1$ .

При заполнении одной из кювет (пусть  $K_2$ ) исследуемой средой (газом), показатель преломления  $n_2$  которой надо определить, наблюдается смещение исходной интерференционной картины на  $N$  - полос. Возникающую оптическую разность хода  $\Delta$  лучей 1 и 2 можно связать со смещением картины как  $\Delta = N \cdot \lambda$ , поэтому искомая величина легко определяется из уравнения для  $\Delta$ , т. е.  $n_2 = N \cdot \lambda / l + 1$ .

Интерферометр Майкельсона – прибор, предназначенный для точного измерения малых длин.

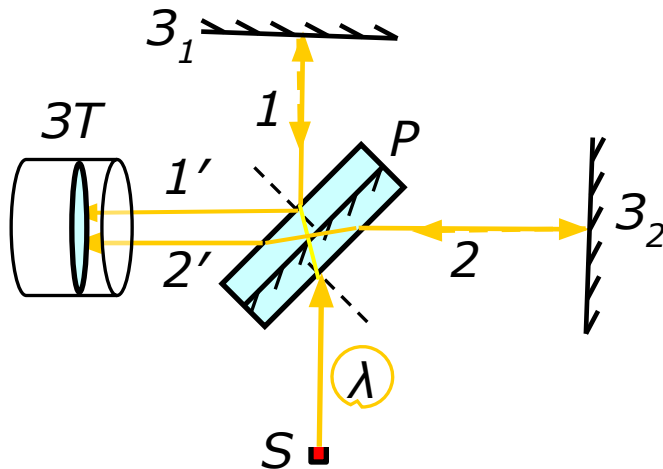
С его помощью впервые была измерена длина световой волны, проведено изучение тонкой структуры спектральных линий, выполнено первое прямое сравнение эталонного метра с длиной волны света. С помощью этого интерферометра был осуществлен знаменитый опыт Майкельсона и Морли, доказавший независимость скорости света от движения Земли (от движения источника света).

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## *Интерферометры*

Рассмотрим упрощенную схему интерферометра Майкельсона. Монохроматический свет от источника  $S$  падает на разделительную пластину  $P$ , которая состоит из двух одинаковой толщины плоскопараллельных стеклянных пластинок, склеенных между собой. Причем одна из склеиваемых поверхностей покрыта полупрозрачным слоем серебра. Пластина  $P$  разделяет падающий на нее свет на два взаимно перпендикулярных пучка  $1$  и  $2$  одинаковой интенсивности.



Пучок  $1$ , отраженный затем от зеркала  $Z_1$ , вторично падает на разделитель, где снова расщепляется на две части; одна из них  $1'$  отражается в сторону зрительной трубы  $ЗТ$ , другая - идет к источнику  $S$  (далее не используется). Пучок  $2$ , выйдя из пластины, отражается от зеркала  $Z_2$ , возвращается к  $P$ , где опять расщепляется на две части, одна из которых  $2'$  попадает в трубу.



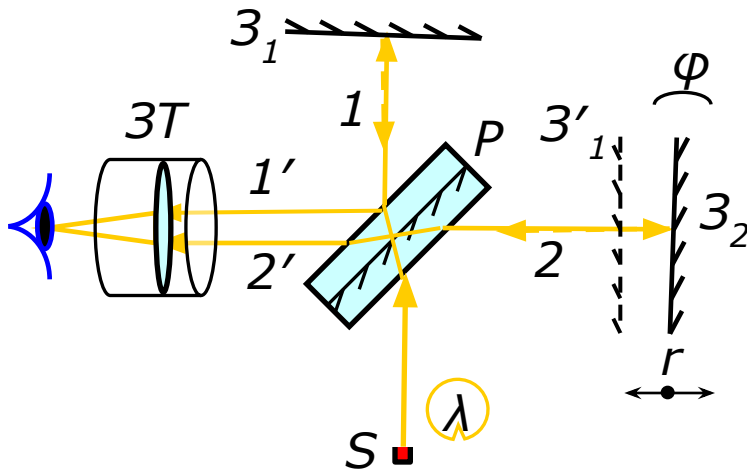
# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## Интерферометры

Таким образом, от одного источника  $S$  образуются два пучка примерно одинаковой амплитуды, которые распространяются после разделительного слоя ( $P$ ) в разных плечах интерферометра. После отражений в зеркалах они снова встречаются и создают при условии временной и пространственной когерентности интерференционную картину в объективе зрительной трубы  $ЗТ$ .

Зеркало  $Z_1$  – неподвижно, а зеркало  $Z_2$  можно с помощью микрометрических винтов перемещать поступательно ( $r$ ) и изменять его наклон ( $\varphi$ ).



Заменим мысленно зеркало  $Z_1$  его мнимым изображением  $Z'_1$  (в полупрозрачном зеркале  $P$ ). Тогда пучки  $1'$  и  $2'$  можно рассматривать как возникающие при отражении от «прозрачной пластинки», ограниченной плос-

костями  $Z'_1$  и  $Z_2$ .

# Интерференция света при отражении (преломлении) от тонких пластинок

- Применения интерференции света

## *Интерферометры*

Вид интерференционной картины зависит от юстировки зеркал и от расходимости пучка света, падающего на разделитель ( $P$ ).

Случай 1. Если пучок слегка расходящийся, а плоскости  $Z'_1$  и  $Z_2$  параллельны, то получаем полосы равного наклона, имеющие вид концентрических колец.

При поступательном перемещении  $Z_2$  к  $Z'_1$  радиусы колец уменьшаются, кольца стягиваются к центру (где и исчезают). Смещение картины на одну полосу соответствует перемещению  $Z_2$  на  $\lambda/2$ .

*Замечание.* Визуально можно оценить смещение с точностью до  $1/20$  полосы. Прибор обладает высокой разрешающей силой  $\lambda/\delta\lambda$ .

Случай 2. Если пучок от источника  $S$  параллельный, а плоскости  $Z'_1$  и  $Z_2$  – не параллельны, то в трубе  $ZT$  будут наблюдаться полосы равной толщины (как от клиновидной пластинки).

*Замечание.* При больших расстояниях между  $Z'_1$  и  $Z_2$  и высокой степени монохроматичности света ( $\lambda/\Delta\lambda$ ) удастся с помощью нелазерных источников наблюдать интерференцию до  $m \approx 10^6$  порядка.