

# Физика

## Расчетно-графическое задание

### «Интерференция света»

*Интерференцией называется взаимодействие волн, приходящих в одну область пространства, сопровождающееся устойчивым во времени взаимном усилении колебаний в одних точках среды и ослаблении в других.*

Для наблюдения интерференции взаимодействующие волны должны быть когерентными.

*Когерентными называются волны, имеющие одинаковую частоту, одинаковое направление колебаний и не меняющуюся во времени разность фаз в данной точке пространства.*

#### 1. Опыт Юнга

В опыте Юнга свет сквозь узкую щель падает на две узкие равноудаленные щели, световые волны от которых являются когерентными. На экране наблюдается интерференционная картина (рис.1).

Схема опыта представлена на рис. 1. Волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  попадают в точку  $P$  на экране с разностью хода  $\Delta$ . Расстояние между источниками  $d$ , расстояние от источника до экрана  $l$ .  $x_m$  – расстояние от центра интерференционной картины до полосы  $m$ - порядка. Их простых геометрических соотношений получим: так как

$$\theta \ll 1 \Rightarrow \Delta = d \cdot \theta$$

$$\Delta = \frac{d \cdot x_m}{l} = m\lambda \quad \Delta_{\max} = m\lambda \quad x_m = \frac{m\lambda l}{d}$$

При переходе к соседнему максимуму  $m$  меняется на единицу и  $x$  на величину  $\Delta x$ . Ширина интерференционной полосы:

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m \quad \Delta x = \frac{\lambda l}{d}$$

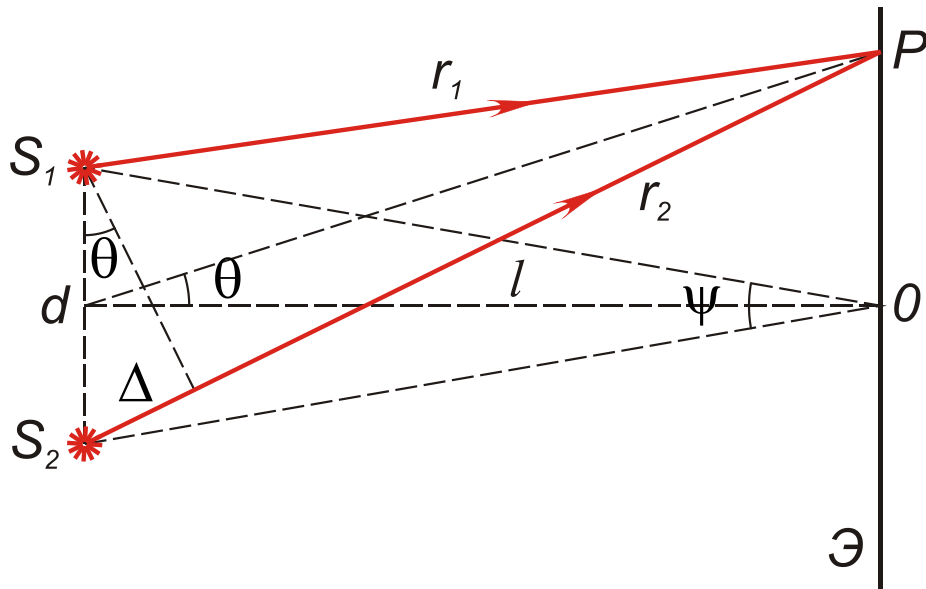


Рис.1

### Пример

Расстояние между двумя когерентными источниками равно 0,9 мм. Источники, испускающие монохроматический свет с длиной волны 640 нм расположены на расстоянии 3,5 м от экрана. Определить число светлых полос, располагавшихся на 1 см длины экрана.

Дано:

$$\lambda = 640 \text{ нм} = 64 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

$$d = 0,9 \text{ мм} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$L = 3,5 \text{ м}$$

---


$$\frac{\kappa}{x} = ?$$

Решение. В точке O на экране (рис. 3) будет максимальная освещенность: точка O равноудалена от обоих источников  $S'_1$  и  $S'_2$ , поэтому разность хода волн,  $S'_1 O$  и  $S'_2 O$  равна нулю. В произвольной точке экрана P максимум освещенности будет наблюдаться, если оптическая разность хода когерентных волн равна целому числу длин волн:

$$\Delta = S_2 - S_1 = \kappa \lambda, \quad (1)$$

где  $S_2, S_1$  – оптические пути интерферирующих волн;  $\lambda$  – длина волны падающего света;  $\kappa$  – номер светлой полосы (центральная светлая полоса принята за нулевую). Оптическая разность хода волн  $\Delta = xd/L$ , где  $x$  – расстояние от центральной светлой полосы до  $\kappa$ -й светлой полосы.

