

## Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1. Интерференция света.....	4
2.2. Когерентность источников света.....	6
2.3. Интерференция в тонких плёнках.....	9
3. Экспериментальная часть.....	9
3.1. Приборы и принадлежности.....	13
3.2. Описание установки.....	13
3.3. Требования по технике безопасности.....	15
3.4. Порядок выполнения работы.....	16
4. Контрольные вопросы.....	18
Список литературы.....	18

# Лабораторная работа № 72

## Изучение интерференции света в клиньях

### 1. Цель работы

Наблюдение полос равной толщины и определение малого угла воздушного клина в зазоре между стеклянными пластинками по интерференционной картине полос равной толщины.

### 2. Теоретическая часть

#### 2.1. Интерференция света

Интерференция - одно из проявления волновых свойств света. Интерференция - частный случай сложения волн, при котором наблюдается устойчивая во времени картина перераспределения в пространстве энергии световых волн. Зрительно это проявляется в том, что возникают геометрические места (точки, линии, области) с минимальной и максимальной освещённостью, т.е. тёмные и светлые. На рис. 1 приведены интерференционные картины, полученные разными способами, и указаны области минимальной и максимальной освещенностей.

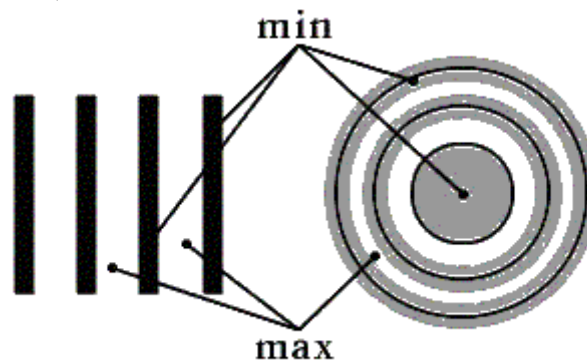


Рис. 1

До появления лазеров интерференция могла наблюдаться только при разведении и последующем сведении лучей, исходящих из одного и того же источника в разных приборах и установках. Из естественных проявлений интерференции света наиболее известно радужное окрашивание тонких плёнок (масляные плёнки на воде, мыльные пузыри, окисные плёнки на металлах), возникающие вследствие сложения волн, отражённых двумя поверхностями плёнки.

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

$$E_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (1)$$

$$E_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_2). \quad (2)$$

Для нахождения результирующей амплитуды воспользуемся графическим методом.

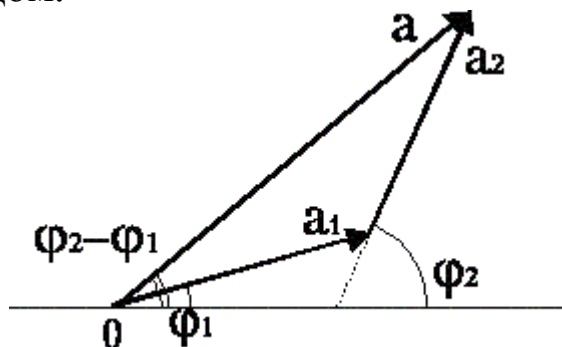


Рис. 2

Используя теорему косинусов можно записать:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (3)$$

и т.к.  $I \sim a^2$ , то

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (4)$$

Если разность фаз  $\delta = (\varphi_2 - \varphi_1)$  постоянна во времени ( $\delta = \text{const}$ ), то такие волны называются когерентными. Если волны некогерентны, то  $\delta$  непрерывно хаотически меняется, принимая с равной вероятностью любые значения.

Особенно отчётливо интерференция проявляется, когда интенсивности интерферирующих волн одинаковы:

$$I_1 = I_2 = I. \quad (5)$$

**1. В случае некогерентных волн**  $\delta$  меняется случайным образом с частотой порядка частоты света видимого диапазона ( $\nu \sim 10^{15}$  гц). Т.к. всякий фотоприёмник (в частности, человеческий глаз) обладает инерционностью, то он усреднит значение  $\cos \delta$ , но среднее значение  $\langle \cos \delta \rangle = 0$ . Поэтому для некогерентных волн

$$I = I_1 + I_2, \quad (6)$$

т.е. **при сложении некогерентных волн** происходит простое **сложение интенсивностей** световых волн во **всех** точках пространства.

**2. В случае когерентных волн**  $\delta = \text{const}$  и в зависимости от значения  $\delta$  будет наблюдаться либо увеличение, либо уменьшение интенсивности.

