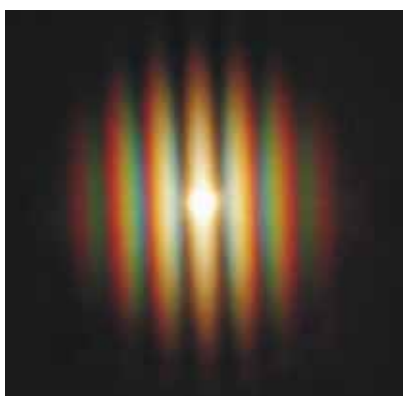


Физический Практикум

ОПТИКА

Л.И. Голубенцева
О.А. Перепелицына
В.П.Рябухо

**Изучение эффекта
проявления пространственной когерентности света
в интерференционной схеме Юнга**



Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Физический факультет
Кафедра оптики и биомедицинской физики

Л.И. Голубенцева, О.А. Перепелицына, В.П. Рябухо

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПРОЯВЛЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ СВЕТА
В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СХЕМЕ ЮНГА**

Руководство к лабораторным работам
по курсу общей физики, часть IV Оптика,
раздел «Интерференция и дифракция света»

Под редакцией профессора В.П.Рябухо

Саратов
2006

Цель работы: изучение явления интерференции частично когерентного света протяженного источника; изучение эффектов проявления поперечной пространственной когерентности света в интерференционном эксперименте; экспериментальное определение радиуса пространственной когерентности излучения теплового источника света.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Степень согласованности колебаний, возбуждаемых световой волной, называется в оптике когерентностью света. Если рассматривают колебания в одной точке пространства, но с некоторым взаимным временным запаздыванием, то говорят о временной когерентности света. Если рассматривают одновременные колебания в двух точках пространства, одинаково удаленных от источника света, то это поперечная пространственная когерентность. В настоящей работе изучается именно этот вид когерентности света. Наиболее наглядно когерентность света проявляется при интерференции волн.

Схема Юнга

Проявление поперечной пространственной когерентности света в явлении интерференции обычно рассматривается на примере интерференционной схемы Юнга [1-5]. Его классическая постановка с использованием экрана с двумя узкими щелями представлена на рис.1.

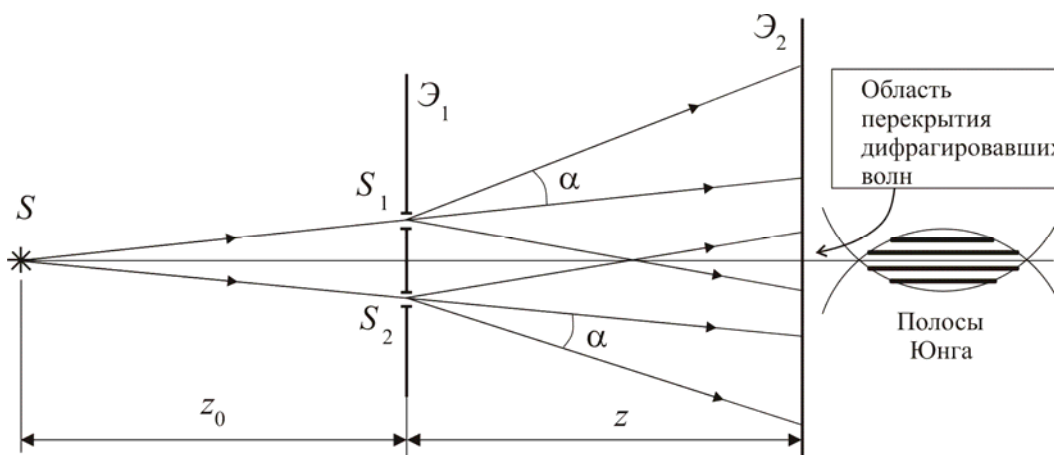


Рис.1. Классическая интерференционная схема Юнга с частичным перекрытием дифрагировавших пучков света.

Свет от источника света S падает на два небольших отверстия S_1 и S_2 в экране \mathcal{E}_1 , расположенных рядом и находящихся на равном расстоянии от источника S . Эти отверстия действуют как вторичные квазиточечные источники света, которые

порождаются одной и той же первичной волной. Интерференция вторичных квазисферических волн, исходящих от отверстий S_1 и S_2 , наблюдается на экране \mathcal{E}_2 в области перекрытия световых пучков.

Поскольку отверстия S_1 и S_2 не могут быть слишком малыми из-за энергетических потерь света, то световые волны, дифрагированные на отверстиях, имеют малый угол расходимости α , определяемый соотношением $\alpha \approx \lambda/b$, где λ - длина волны света, b – размер отверстия [1-5]. Поэтому область перекрытия и интерференции волн на экране \mathcal{E}_2 имеет ограниченные размеры. Для увеличения этой области экран \mathcal{E}_2 отодвигают на большое расстояние z в дальнюю область дифракции [1-5]. Это приводит к дополнительному уменьшению интенсивности света на экране \mathcal{E}_2 . Эти потери в некоторой степени компенсируются использованием в качестве отверстий S_1 и S_2 узких, но длинных щелей.

Рассмотрим интерференцию, возникающую в результате выделения с помощью отверстий S_1 и S_2 двух участков волнового фронта излучения от квазиточечного источника S (рис.2).