Учитывая выражение (1), получим:

$$\Delta = \frac{xd}{L} = \kappa \lambda \quad (2)$$

Из выражения (2) определяем искомую величину  $\frac{\kappa}{x}$  – число светлых интерференционных полос на 1 см длины:

$$\frac{\kappa}{x} = \frac{d}{L\lambda}$$

Подставим в это выражение числовые значения и получим:

$$\frac{\kappa}{x} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{3,5 \cdot 64 \cdot 10^{-8}} = 400 \text{ м}^{-1},$$

откуда  $\frac{\kappa}{x}$  на 1 см равно 4.

### Задание 1

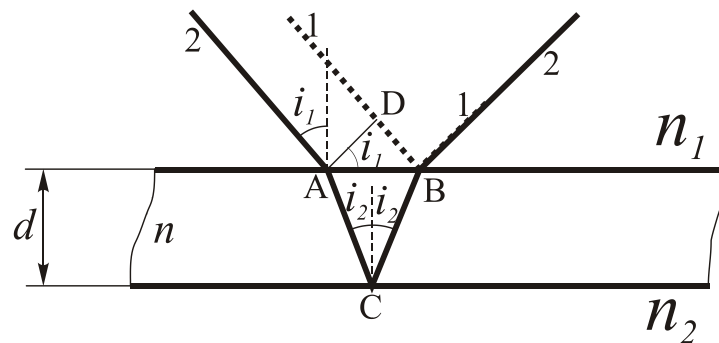
В опыте Юнга расстояние между щелями равно  $d$ , длина волны света  $\lambda$ . На расстоянии  $L$  от щелей расположен экран. Найти ширину интерференционной полосы  $\Delta x$ . Построить графики зависимости ширины интерференционной полосы от расстояния от источника до экрана в диапазоне от 1 м до 6 м и графики зависимости ширины интерференционной полосы от расстояния между источниками в диапазоне 0,1 мм до 1,5 мм.

Таблица 1

№ вар.	d, мм	L, м	$\lambda$ , мкм	$\Delta x$ мм
1	1	3	0,4	?
2	0,9	2	0,5	?
3	1,1	4	0,55	?
4	0,8	3,5	0,6	?
5	1	3,7	0,65	?
6	0,9	2,8	0,7	?
7	0,7	2,5	0,72	?
8	1	3	0,74	?
9	1,1	4,1	0,45	?
10	1	2,9	0,6	?
11	1	3,1	0,4	?
12	0,9	2	0,5	?
13	1,1	4	0,5	?
14	0,8	3,55	0,6	?
15	1,1	3,72	0,64	?
16	0,9	2,4	0,7	?
17	0,75	2,5	0,72	?
18	1	3,2	0,73	?
19	1,1	4,1	0,45	?
20	1	2,9	0,6	?
21	1,1	2,9	0,65	?
22	1	3,2	0,45	?
23	1,1	2,3	0,5	?
24	1	2	0,55	?

## 2.Интерференция в тонких пленках

Когерентные волны могут быть получены разделением луча естественного света при его отражении и преломлении. Практически такой случай реализуется при отражении света лицевой и тыльной поверхностями тонкой пленки. Ход лучей при отражении от тонкой пленки показан на рис. 4.9. Рассмотрим интерференцию лучей 1 и 2, падающих на пленку. Луч 1 отражается в точке В от лицевой поверхности пленки. Луч 2 проходит в точке А в пленку, в точке С отражается от тыльной поверхности пленки и выходит из пленки в точке В параллельно лучу 1. Из геометрических



соображений оптическая разность хода между лучами  $\Delta_1$  равна:

Рис. 2

$$\Delta_1 = n \cdot AC + n \cdot BC - DB, \quad (1)$$

где  $DB$  – длина отрезка от точки В, до перпендикуляра, опущенного из точки А на луч 1. Легко показать, что выражение (1) преобразуется к виду:

$$\Delta_1 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}, \quad (2)$$

где  $d$  – толщина пленки;  $i_1$  – угол падения света. В частном случае нормального падения света ( $i_1 = 0$ ) формула (2) упрощается.

$$\Delta_1 = 2nd. \quad (3)$$

Оптическая разность хода  $\Delta_1$ , которую мы определили только из геометрических соображений, равна двойной оптической толщине пленки при нормальном падении света.