Рассмотрим случай когда  $a_1 = a_2$ , т.е.  $I_0 = I_1 = I_2$ .

В этом случае из (4) имеем

$$I = 2I_0 + 2I_0 \cos \delta, \quad (7)$$

$\cos \delta$  может принимать значения от  $+1$  до  $-1$  в зависимости от значения  $\delta$ :

а) пусть  $\cos \delta = -1$ ,

тогда  $I = 2I_0 - 2I_0 = 0$ , т.е. наблюдается ослабление (минимум).

Но  $\cos \delta = -1$  при  $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots (2k+1)\pi$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Обычно когерентные волны получают, разделяя одну волну на две. Поэтому начальные фазы колебаний в (1) и (2) равны, а разность фаз  $\delta$  возникает за счёт различных путей, проходимых лучами. Следовательно

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} r_1, \quad (8)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} r_2, \quad (9)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  - геометрические пути лучей. Проходимых ими от источника до точки, где они складываются,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - длины волн этих

лучей. Следует учесть, что  $\lambda = \frac{c}{n\nu}$ ,  $c$  - скорость света в вакууме,

$n$  - показатель преломления среды, в которой распространяется луч,  $\nu$  - частота света. При переходе света из одной среды в другую изменяется  $\lambda$  (т.к. изменяется скорость света), но  $\nu$  остаётся при этом неизменным.

Если оба луча распространяются в одной среде, то  $n_1 = n_2 = n$  и (8) и (9) будут

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{c} \nu r_1 n, \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{c} \nu r_2 n. \quad (11)$$

Учитывая, что  $\delta = (\varphi_2 - \varphi_1)$  окончательно получаем

$$\delta = 2\pi \frac{\nu}{c} (nr_2 - nr_1). \quad (12)$$

$\frac{v}{c} = \frac{1}{\lambda_0}$ , где  $\lambda_0$  - длина световой волны в вакууме. Откуда

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n r_2 - n r_1). \quad (13)$$

Величина  $n r$  называется оптическим путём, а  $(n r_2 - n r_1) = \Delta$  - оптической разностью хода лучей. Учитывая условие минимума

$$\Delta = (2k + 1) \pi, \quad (14)$$

получаем

$$(2k + 1)\pi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (15)$$

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

Итак, условием минимума при интерференции когерентных лучей является

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda_0}{2}. \quad (16)$$

Для минимума оптическая разность хода интерферирующих лучей равна **нечётному** числу полуволн.

б) пусть  $\cos \delta = +1$ ,

тогда из (7) имеем  $I = 2I_0 + 2I_0 = 4I_0$ , т.е. наблюдается усиление (максимум), но  $\cos \delta = +1$  при  $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, 2k\pi$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  проводя рассуждения аналогичные п. а) можно получить условие максимума

$$\Delta = 2k \frac{\lambda_0}{2}. \quad (17)$$

Для максимума оптическая разность хода интерферирующих лучей равна **чётному** числу полуволн.

Таким образом, **при сложении когерентных волн** происходит **сложение амплитуд** волн с учётом разности их фаз, что приводит к **увеличению** интенсивности света **в одних точках** пространства и **уменьшению в других**.

## 2.2. Когерентность источников света

Опыт показывает, что, взяв естественные источники света, интерференцию получить нельзя. Это связано с тем, что все естественные источники света являются некогерентными.

Объясняется это тем, что излучение естественных источников складывается из излучений многих атомов. Отдельный атом испускает отдельные цуги волн длительностью  $\tau \sim 10^{-8} - 10^{-9}$  с длиной ( $\sim 10 \div 100$  мкм). Фаза колебаний одного цуга никак не связана с фазой колебаний другого, т.е. меняется случайным образом. Т.о. волна от одного источника, состоящего из множества цугов, с течением времени меняется. Аналогично фаза колебаний от другого источника также меняется случайным образом с течением времени. Результатом является то, что разность фаз между волнами от естественных источников с течением времени изменяется  $\delta(t) = \Phi_2(t) - \Phi_1(t)$ , при этом  $I = I_1 + I_2$ .

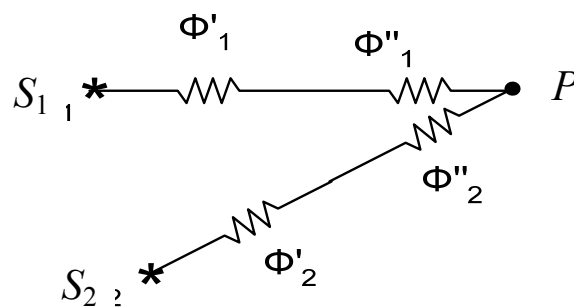


Рис. 3

Когерентные световые волны можно получить, разделяя одну световую волну на 2 части, каждая из которых проходит свой оптический путь  $L_1$  и  $L_2$ .