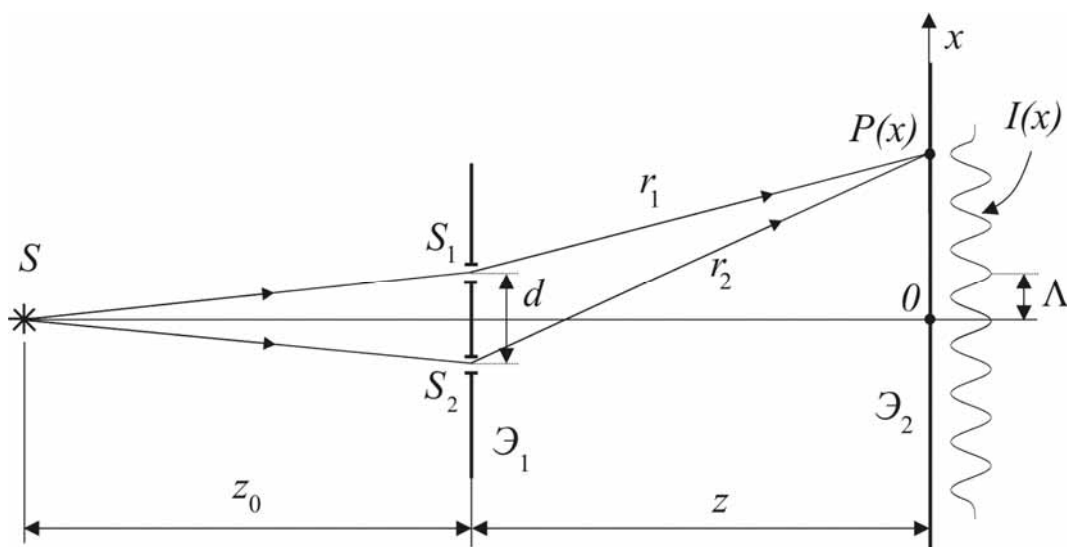


Рис.2. К расчету оптической разности хода $\Delta_{12}(x)$ и пространственного распределения интенсивности света $I(x)$ в интерференционной картине.

Для точечного квазимонохроматического источника света S вторичные волны будут взаимно когерентными. Поэтому интенсивность света на экране \mathcal{E}_2 в области перекрытия вторичных волн будет определяться уравнением:

$$I(x) = I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta_{12}(x)\right), \quad (1)$$

где $I_1(x)$ и $I_2(x)$ – интенсивности вторичных волн на экране \mathcal{E}_2 , λ_0 – средняя длина волны излучения квазимонохроматического источника, $\Delta_{12}(x)$ – разность хода волн от отверстий S_1 и S_2 до некоторой точки $P(x)$ на экране \mathcal{E}_2 .

Для расчета пространственного распределения интенсивности света $I(x)$ необходимо, прежде всего, найти оптическую разность хода $\Delta_{12}(x)$. Будем считать, что световые лучи распространяются в воздухе. Поэтому в данном случае оптическая разность хода равна геометрической разности хода. Из рис.2 видно, что

$$\Delta_{12}(x) = r_2(x) - r_1(x) = \sqrt{\left(\frac{d}{2} + x\right)^2 + z^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + z^2}. \quad (2)$$

Поскольку интерференционная картина наблюдается при условиях $d \ll z$ и $|x| \ll z$, получим

$$\Delta_{12}(x) = z \left(1 + \frac{(x + d/2)^2}{z^2}\right)^{1/2} - z \left(1 + \frac{(x - d/2)^2}{z^2}\right)^{1/2} \approx \frac{1}{2z} \left[(x + d/2)^2 - (x - d/2)^2 \right], \quad (3)$$

где использовано приближение $(1 + x)^a \approx 1 + ax$ при $x \ll 1$.

Итак,

$$\Delta_{12}(x) \approx \frac{d \cdot x}{z} \quad (4)$$

и для распределения интенсивности света на экране \mathcal{E}_2 можем записать:

$$I(x) = I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{d \cdot x}{z}\right). \quad (5)$$

Максимумы суммарной интенсивности (светлые полосы) в интерференционной картине наблюдаются в точках, где $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{d \cdot x}{z}\right) = 1$, т.е.

$$\Delta_{12}(x) = \frac{d \cdot x}{z} = m\lambda_0, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (6)$$

где m – порядок интерференции. Следовательно, расстояние между двумя соседними интерференционными светлыми или, наоборот, темными полосами (период полос) равно:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0 z}{d}. \quad (7)$$

Интерференционные полосы, наблюдаемые на экране \mathcal{E}_2 , называют полосами Юнга. Фотография этих полос приведена на рис.3.

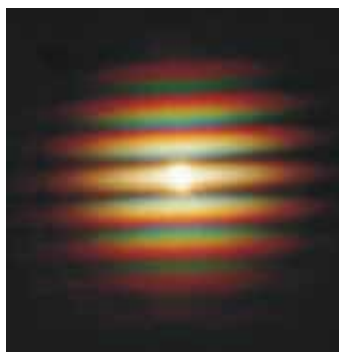


Рис.3. Интерференционные полосы Юнга, наблюдаемые в полихроматическом (белом) свете.

Из уравнений (5) – (7) следует, что период полос Λ зависит от длины волны λ . Поэтому при наблюдении полос Юнга в белом свете появляется цветная окраска полос (рис.3). При этом на периферии от центра картины, где $\Delta_{12}(x)$ максимальна, контраст полос уменьшается из-за влияния временной когерентности света.

Влияние размеров источника света на контраст полос Юнга.

Пространственная когерентность света

Квазимонохроматический источник света конечного размера (протяженный источник) можно представить как сумму некогерентных между собой точечных источников. С увеличением размеров источника контраст полос Юнга снижается из-за снижения степени когерентности интерферирующих волн. В этом эффекте наблюдается проявление пространственной когерентности света.