Однако, кроме того, надо учесть, что при отражении света от оптически более плотной среды происходит скачок фазы луча на  $\pi$ . Оптически более плотной средой называется среда с бóльшим показателем преломления. В рассмотренном нами случае пленка – оптически более плотная по отношению к воздуху среда. Итак, если пленка с показателем преломления  $n_2 > 1$  находится в воздухе ( $n_1 = n_3 = 1$ ), то при отражении луча 1 в точке  $B$  волна меняет фазу на  $\pi$  (т.к.  $n_2 > n_1$ ). Луч 2 отражается в точке  $C$  от оптически менее плотной среды ( $n_3 < n_2$ ) и скачки фазы не испытывает. Это приводит к тому, что из-за разных условий отражения на первой и второй поверхностях раздела между лучами возникает добавочная разность фаз, равная  $\pi$ . Эта добавочная разность фаз может быть учтена введением добавочной разности хода

$$\Delta_2 = -\frac{\lambda_0}{2}.$$

Тогда окончательное выражение для оптической разности хода лучей 1 и 2 будет иметь вид:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda_0}{2} \quad (4)$$

Для случая нормального падения света ( $i_1 = 0$ )

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda_0}{2}. \quad (5)$$

Такое появление добавочной разности хода в половину длины волны называется **потерей полуволны**.

Отметим, что если с разных сторон пленки находятся различные среды, то условия отражения на обеих поверхностях могут быть и одинаковыми. Например, если  $n_1 < n_2 < n_3$ , скачок фазы имеет место как на первой поверхности, так и на второй поверхности пленки. Если  $n_1 > n_2 > n_3$ , то скачка фазы нет на обеих поверхностях. В обоих этих случаях дополнительная разность фаз лучей 1 и 2 не возникает, и член  $\lambda_0/2$  в формулах (4.23) и (4.24) отсутствует ( $\Delta_2 = 0$ ).

Плѐнка дает максимальную интенсивность отражѐнных лучей с длиной волны  $\lambda_0$ , если оптическая разность хода  $\Delta$  этих лучей отвечает условию максимума:

$$\Delta = \Delta_{\max} = m\lambda_0.$$

Отметим, что в этом случае прошедший сквозь плѐнку свет имеет наименьшую интенсивность (что следует из закона сохранения энергии).

Если оптическая разность хода  $\Delta$  лучей 1 и 2, отраженных плѐнкой, отвечает условию минимума на длине волны  $\lambda_0$  ( $\Delta = \Delta_{\min} = \frac{\lambda_0}{2}(2m + 1)$ ), то интенсивность света с длиной волны  $\lambda_0$ , отраженного плѐнкой, будет наименьшей. Это одновременно соответствует максимуму пропускания плѐнкой света  $\lambda_0$ . При интерференции в плѐнке происходит перераспределение световой энергии между отражѐнным и преломлѐнным лучами с зависимости от соотношения между длиной волны света с одной стороны и толщиной плѐнки и её показателем преломления с другой. Этот факт используется при применении интерференции в тонких плѐнках на практике.

Если освещать тонкую плѐнку монохроматическим светом, то интенсивность отраженного от плѐнки света зависит от толщины плѐнки по достаточно простому закону. Таким образом, измеряя интенсивность

отражённого света можно контролировать толщину тонких плёнок бесконтактным способом.

Интерференцией определяются цвета тонких плёнок при их освещении белым светом, так как на одних длинах волн у отражённых лучей – максимум, на других – минимум. При известном показателе преломления по цвету прозрачной плёнки можно определить её толщину (это используется, например, в микроэлектронике). Неравномерность окраски прозрачной плёнки свидетельствует о неравномерности её толщины.

Интерференция используется и при “просветлении” оптики. Просветление достигается нанесением на оптические элементы (линзы, призмы и т.д.) тонкой плёнки из материала с показателем преломления  $n_2 = \sqrt{n_1 \cdot n_3}$  ( $n_1 = 1$  – воздух,  $n_3 = 1,5 \div 1,8$  – стекло). Это приводит к уменьшению интенсивности отражённых лучей, т.е. уменьшению потерь света на гранях оптических элементов. Длина волны  $\lambda_0$ , на которую рассчитывается просветляющее покрытие, обычно соответствует максимальной чувствительности глаза человека ( $\lambda_0 = 0,55$  мкм).

## Пример 2

Для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,26 меньшим, чем у стекла (просветление оптики). При какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной волны 0,55 мкм не будет наблюдаться, если угол падения лучей  $30^0$ ?