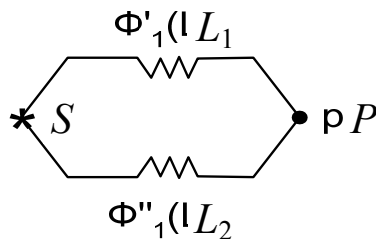


Рис. 4

В этом случае в каждый момент времени будут складываться волны одного цуга, и разность фаз будет определяться только оптической разностью хода  $\Delta$

$$\delta = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot \Delta. \quad (18)$$

При этом следует иметь в виду, что  $\Delta$  не может быть очень большой ( $\Delta = L_2 - L_1$ ),  $\Delta \sim 10 \div 100$  мкм. В противном случае в точку волна 1-ая придет намного раньше, чем 2-я, т.е. они не встретятся и интерференционная картинка не получится.

Максимальное значение  $\Delta$ , при котором еще происходит интерференция, называется длиной когерентности.

Когерентными являются волны, у которых:

1.  $\omega_1 = \omega_2$  или  $\nu_1 = \nu_2$ ,
2.  $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ ,
3.  $\mathbf{E}_1 \parallel \mathbf{E}_2$ .

Условие 3 означает, что колебания должны быть одинаково направлены, т.е. интерферирующие лучи должны быть поляризованы в одной плоскости.

### 2.3. Интерференция в тонких пленках

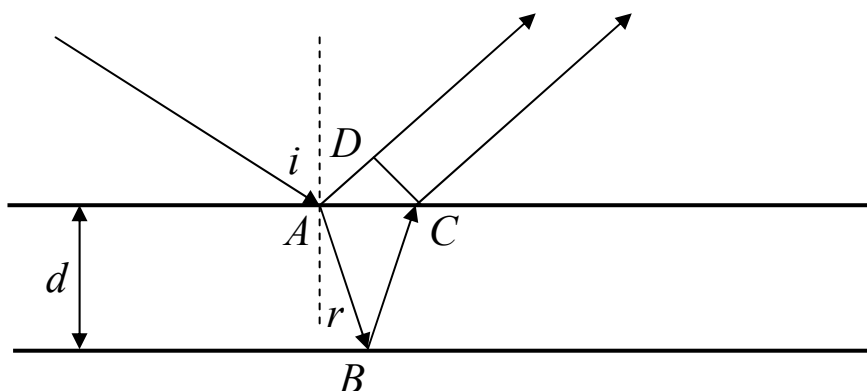


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что оптическая разность хода  $\Delta$  между отражёнными лучами будет:

$$\Delta = (AB + BC) n - AD,$$

где  $n$  – показатель преломления вещества плёнки (считается, что плёнка находится в воздухе, для которого  $n = 1$ )

$$AB = BC = \frac{d}{\cos r},$$

$$AD = AC \sin i = (2d \cdot \operatorname{tg} r) \sin i.$$

Учитывая закон преломления:

$$\sin i = n \sin r \Rightarrow$$

$$\Delta = \frac{2dn}{\cos r} (1 - \sin^2 r) = 2dn \cos r. \quad (19)$$

Т.о. оптическая разность хода:

$$\Delta = 2dn\sqrt{1 - \sin^2 r}, \quad (20)$$

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 r}. \quad (21)$$

При отражении световой волны от оптически более плотной среды фаза колебаний меняется на  $\pi$ . Учитывая связь между оптической разностью хода и разностью фаз  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$  оптическая

разность хода изменяется при этом на  $\frac{\lambda}{2}$ . На приведенном рисунке,

1-ая волна отражается от более плотной среды в точке  $A$ , а вторая – от менее плотной. Рассмотрим случай, когда по разные стороны плёнки находятся различные среды. Например, плёнка на подложке: масло – на стекле (рис. 6). В этом случае оптическая разность хода между отражёнными лучами будет

