

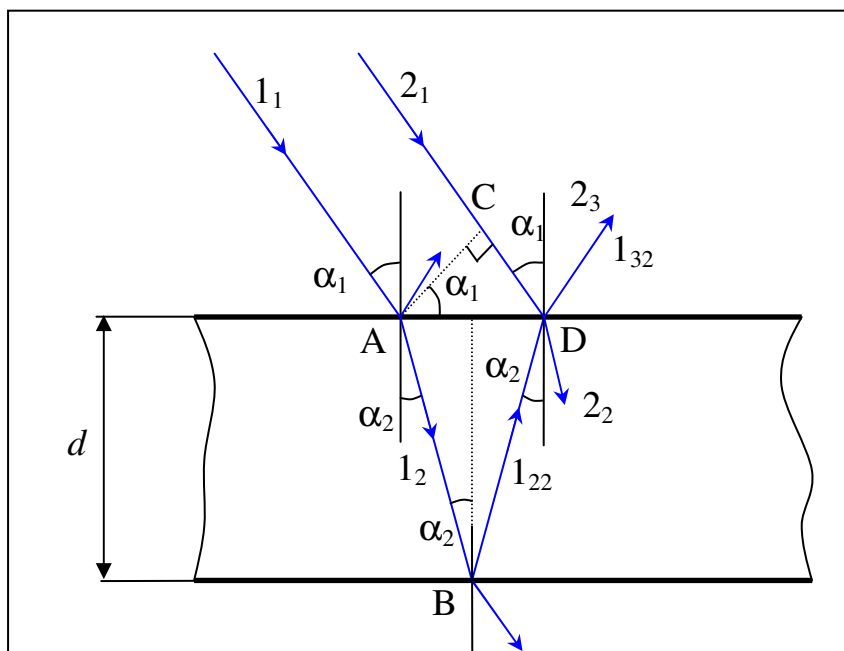
## Лекция 20. Интерференция света в тонких плёнках.

*Интерференционные полосы равной толщины и равного наклона. Применение интерференции, интерферометры.*

Во многих оптических приборах используются линзы. Линзы обладают следующим свойством – оптическая разность хода параллельных лучей при прохождении через линзу не меняется. Это приводит, например, к тому, что время движения света вдоль любого из параллельных лучей от одной и той же фазовой плоскости до точки пересечения с какой-то фокальной плоскостью линзы не зависит от выбора луча. (Такое свойство называется *таутохронностью*.)

Для солнечного света длина когерентности имеет порядок длины волны. Можно ожидать, что в тонких пленках или тонких зазорах, размер которых сопоставим с длиной волны света, будет наблюдаться интерференционная картина.

## Интерференционные полосы равного наклона.



Пусть на тонкую прозрачную пластинку под углом  $\alpha_1$  падает свет. Показатель преломления окружающей среды  $n_1$ , а материала пластинки  $n_2$ . Толщина пластинки  $d$ .

Луч  $1_1$  соответствует 1й волне, падающей на пластинку,  $1_2$  – преломлённой,  $1_{22}$  – отраженной от нижней поверхности,  $1_{32}$  – еще раз преломлённой и вышедшей обратно.

Луч  $2_1$  соответствует 2й волне, падающей на пластинку,  $2_2$  - один раз преломлённой и  $2_3$  - один раз отражённой 2й волне. Другие отражения и преломления не учитываем.

Будем рассматривать интерференцию лучей  $1_{32}$  и  $2_3$ . Оптическая разность хода этих лучей  $\Delta L = n_2 (|AB| + |BD|) - n_1 |CD|$  или

$$\Delta L = 2 \frac{d}{\cos \alpha_2} n_2 - 2d \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 n_1.$$

С учётом закона преломления  $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$  и тригонометрического тождества  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ :

$$\Delta L = 2 \frac{d}{\cos \alpha_2} n_2 - 2d \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 n_1 = \frac{2d (n_2 - n_1 \sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_1)}{\cos \alpha_2} = \frac{2n_2 d (n_2 - n_2 \sin^2 \alpha_2)}{n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2}},$$

$$\Delta L = \frac{2d (n_2^2 - n_2^2 \sin^2 \alpha_2)}{\sqrt{n_2^2 - n_2^2 \sin^2 \alpha_2}} = 2d \sqrt{n_2^2 - n_2^2 \sin^2 \alpha_2} = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1},$$

$$\Delta L = 2n_1 d \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha_1}.$$

Теперь предположим, что  $n_2 > n_1$  - т.е. вторая среда оптически более плотная, чем первая. В этом случае фаза отражённого луча  $2_3$  отличается от фазы падающего луча  $2_1$  на  $\pi$ . Это равносильно тому, что оптическая длина хода 2 луча изменилась на  $\frac{\lambda}{2}$ . Действительно, изменение фазы будет равно  $\Delta \varphi = k \frac{\lambda}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} = \pi$ .