Получим в явном виде зависимость контраста полос Юнга от размера источника D и от расстояния между центрами отверстий в экране d . Каждый из точечных источников протяженного источника будет формировать свою систему полос Юнга, отличающихся взаимным поперечным (вдоль оси x) сдвигом, определяемым взаимным расположением точечных источников (рис.4). Эти интерференционные картины складываются не когерентно. Поэтому контраст суммарной интерференционной картины будет уменьшаться с увеличением размеров источника света. Этот эффект уменьшения контраста полос Юнга является по сути эффектом снижения степени взаимной когерентности интерферирующих вторичных волн, а значит, и степени взаимной когерентности света в отверстиях S_1 и S_2 экрана \mathcal{E}_1 . Таким образом проявляется пространственная поперечная когерентность света.

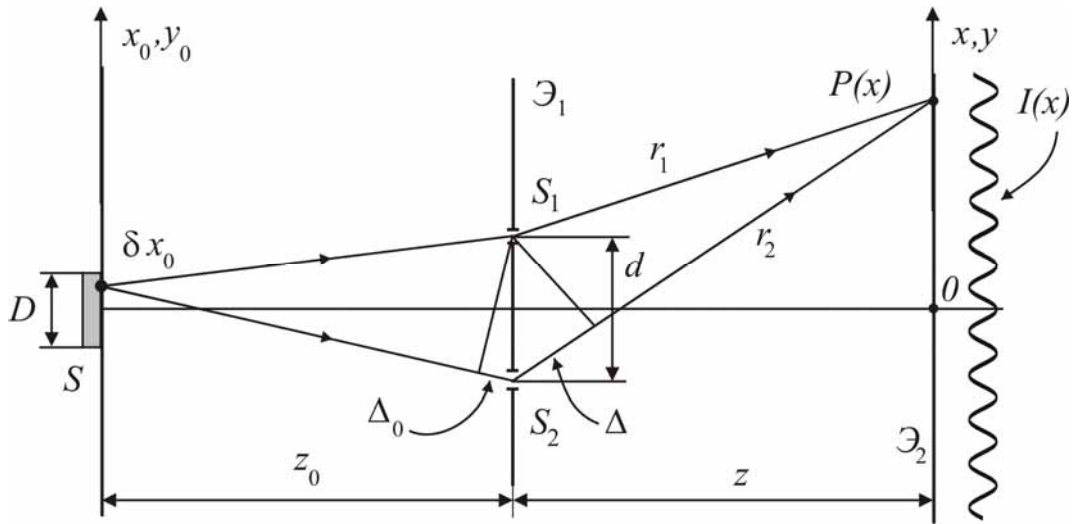


Рис.4. К расчету интерференционной картины от протяженного источника света.

Точечный источник δx_0 создает на экране \mathcal{E}_2 распределение интенсивности $\delta I(x)$, определяемое соотношениями (1) и (5). Однако в этом случае разность хода интерферирующих волн будет определяться не только положением точки P на экране \mathcal{E}_2 , но и положением точечного источника δx_0 в плоскости протяженного источника света S. Следовательно, общая разность хода волн будет определяться двумя слагаемыми Δ_0 и Δ (рис.4). Используя условие малости величин D, d, x по сравнению с расстояниями z и z_0 , для этих разностей хода получаем приближенные выражения $\Delta_0 \approx d \cdot x_0 / z_0$ и $\Delta \approx d \cdot x / z$:

$$\begin{aligned} \delta I(x) &= \left(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta_0 + \Delta) \right] \right) \delta x_0 = \\ &= \left(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda_0 z} \left(\frac{z \cdot x_0}{z_0} + x \right) \right] \right) \delta x_0 = \\ &= 2I_0 \delta x_0 + 2I_0 \cos \left[\frac{2\pi d}{\lambda_0 z} \left(\frac{z \cdot x_0}{z_0} + x \right) \right] \delta x_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где мы предположили $I_1 = I_2 = I_0$, а величина $x_0 z / z_0$ определяет поперечный сдвиг интерференционных полос относительно центра $x = 0$.

Тогда, полагая величину I_0 независимой от x_0 , для суммарного распределения интенсивности в плоскости экрана \mathcal{E}_2 получим выражение:

$$I_{\Sigma} = \int_{-D/2}^{+D/2} \delta I(x) = 2I_0 D + 2I_0 \int_{-D/2}^{+D/2} \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda_0 z} \left(\frac{z \cdot x_0}{z_0} + x \right) \right) \delta x_0. \quad (9)$$

Подсчитаем, чему равен интеграл, стоящий в выражении для суммарной интенсивности (9):

$$\int_{-D/2}^{+D/2} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \left(\frac{x_0}{z_0} + \frac{x}{z}\right)\right) \delta x_0 = \frac{1}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{d}{z_0}} \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{dD}{2z_0} + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{xd}{z}\right) - \sin\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{dD}{2z_0} + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{xd}{z}\right) \right] =$$

$$= \frac{1}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{d}{z_0}} \cdot 2 \sin\left(\frac{\pi Dd}{\lambda_0 z_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{xd}{z}\right). \quad (10)$$

Тогда выражение для средней интенсивности (9) примет вид:

$$I_{\Sigma}(x) = 2DI_0 \left\{ 1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi Dd}{\lambda_0 z_0}\right)}{\frac{\pi Dd}{\lambda_0 z_0}} \cos\left(\frac{2\pi xd}{\lambda_0 z}\right) \right\} = 2DI_0 \left(1 + \gamma_{12}(D, d) \cos\left(\frac{2\pi xd}{\lambda_0 z}\right) \right), \quad (11)$$

где функция $\gamma_{12}(D, d)$, стоящая перед косинусом, определяет коэффициент пространственной модуляции распределения суммарной интенсивности или, иными словами, контраст интерференционных полос Юнга. Действительно, по Майкельсону контраст (видность) интерференционных полос определяется следующим образом:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi Dd}{\lambda_0 z_0}\right)}{\frac{\pi Dd}{\lambda_0 z_0}} = \gamma_{12}(D, d), \quad (12)$$

где функцию $\gamma_{12}(d)$ называют функцией (степенью) поперечной пространственной когерентности светового поля протяженного источника.