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}. \quad (22)$$

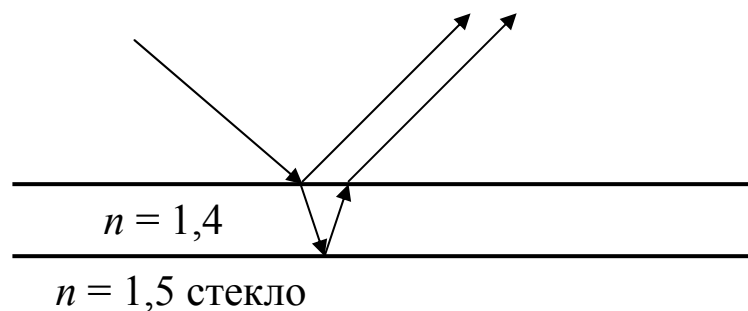


Рис. 6

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}. \quad (23)$$

Интерференцию можно наблюдать как в отражённом свете, так и в проходящем свете (т.е. на просвет)

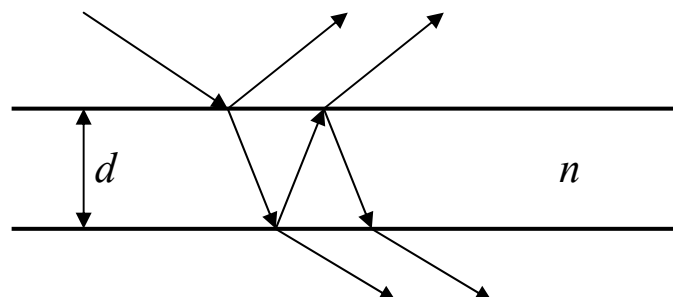


Рис.7



В этом случае

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}. \quad (24)$$

При интерференции в тонких пленках наблюдается следующая картина:

1. Линии равного наклона

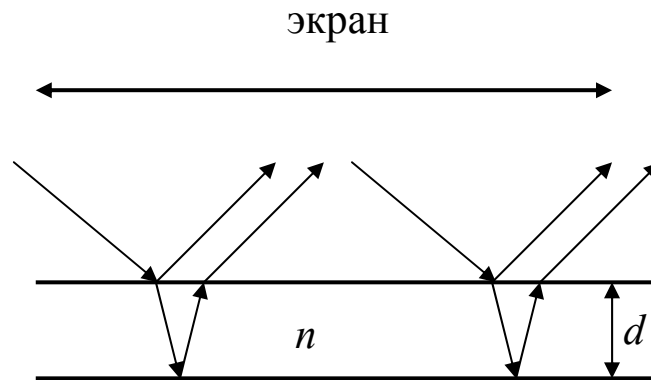


Рис. 8

Если  $n, d, i$  таковы, что

$\Delta = 2n\frac{\lambda}{2}$ , то будет наблюдаться max, если  $\Delta = 2(n+1)\frac{\lambda}{2}$ , то min.

Если на пленку падает рассеянный свет, то для одних углов будет max, для других min и картина на экране будет представлять собой чередования светлых и темных полос. Если падает белый свет, то будет радужная окраска.

2. Линии равной толщины.

Пусть пленка имеет форму тонкого клина.

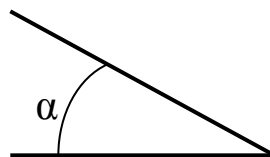


Рис. 9

(угол преломления  $\alpha \sim 1''$ ), т.е. поверхности пленки почти параллельны, тогда

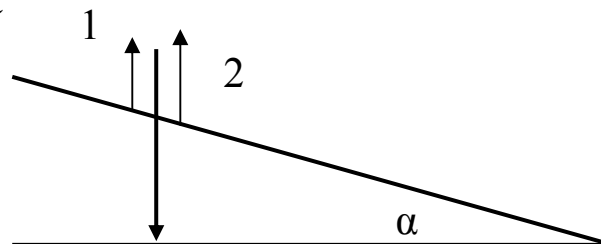


Рис. 10

На рис. 11 показан ход лучей в клине в отражённом свете для двух соседних светлых (например) полос при нормальном падении лучей на поверхность клина