Поэтому условие интерференционных максимумов имеет вид  $\Delta L \pm \frac{\lambda}{2} = m\lambda$ .

Откуда

$$2n_1 d \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha_1} = (2m \pm 1) \frac{\lambda}{2}.$$

(Знак «+» берём в случае, если нумерация начинается с  $m=0$ ).

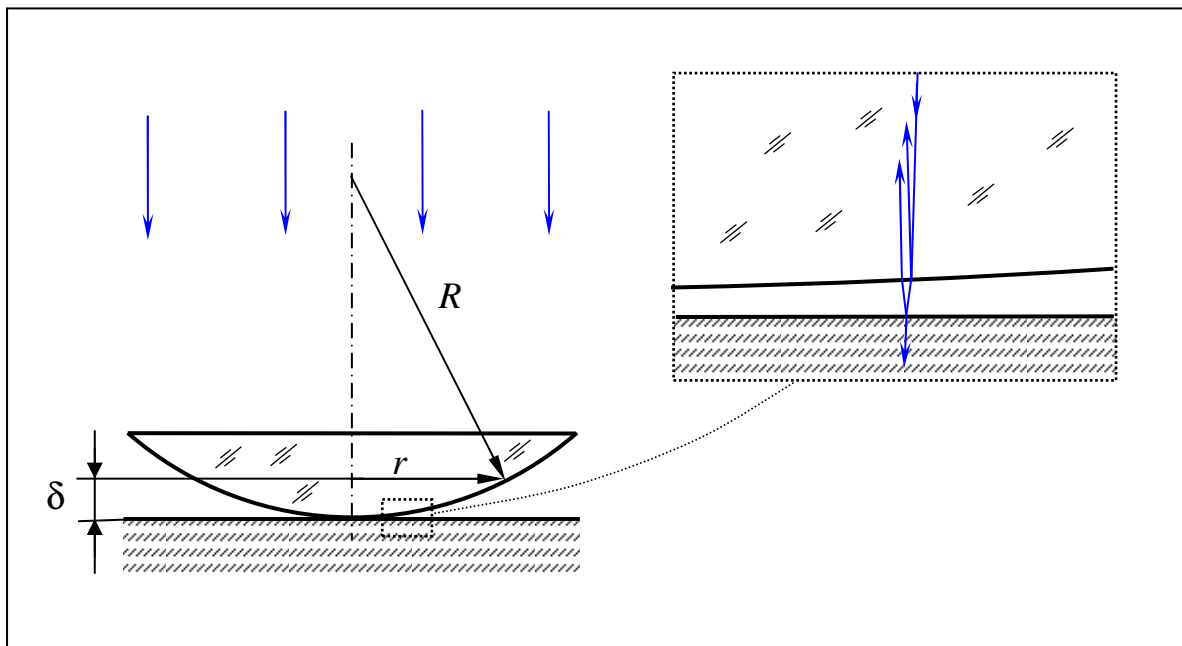
Соответственно, минимумы определяются соотношением

$$2n_1d\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \alpha_1} = m\lambda.$$

Если отраженные лучи пропустить через собирающую линзу, в фокальной плоскости которой находится экран, то на экране получится интерференционная картина. Лучи, угол падения которых соответствует условию максимума при отражении, после отражения формируют светлые полосы. Поэтому такую картину называют «полосы равного наклона».

### Интерференционные полосы равной толщины.

Рассмотрим плоско-выпуклую линзу, лежащую на плоской стеклянной подложке. Недалеко от пятна контакта, зазор имеет толщину соизмеримую с длиной



волны света. Поэтому можно ожидать, что в этой зоне будет формироваться интерференционная картина. Пусть на плоскую поверхность линзы нормально падает свет с длиной волны  $\lambda$ . Интерференционная картина представляет собой систему чередующихся тёмных и светлых колец, которые называются *кольцами Ньютона*. Одно кольцо соответствует одинаковой толщине зазора между линзой и стеклом, поэтому данная картина называется «полосы равной толщины». Найдём радиус колец. Если через  $\delta$  обозначить толщину (воздушного) зазора, то радиус кольца

$$r^2 = R^2 - (R - \delta)^2 = 2R\delta - \delta^2.$$

В той области, где наблюдается интерференционная картина, толщина зазора между линзой и стеклом имеет порядок длины волны света  $\delta \sim \lambda$ , поэтому можно пренебречь величиной  $\delta^2$  по сравнению с  $R$ . В этом случае  $r = \sqrt{2R\delta}$ .

Для отражённого света интерференционная картина более контрастная, чем для проходящего.

Оптическая разность хода лучей равна  $2\delta$ . При отражении от стекла фаза отражённой волны меняется на  $\pi$ . Это можно учесть введением поправки для оптической разности хода в полволны  $\frac{\lambda}{2}$ .