При увеличении расстояния d между отверстиями S_1 и S_2 коэффициент γ_{12} уменьшается и, соответственно, снижается контраст V наблюдаемых полос Юнга. Аналогично, контраст полос снижается и при увеличении размера D источника света S . Эти эффекты снижения контраста полос, как уже отмечалось выше, представляют собой эффекты проявления поперечной пространственной когерентности света в плоскости экрана \mathcal{E}_1 с отверстиями S_1 и S_2 .

График степени пространственной когерентности, определяемой синк-функцией $\gamma_{12} = \sin u/u$, представлен на рис.5.

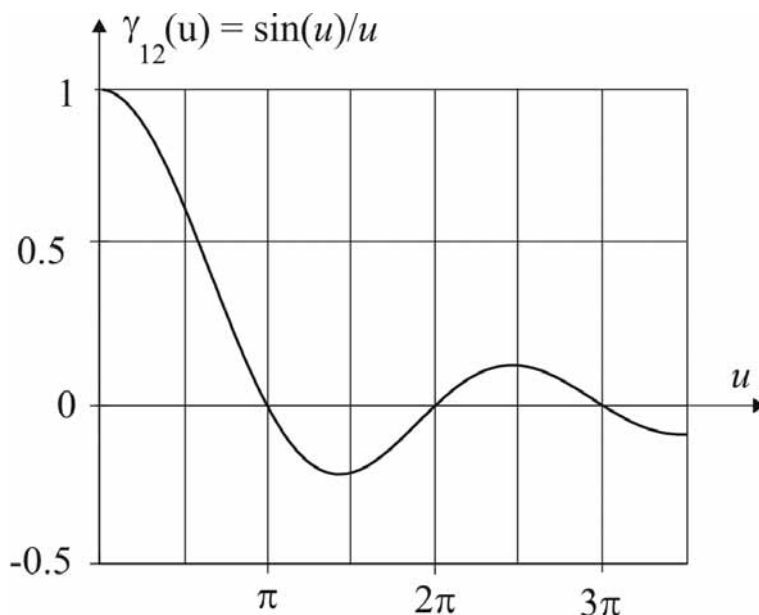


Рис.5. Степень пространственной когерентности излучения протяженного источника света.

Первый ноль функции $\gamma_{12} = \sin u/u$ имеет место при $u = \pi$. Поэтому из (12) следует, что взаимная когерентность света в отверстиях S_1 и S_2 полностью исчезает и контраст полос Юнга равен нулю при

$$d = \frac{\lambda_0 z_0}{D} = \rho_c. \quad (13)$$

Это расстояние $d = \rho_c$ называют радиусом (длиной) поперечной пространственной когерентности света. Если ввести в рассмотрение угловой размер источника света $\theta \approx D/z_0$, то для радиуса когерентности используют соотношение:

$$\rho_c \approx \lambda_0 / \theta. \quad (14)$$

Радиус пространственной когерентности ρ_c определяет максимальное расстояние между двумя точками светового поля, в которых возбуждаемые светом колебания взаимно когерентны. Для круглого источника света радиус когерентности ρ_c во всех направлениях одинаков. Область пространственной когерентности имеет форму круга диаметром ρ_c . Если же источник имеет вытянутую форму, например, форму прямоугольника со сторонами D_x и D_y по направлениям x_0 и y_0 , соответственно, то радиусы когерентности света по различным направлениям будут различны (рис.6):

$$\rho_{cx} \approx \lambda_0 z_0 / D_x, \quad \rho_{cy} \approx \lambda_0 z_0 / D_y. \quad (15)$$

В этом случае область пространственной когерентности будет иметь вытянутую форму в направлении узкой стороны источника.

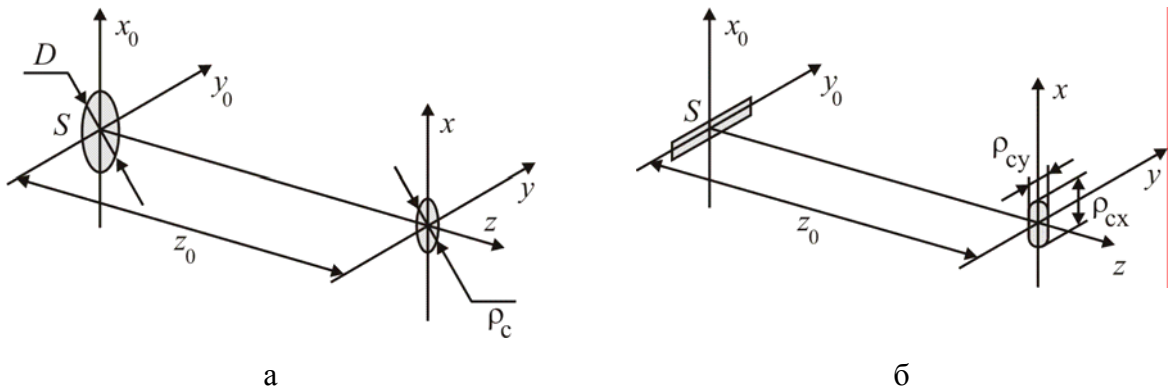


Рис.6. К определению области пространственной когерентности света круглого (а) и прямоугольного (б) источников.