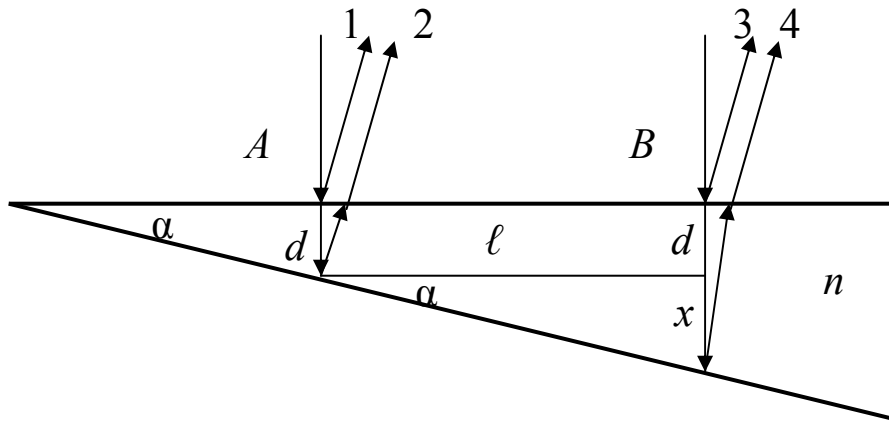


Рис.11

Здесь  $\ell$  – расстояние между соседними светлыми полосами на поверхности клина,  $\alpha$  – угол клина,  $n$  – показатель преломления вещества клина (в данной работе клин воздушный и  $n = 1$ ),  $d$  – толщина клина в точке  $A$ ,  $x$  – увеличение толщины клина в точке  $B$  по сравнению с точкой  $A$  (на рисунке ход лучей показан условно). Оптическая разность хода между лучами 1 и 2  $\Delta_1$  и 3 и 4  $\Delta_2$  будет:

$$\Delta_1 = 2 d n - \lambda/2 = 2 k \lambda \quad (\text{условие максимума в точке } A),$$

$$\Delta_2 = 2(d + x)n - \lambda/2 = 2(k + 1)\lambda \quad (\text{условие максимума в точке } B),$$

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2 x n = \lambda. \quad (25)$$

Считая угол  $\alpha$  малым и рассматривая  $x$  как дугу окружности радиуса  $\ell$ , можно записать:

$$x = \ell \alpha, \quad (26)$$

откуда

$$2 n \alpha \ell = \lambda \quad (27)$$

и

$$\alpha = \lambda/2 n \ell. \quad (28)$$

Положение темных полос будет определяться из условия:

$$2dn + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}; \quad d_m = \frac{\lambda}{2n} m. \quad (29)$$

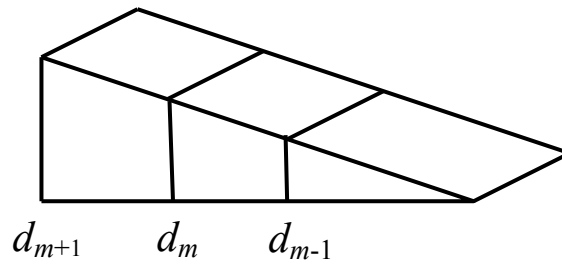


Рис.12

Т.о. в отраженном свете на поверхности клина будет наблюдаться чередование светлых и темных полос, параллельных ребру клина. Ширина интерференционной полосы  $\ell$  (расстояние между соседними полосами) при углах падения близких к нулю находится по формуле

$$\ell = \frac{\lambda}{2\alpha}, \quad (30)$$

где  $\alpha$  – угол при вершине клина (в рад).

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Приборы и принадлежности

- оптический квантовый генератор с блоком питания
- основание с держателями
- экран с расширителем луча лазера
- клин в держателе
- экран

#### 3.2. Описание установки

Общий вид установки показан на рис. 13. В состав установки входят:

- 1÷3. Основание (состоит из трёх частей).
4. Лазер полупроводниковый в юстировочном модуле.
5. Модуль юстировочный вертикальный (в данной работе не используется).
6. Экран малый с отверстием и расширителем луча лазера (линза).
7. Держатель с клином.
8. Экран.