Светлые кольца соответствуют максимуму интенсивности. Условие максимума  $2\delta \pm \frac{\lambda}{2} = m\lambda$ . Откуда  $2\delta = m\lambda \pm \frac{\lambda}{2}$  и радиус светлого кольца с номером  $m$ :

$$r_m = \sqrt{R \left( m\lambda \pm \frac{\lambda}{2} \right)}.$$

Минимальный радиус светлого кольца  $r_{MIN} = \sqrt{R \frac{\lambda}{2}} > 0$ , поэтому в центре картины находится тёмное пятно.

### Интерферометр.

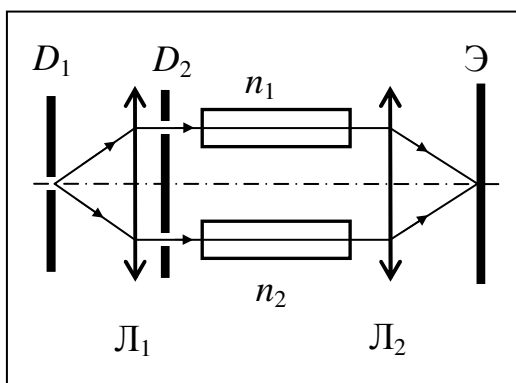
Интерферометр - оптический прибор, принцип действия которого основан на разделении пучка света на два или несколько когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе.

Полученная интерференционная картина позволяет:

- контролировать качество поверхностей и однородность оптических материалов;
- измерять показатели преломления, длины волн, напряжения в деталях и т.п.

Интерферометры применяются для измерения длины волны спектральных линий и их структуры и абсолютного показателя преломления сред; для измерения длин и перемещений тел; для контроля формы; микрорельефа и деформаций поверхностей оптических деталей; чистоты металлических поверхностей и пр.

## Примеры интерферометров

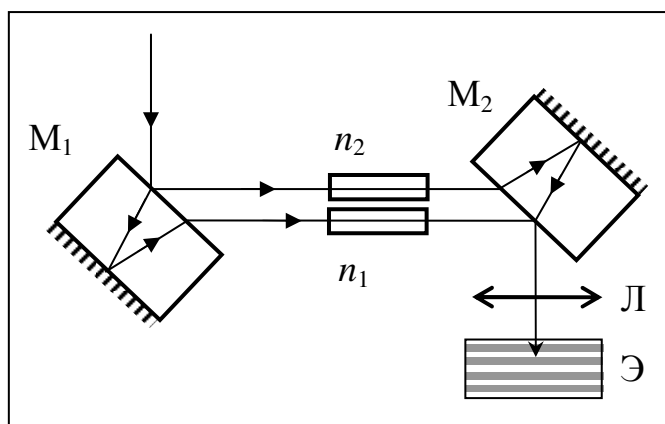


1) *Интерферометр Рэлея.* Лорд Рэлей построил интерферометр для измерения показателя преломления жидкостей и газов (рефрактометр). Источником света служит ярко освещённая щель в непрозрачной перегородке  $D_1$ , находящейся в фокальной плоскости собирающей линзы  $Л_1$ . После неё через пару щелей; лучи проходят

сквозь трубки рефрактометра: одна из них с эталонным веществом, другая — с исследуемым. Затем лучи собираются линзой на экране, где формируется интерференционная картина. По сдвигу полос интерференции определяют показатель преломления вещества.

2) *Интерферометр Жамена.*

Интерферометр Жамена, наряду с интерферометром Рэлея, представляет собой одно из наиболее чувствительных интерференционных устройств, что позволяет использовать его для точного определения показателей преломления газов при давлении, близком к атмосферному (при этом давлении соответствующий по-



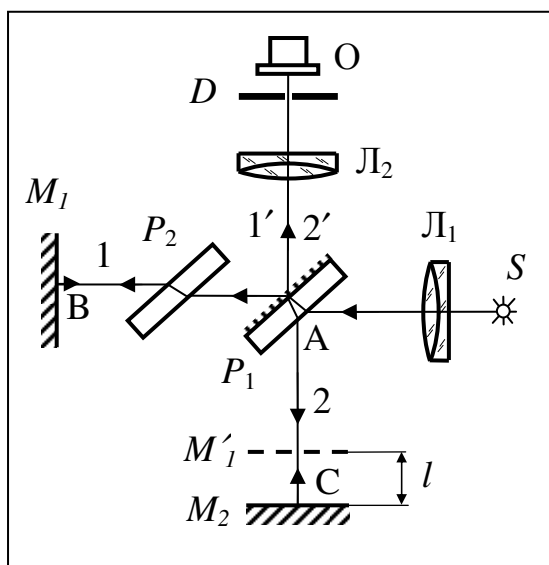
казатель преломления отличается от единицы в четвертом-пятом знаке после запятой).