Для физического понимания эффекта исчезновения интерференционных полос Юнга при $d = \rho_c$ важно сделать оценку взаимного смещения Δx_I интерференционных картин, формируемых центральной и крайними точками источника света, и сопоставить эту величину с периодом Λ полос.

Если $d = \rho_c = \lambda_0 z_0 / D$, то разность хода волн Δ_{12} от крайней точки источника, $x_0 = D/2$, до центра интерференционной картины $x = 0$ будет определяться только величиной $\Delta_0 = \pm dx_0 / z_0 = \pm dD / 2z_0 = \lambda_0 / 2$. Для центральной точки источника, $x_0 = 0$, эта разность хода равна нулю. Следовательно, на светлую интерференционную полосу от центральной точки источника накладываются темные полосы от крайних точек источника (рис.7). И это справедливо для всех интерференционных полос в плоскости экрана \mathcal{E}_2 . Иными словами, интерференционные картины от крайних точек источника оказываются взаимно смещенными на величину периода полос Юнга. Интерференционные картины от остальных точек источника занимают промежуточные положения.

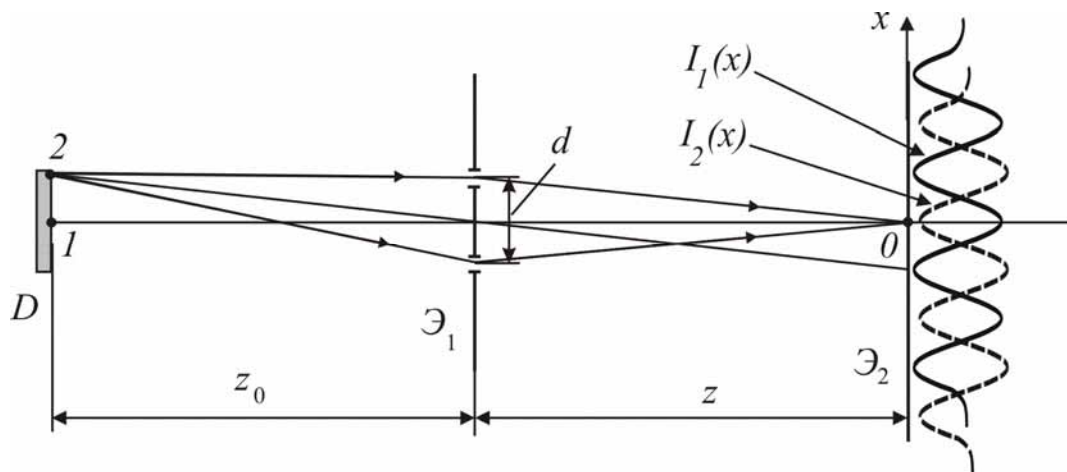


Рис.7. Взаимное смещение элементарных интерференционных картин, формируемых центральной и крайней точками протяженного источника света.

Из графика на рис.5 видно, что при $d > \rho_c$ взаимная когерентность света в отверстиях S_1 и S_2 частично восстанавливается и полосы Юнга вновь должны появиться, но уже с меньшим контрастом, $V \approx -0.2$. Отрицательное значение степени когерентности и, соответственно, отрицательное значение контраста полос означает, что светлые и темные полосы должны поменяться местами. Следовательно, при $u = 3\pi/2$ на графике рис.5, что соответствует $d \approx 3\rho_c/2$, в центре интерференционной картины вместо светлой полосы появляется темная интерференционная полоса. Этот эффект называется эффектом обращения контраста интерференционных полос.

Как видно из уравнений (11) и (12), точечный монохроматический источник света ($D \approx 0$) дает интерференционную картину с контрастом $V = 1$. Источник конечных размеров ($D \neq 0$), состоящий из некогерентных между собой точечных источников, дает интерференционную картину с меньшим, чем единица, контрастом. Излучение источника конечных размеров является частично когерентным. Степень когерентности этого излучения в двух точках S_1 и S_2 можно характеризовать контрастом (видностью) порождаемой им интерференционной картины Юнга. Если $V = 0$, световые колебания в этих точках полностью не когерентны. При $V = 1$ колебания полностью когерентны. При промежуточных значениях контраста колебания частично когерентны.

Когерентного излучения, для которого $V = 1$ при любом расстоянии d между точками S_1 и S_2 , не существует, хотя к этому пределу можно очень близко подойти в специальных случаях (например, при использовании лазеров в одномодовом режиме генерации).

Светосильная интерференционная схема Юнга.

Использование экрана с множеством пар отверстий

В классической схеме интерференционного опыта Юнга имеют место огромные потери энергии света из-за необходимости использования малых отверстий S_1 и S_2 и достаточно больших расстояний z_0 и z , соответственно, от источника до экрана \mathcal{E}_1 с отверстиями и от экрана \mathcal{E}_1 до экрана \mathcal{E}_2 , на котором наблюдаются интерференционные полосы. Эти энергетические потери затрудняют наблюдение эффекта проявления пространственной когерентности света.