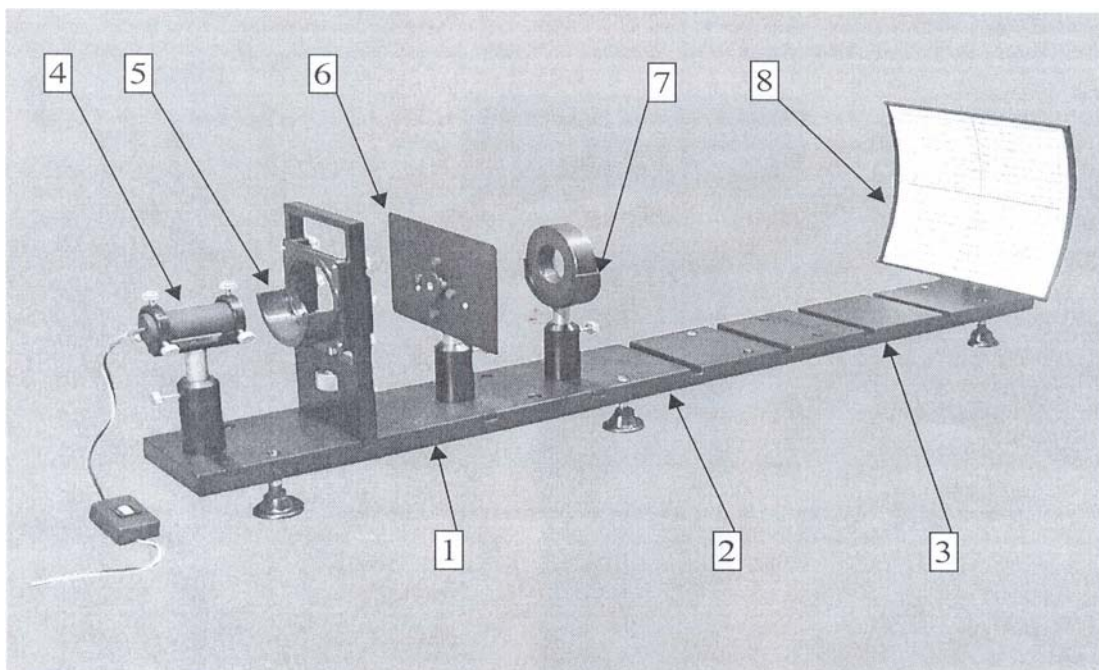


Рис.13

Основой установки служит разборное основание (состоит из трёх частей), на одном конце которого установлен оптический квантовый генератор (лазер), служащий источником монохроматического излучения. В данной работе используется полупроводниковый лазер STL 650 (длина волны излучения  $\lambda = 650\text{нм}$ , мощность лазерного излучения  $P = 3\text{мВт}$ ). На противоположном конце основания расположен экран с делениями, на котором наблюдается интерференционная картина. Между экраном и лазером на основании установлены держатели с расширителем луча и оптический клин, образованный двумя плоскими стеклянными пластинками (клин воздушный). Блок-схема установки показана на рис. 14, а её оптическая схема – на рис. 15.

Пучок лучей, испускаемый полупроводниковым лазером 1, расширяется с помощью микрообъектива 2, закреплённого в оправе на экране с отверстием 3, и освещает интерференционный объект 4. Картина интерференции наблюдается на экране 5. Ширина интерференционных полос  $B$  на экране измеряется в мм с помощью масштабной сетки на экране.