Дано:

$$n = 1,26$$

$$\lambda = 0,55 \text{ мкм} =$$

$$5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$i_1 = 30^0$$

---

$$d = ?$$

$$n_2 > n_1$$

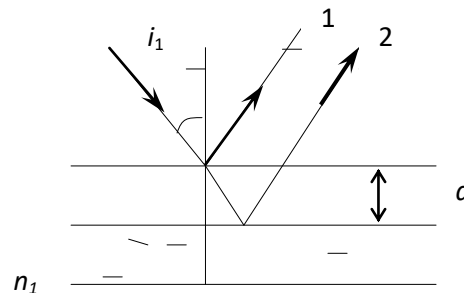


Рис. 2

Решение. Оптическая разность хода лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки (рис. 2), равна

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \quad (1)$$

где  $d$  – толщина пленки;  $n$  – показатель преломления пленки;  $i_1$  – угол падения лучей.

В выражении (1) учтено, что отражение лучей на верхней и нижней поверхностях пленки происходит от оптически более плотной среды и поэтому потери полуволны в обоих случаях компенсируют друг друга.

Условие интерференционного минимума

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Из (1) и (2) находим:

$$d_k = \frac{(2k + 1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \quad (3)$$

Полагая  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ , получим ряд возможных значений толщины пленки. Минимальная толщина пленки будет при  $k = 0$ .

Подставим в расчетную формулу (3) числовые значения входящих величин:  $n = 1,26$ ;  $\lambda = 0,55 \text{ мкм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $i_1 = 30^\circ$ ;  $k = 0$ .

Произведем вычисления:

$$d = \frac{5,5 \cdot 10^{-7}}{4\sqrt{(1,26)^2 - \sin^2 30^\circ}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,12 \text{ мкм} .$$

## Задание 2

С целью уменьшения потерь света на отражение на стекло с показателем преломления  $n_2$  наносят тонкую пленку двуокиси кремния толщиной  $d$  и показателем преломления  $n_1$ . Из воздуха на пленку падает монохроматический свет длиной волны  $\lambda$  под углом  $i$  к поверхности.

Найти наименьшую толщину пленки, обеспечивающую эффект просветления. Построить график зависимости толщины пленки от угла падения света в диапазоне от 0 до 90 градусов и от показателя преломления пленки в диапазоне 1,4 – 1,8. Сделать рисунок хода лучей.

Таблица 2

№ вар.	$i, ^\circ$	$n_1$	$n_2$	$\lambda, \text{МКМ}$	$d_{min}$
1	30	1,4	1,7	0,4	?
2	35	1,45	1,7	0,45	?
3	40	1,5	1,7	0,6	?
4	45	1,55	1,7	0,55	?
5	60	1,4	1,7	0,65	?
6	65	1,5	1,7	0,43	?
7	30	1,45	1,7	0,5	?
8	45	1,55	1,7	0,7	?
9	60	1,5	1,7	0,76	?
10	32	1,45	1,75	0,45	?
11	40	1,5	1,7	0,6	?
12	45	1,55	1,71	0,55	?
13	60	1,4	1,65	0,65	?
14	65	1,5	1,6	0,43	?
15	30	1,45	1,63	0,5	?
16	45	1,55	1,65	0,71	?
17	60	1,5	1,67	0,7	?
18	35	1,45	1,66	0,44	?
19	35	1,4	1,63	0,51	?
20	65	1,55	1,75	0,42	?
21	60	1,45	1,65	0,64	?
22	35	1,45	1,77	0,5	?
23	30	1,45	1,75	0,4	?
24	60	1,43	1,7	08	?

### Вопросы для самопроверки:

1. Что такое интерференция света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Запишите условие максимума и минимума интерференции.
4. Назовите способы получения интерференционной картины.
5. Что такое просветление оптики?
6. Как меняется фаза отраженной электромагнитной волны при её отражении от оптически более плотной среды?
7. Свет, падая на границу раздела двух сред, испытывает полное внутреннее отражение. Запишите соотношения между показателями преломления сред  $n_1$   $n_2$  и скоростями света  $v_1$  и  $v_2$ .
8. Что такое оптическая разность хода?
9. Скорость электромагнитной волны в вакууме  $c$  связана с электрической  $\epsilon_0$  и магнитной  $\mu_0$  постоянными соотношением...
10. Если расстояние между источниками уменьшить в 2 раза, то как и во сколько раз изменится ширина полосы при интерференции от этих источников при прочих равных условиях...
11. Найти минимальную толщину просветляющего покрытия пленки с показателем преломления  $n$  для света длиной волны  $\lambda$ .