Заметно большей энергетической эффективностью обладает схема Юнга с использованием собирающей линзы (рис.8). В этой схеме интерференционные полосы Юнга наблюдаются в плоскости \mathcal{E}_2 – плоскости действительного изображения S'

источника света, что соответствует дальней области дифракции света на отверстиях S_1 и S_2 экрана \mathcal{E}_1 . В этой плоскости световые волны, прошедшие через отверстия S_1 и S_2 , полностью перекрываются. Расстояния z_0 и z могут быть достаточно малыми, что также увеличивает интенсивность интерференционных полос Юнга по сравнению с классической схемой.

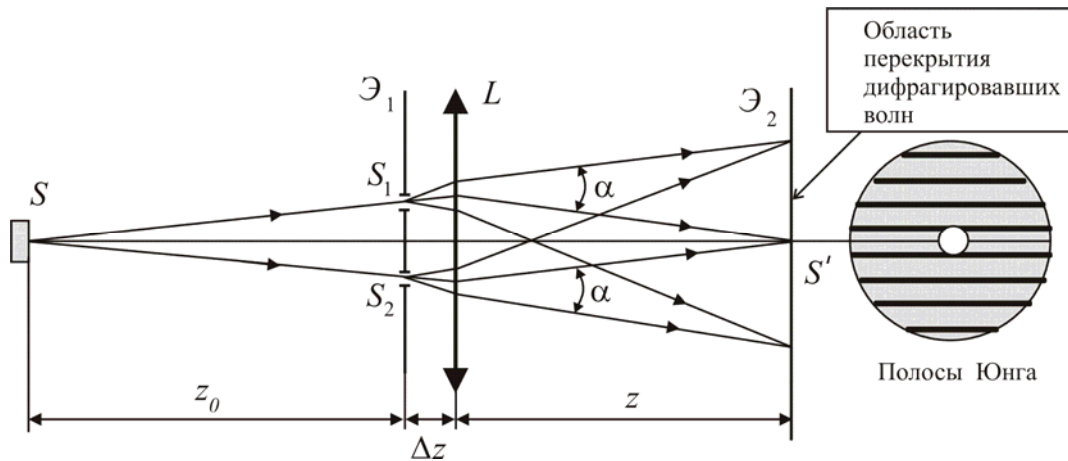


Рис.8. Схема Юнга с использованием собирающей линзы, обеспечивающей полное перекрытие дифрагировавших пучков.

В качестве линзы в схеме Юнга с собирающей линзой (рис.8) можно использовать непосредственно фокусирующую систему глаза наблюдателя (роговица + хрусталик). В этом случае полосы Юнга формируются на сетчатке глаза, которая выполняет роль экрана \mathcal{E}_2 (рис.9). Именно такая схема Юнга используется в данной лабораторной работе.

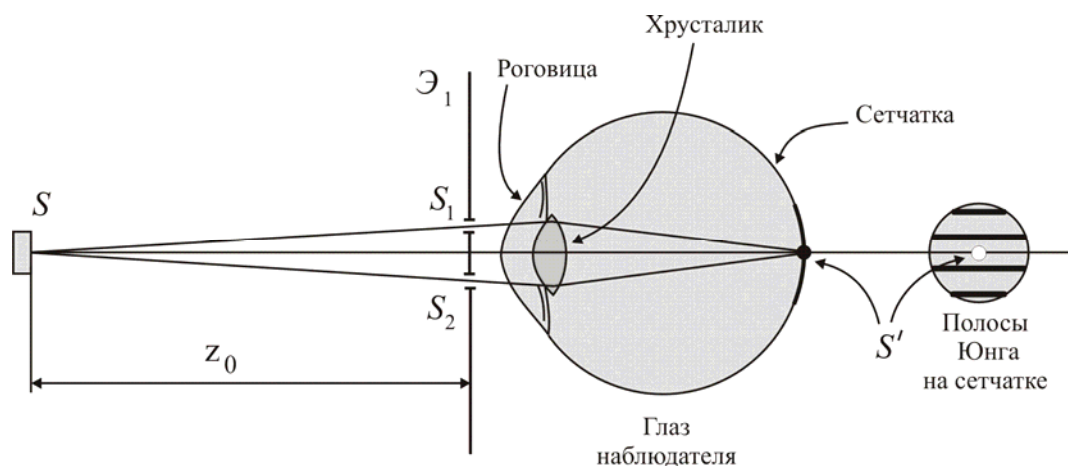


Рис.9. Схема Юнга с формированием интерференционных полос непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя.

Период интерференционных полос Λ в схемах на рис.8 и рис.9 зависит от расстояния Δz между экраном \mathcal{E}_1 и фокусирующей линзой L :

$$\Lambda = \frac{\lambda_0 z}{d} \left(1 + \frac{\Delta z}{z_0} \right). \quad (16)$$

Эту формулу можно получить, рассматривая изображения отверстий S_1 и S_2 , видимые из плоскости \mathcal{E}_2 . При $\Delta z/z_0 \ll 1$, что легко реализовать в эксперименте, период полос определяется такой же формулой, что и в классической схеме, $\Lambda = \lambda_0 z/d$.

Существенное увеличение интенсивности интерференционных полос Юнга в схеме рис.8 и рис.9 можно получить, используя экран \mathcal{E}_1 не с одной, а с множеством пар отверстий S_1 и S_2 с одинаковым расстоянием d и одинаковой взаимной ориентацией. Действительно, положение интерференционных полос не зависит от положения отверстий в экране \mathcal{E}_1 относительно оптической оси. Иными словами, параллельный перенос отверстий в плоскости экрана \mathcal{E}_1 не приводит к смещению интерференционных полос Юнга. Это свойство данной схемы является следствием таутохронности лучей в изображающей системе – все лучи света от источника S до изображения S' проходят одинаковый оптический путь, т.е. приходят в т. S' на оптической оси системы с нулевой разностью хода. Поэтому через центр изображения источника проходит светлая интерференционная полоса Юнга.