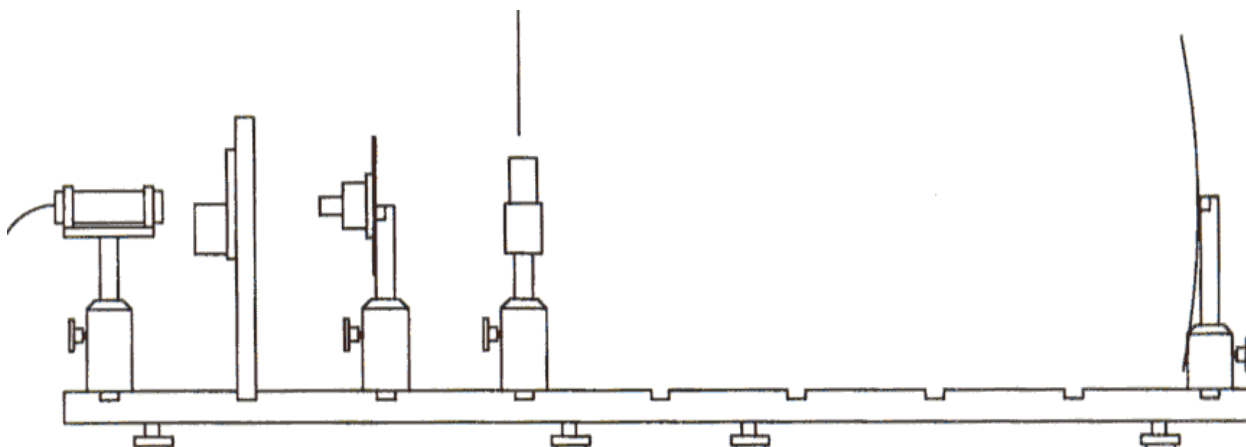


Рис. 14

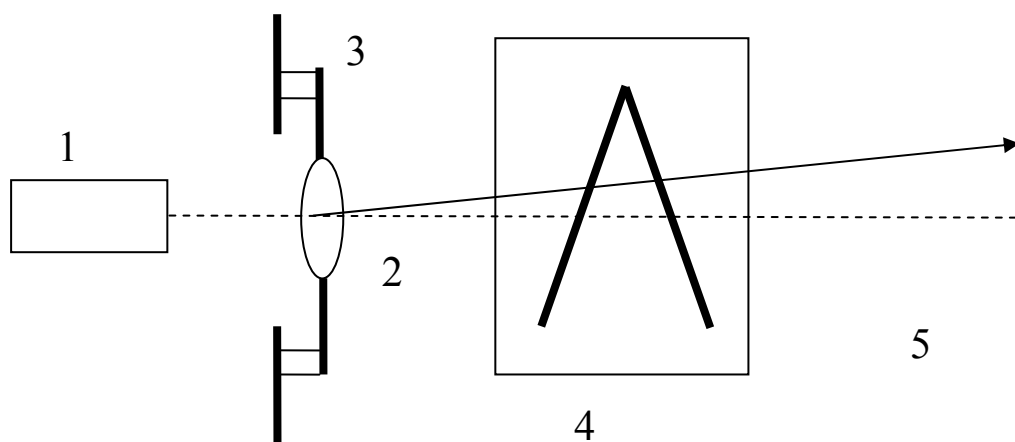


Рис. 15

Вид наблюдаемых на экране полос равной толщины показан на рис. 16.

### 3.3. Требования по технике безопасности

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием.
2. Не направлять луч лазера в глаза.
3. Не загромождать рабочее место посторонними предметами.
4. По окончании работы выключить установку и отсоединить сетевой шнур от розетки.
5. Привести в порядок рабочее место.

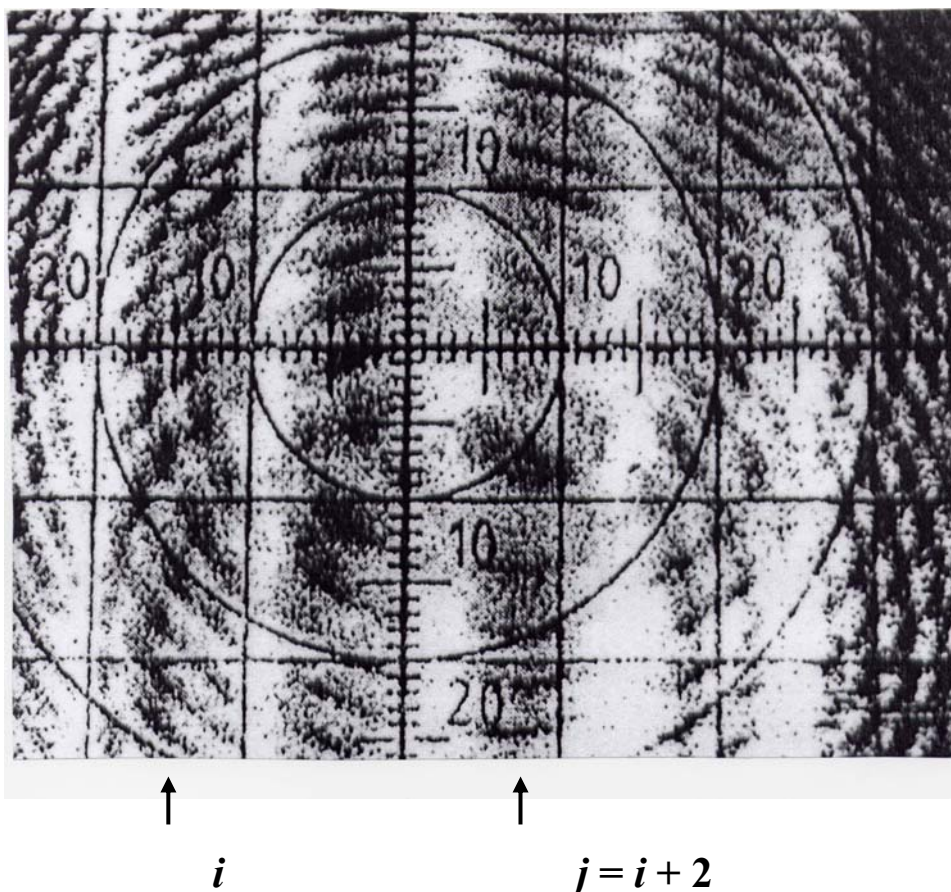


Рис.16

На рис. 16  $X_i = -10$  мм,  $X_j = +9$  мм,  $i$ -ая – произвольная интерференционная полоса.