Параллельный пучок света падает на плоскопараллельную стеклянную пластину  $M_1$ , на заднюю поверхность которой нанесено металлическое зеркало. Два отраженных пучка оказываются при достаточной толщине пластины пространственно разделенными, и направляются порознь в две кюветы с исследуемым газом и газом сравнения соответственно ( $n_1$  и  $n_2$ ). Прошедшие пучки отражаются от еще одной такой же стек-

ла. Два отраженных пучка оказываются при достаточной толщине пластины пространственно разделенными, и направляются порознь в две кюветы с исследуемым газом и газом сравнения соответственно ( $n_1$  и  $n_2$ ). Прошедшие пучки отражаются от еще одной такой же стек-

лянной пластины  $M_2$ . Таким образом, оба отраженных пучка оказываются равными по интенсивности, и сводятся в фокальной плоскости линзы  $L$ . В результате, возникает интерференционная картина из горизонтальных полос на экране  $\mathcal{E}$ . При этом при отсутствии по ходу распространения пучков объектов с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  нулевой максимум интерференционной картины лежит на оси системы. При варьировании давления воздуха полосы на экране смещаются.

### 3. Интерферометр Майкельсона.



Этот прибор сыграл очень важную роль в истории науки. С его помощью, например, было доказано отсутствие «мирового эфира».

Параллельный пучок света от источника  $S$ , прошедший через линзу, попадает на полупрозрачную пластинку  $P_1$ , где разделяется на пучки 1 и 2. После отражения от зеркал  $M_1$  и  $M_2$  и повторного прохождения через пластинку  $P_1$  оба пучка попадают в объектив  $O$ . Оптическая разность хода  $\Delta L = 2(AC -$

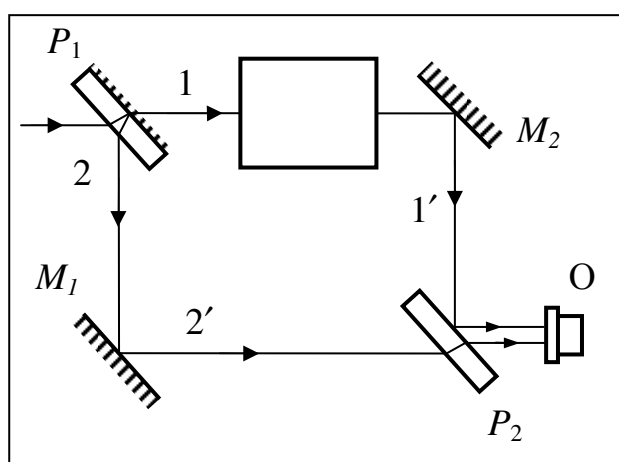
$AB) = 2l$ , где  $l$  — расстояние между зеркалом  $M_2$  и мнимым изображением  $M'_1$  зеркала  $M_1$  в пластинке  $P_1$ . Таким образом, наблюдаемая интерференционная картина эквивалентна интерференции в воздушной пластинке толщиной  $l$ . Если зеркало  $M_1$  расположено так, что  $M'_1$  и  $M_2$  параллельны, то образуются полосы равного наклона, локализованные в фокальной плоскости объектива  $O$  и имеющие форму концентрических колец. Если же  $M_2$  и  $M'_1$  образуют воздушный клин, то возникают полосы равной толщины, локализованные в плоскости клина  $M_2M'_1$  и представляющие собой параллельные линии.

Интерферометр Майкельсона широко используется в физических измерениях и технических приборах. С его помощью впервые была измерена абсолютная величина длины волны света, доказана независимость скорости света от движения Земли. Перемещая одно из зеркал интерферометра Майкельсона, получают воз-

возможность анализировать спектральный состав падающего излучения. На этом принципе построены Фурье-спектрометры, применяющиеся для длинноволновой инфракрасной области спектра (50—1000 мкм) при решении задач физики твёрдого тела, органической химии и химии полимеров, диагностики плазмы.

Интерферометр Майкельсона позволяет измерять длины с точностью 20-30 нм. Устройство используется и сегодня в астрономических, физических исследованиях, а также в измерительной технике. В частности, интерферометр Майкельсона лежит в основе оптической схемы современных лазерных гравитационных антенн. С

#### 4. Интерферометр Маха-Цендера.



Австрийский физик Эрнст Мах, крупный исследователь процессов аэродинамики, сконструировал специальный интерферометр с широкими пучками и большим расстоянием между зеркалами для съёмки ударных волн и скачков уплотнения воздушных потоков, обтекающих различные тела. Показатель преломления воздуха в

уплотнённом потоке выше, чем в невозмущённой среде. Это отражается на форме линий интерференции.