Если в экране \mathcal{E}_1 имеется не одна, а множество пар отверстий с одинаковой ориентацией и равной длиной отрезка d , соединяющего центры каждой пары отверстий, то множество соответствующих им интерференционных картин Юнга будет накладываться друг на друга без смещения, "в фазе", увеличивая интенсивность света в светлых полосах. Как следствие, существенно увеличивается энергетика интерференционной схемы Юнга.

Каким способом можно изготовить такой экран с множеством пар отверстий? Механически изготовить такой экран – весьма трудная задача.

Наиболее просто требуемый экран можно получить фотографическим способом. Используя компьютерную графику, можно создать картину множества пар черных идентичных пятен на белом фоне с одинаковым расстоянием d в одном направлении в каждой паре. Фотографирование изображения этой картины с достаточным коэффициентом уменьшения на фотографическую пленку или фотопластинку позволит получить требуемый экран с множеством пар прозрачных пятен S_1 и S_2 на непрозрачном фоне. Студенты сами могут изготовить такие экраны.

Другой фотографический способ получения экрана с множеством пар идентичных прозрачных пятен заключается в двукратном фотографировании рассеянного лазерного

излучения при малом поперечном смещении d фотопластинки между экспозициями. В рассеянном когерентном свете наблюдается так называемый спекл-эффект (speckle – пятнышко, крапинка) – интерференционное образование светлых и темных пятен микронного поперечного размера [4Д]. Фотопластинка с двукратной записью лазерной спекл-структуры называется спеклограммой сдвига. Набор таких спеклограмм с различной величиной сдвига d используется в качестве экрана \mathcal{E}_1 в интерференционной схеме Юнга в данной лабораторной работе.

На рис.10 приведены фотографии интерференционных картин Юнга, полученных по схеме рис.8 с одной спеклограммой сдвига, но при различных размерах D источника света. В качестве линзы L использовался объектив цифрового фотоаппарата, а его ПЗС-матрица – в качестве экрана \mathcal{E}_2 . Увеличение D сопровождается уменьшением радиуса когерентности ρ_c в соответствии с (13) или (14) и уменьшением контраста полос V в соответствии с формулой (12) и графиком на рис.5. Фото на рис.10,*а* соответствует $d \approx \rho_c/3$, $V \approx 0,8$; фото на рис.10,*б* – $d \approx \rho_c/2$, $V \approx 0,5$; рис. 10,*в* – $d \approx \rho_c$, $V \approx 0$; рис.10,*г* – $d \approx 3\rho_c/2$, $V \approx -0,2$. На рис.10,*г* наблюдается эффект обращения контраста полос – в центре вместо светлой полосы появилась темная интерференционная полоса.

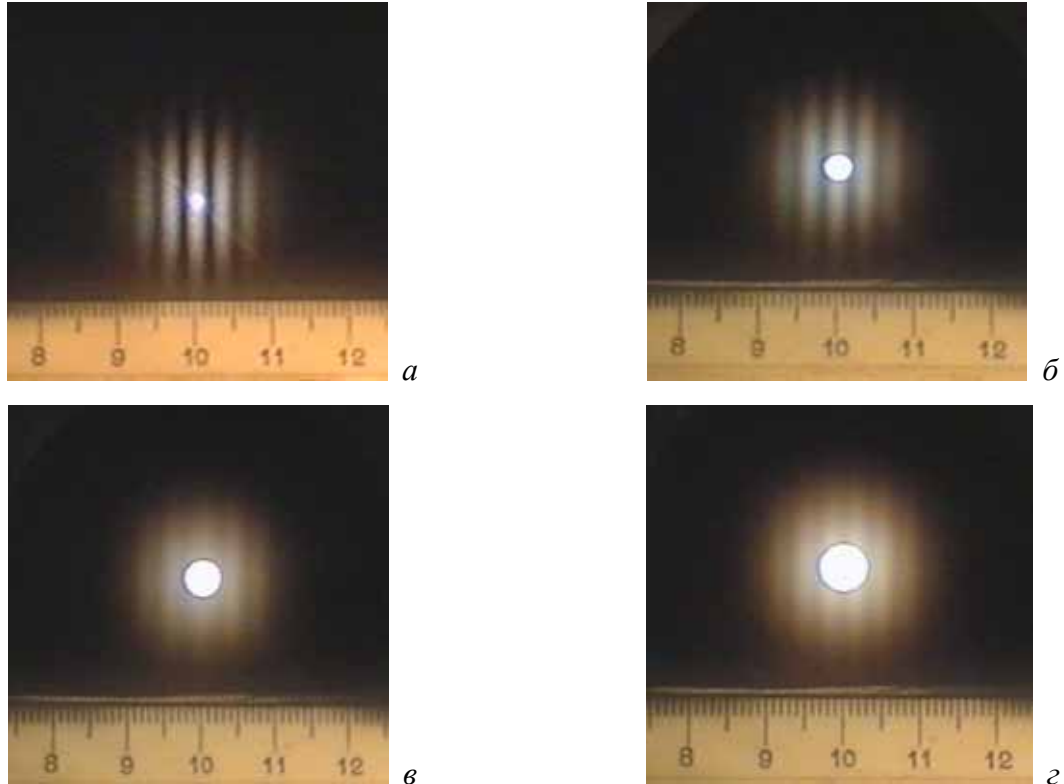


Рис.10. Изменение контраста интерференционных полос Юнга при увеличении размеров источника света и соответствующем уменьшении радиуса пространственной когерентности излучения в плоскости экрана с отверстиями:

$$a - \rho_c \approx 3d; \quad б - \rho_c \approx 2d; \quad в - \rho_c \approx d; \quad г - \rho_c \approx 2d/3.$$

При формировании полос Юнга непосредственно на сетчатке глаза (рис.9) нельзя напрямую определить период полос Λ и их контраст V . Однако период полос можно определить путем его сравнения с изображением предметов известного размера, например, с изображением миллиметровой линейки, как это видно на рис.10.