### 3.4. Порядок выполнения работы

1. Включить полупроводниковый лазер. *При необходимости* вращением юстировочных винтов направить луч лазера по центру отверстия в экране.

2. Небольшим поворотом винтов в держателе клина отрегулировать толщину зазора между стеклянными пластинками в объекте (*делать эту операцию без необходимости не следует, в противном случае проводить её только под наблюдением преподавателя*). **ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается затягивать винты, т.к. это может привести к появлению сколов на пластинках.** Вращение винта должно быть плавным без дополнительных усилий в конечном положении. Для появления клиновидного зазора следует ослабить 1 или 2 винта.

3. Измерить координаты максимумов интерференционных полос не менее трёх соседних порядков. Координаты следует измерять с

точностью не менее  $\pm 1$  мм. Полученные данные занести в таблицу.

Таблица

максимум $i, j$	Линейные координаты полос		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$

4. Для каждой пары полос период полос вычислить по формуле

$$B_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i}$$

(в приведённом на рис. 16 примере  $X_i = -10$  мм и  $X_j = 9$  мм,  $j - i = 2$ ) и усреднить результаты. Полученное среднее значение использовать для расчёта угла воздушного клина.

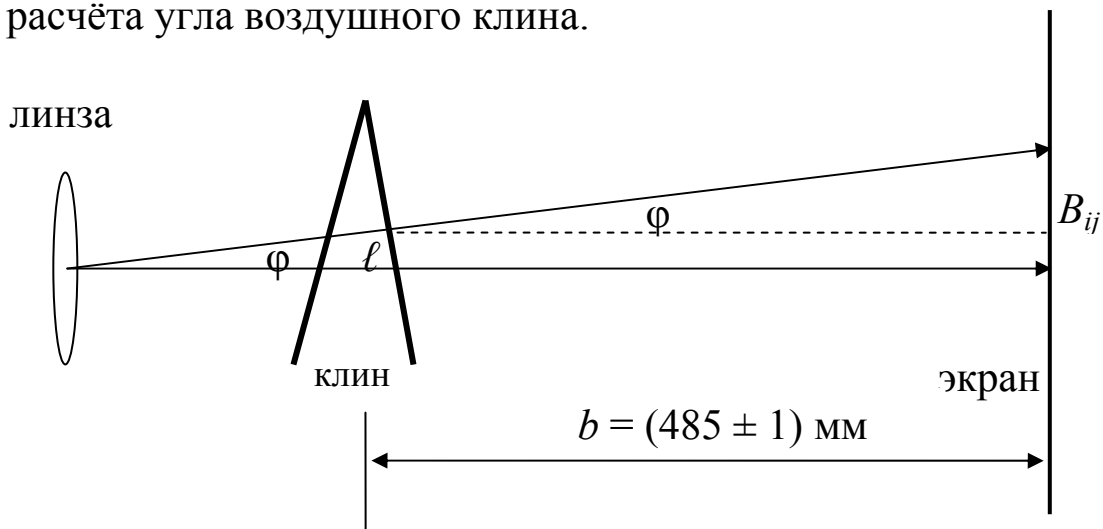


Рис. 17

Из рис. 17 видно, что  $\ell + b \operatorname{tg} \varphi = B_{ij}$ .

В данной установке  $\varphi = 3,4^\circ$ . Откуда  $\ell = B_{ij} - b \operatorname{tg} \varphi$ .

По этой формуле вычислить  $\ell$  и далее по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{2\ell}.$$

Определить угол клина  $\alpha$

5. Оценить погрешность определения угла.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. В чём заключается явление интерференции света?
2. Что такое корпускулярно-волновой дуализм свойств света?
3. В каких явлениях проявляется волновая, а в каких корпускулярная природа света?
4. Что такое когерентные волны?
5. Какие и почему накладываются ограничения на оптическую разность хода интерферирующих лучей?
6. Какие ограничения накладываются на оптическую разность хода интерферирующих лучей?
7. Объясните возникновение полос равного наклона и равной толщины.
8. Выведите формулу для расчёта угла клина по полосам равной толщины.
9. Как и во сколько раз изменяется расстояние между полосами равной толщины при заполнении воздушного клина водой ( $n = 1,33$ )?

#### **Список литературы**

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книга 4. – М.: Наука, 1998.
2. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2002.
3. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М.: Наука, 1976.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2004.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 2002.