Если экран \mathcal{E}_1 расположен вплотную к глазу, то период Λ полос на сетчатке определяется формулой (7). Если одновременно с полосами глаз видит миллиметровую линейку, то для Λ можем записать (рис.11):

$$\Lambda = ml' = ml \frac{z}{z_0}, \quad (17)$$

где $l = 1$ мм – деление линейки, l' – размер изображения деления, m – количество делений на одном периоде полос. Поскольку $\Lambda = \lambda_0 z / d$ (формула (7)), то для углового периода полос $\Lambda_\alpha = \Lambda / z$ можем записать:

$$\Lambda_\alpha = \frac{ml}{z_0} = \frac{\lambda_0}{d}. \quad (18)$$

Из этой формулы при известном λ и z_0 можем определить параметр d – расстояние между прозрачными пятнами («отверстиями») в экране \mathcal{E}_1 :

$$d = \lambda / \Lambda_\alpha = \lambda_0 z_0 / ml. \quad (19)$$

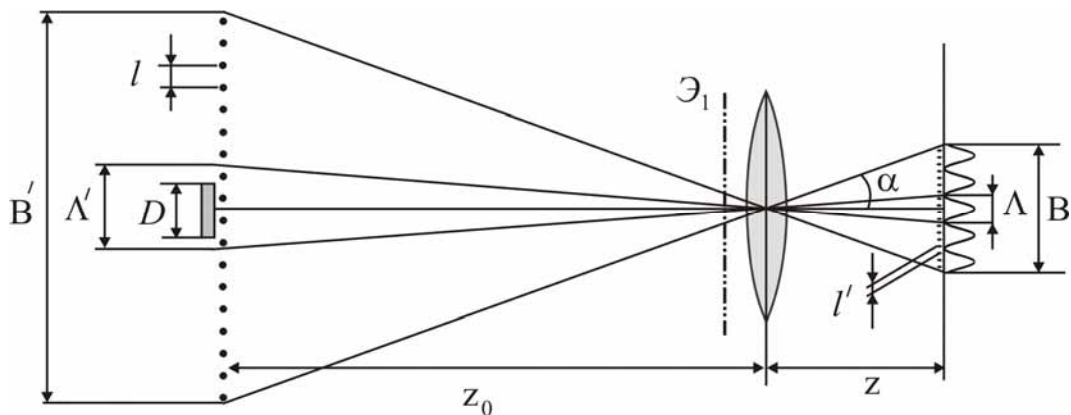


Рис.11. К определению углового периода полос Λ/z и угла дифракции α света на отверстиях в экране \mathcal{E}_1 .

Для определения радиуса пространственной когерентности ρ_c излучения в плоскости экрана \mathcal{E}_1 при заданном размере D источника света необходимо иметь экран \mathcal{E}_1 с таким d , при котором контраст полос Юнга практически равен нулю. В этом случае $\rho_c \approx d$. Определяя из (19) d , находим ρ_c .

При использовании одного экрана \mathcal{E}_1 с неизменным значением d можно наблюдать уменьшение контраста полос при увеличении D (рис.10). Как только ρ_c станет равным d , $\rho_c \approx d$, полосы практически исчезают. Определяя угловой период полос Λ_α при $\rho_c \approx d$, находим

$$\rho_c \approx \frac{\lambda_0}{\Lambda_\alpha} = \frac{\lambda_0 z_0}{m l}. \quad (20)$$

Угловой размер дифракционного гало

По фотографиям на рис.10 видно, что возможно определение углового размера всего светового поля – дифракционного гало, в котором формируются полосы Юнга. Это дифракционное поле образуется в результате дифракции света на каждом отдельном отверстии S_1 и S_2 экрана \mathcal{E}_1 (см. рис.1 и рис.8). Поскольку максимальный угол дифракции α определяется соотношением $\alpha \approx \lambda_0/b$ [1-5], то, измеряя α , находим b – размер отверстий S_1 и S_2 в экране \mathcal{E}_1 , используя формулу (см. рис.11):

$$\alpha \approx \frac{B}{2z} = \frac{B'}{2z_0} \approx \frac{\lambda_0}{b}. \quad (21)$$

Таким образом можно определить и радиус пространственной когерентности ρ_c светового поля и параметры дифракционного экрана d и b , используемого в интерференционной схеме Юнга.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемая лабораторная работа включает в себя следующие экспериментальные задачи:

1. Наблюдение эффекта уменьшения контраста интерференционных полос Юнга при увеличении размеров теплового источника света; наблюдение осциллирующего характера изменения контраста полос и эффекта обращения контраста полос.
2. Определение радиуса пространственной когерентности излучения протяженного источника света.
3. Определение угла дифракции света на неоднородностях в экране и размеров этих неоднородностей.
4. Определение радиуса когерентности излучения осветительных источников в аудитории.

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис.12. Внешний вид лабораторной установки показан на рис.13.

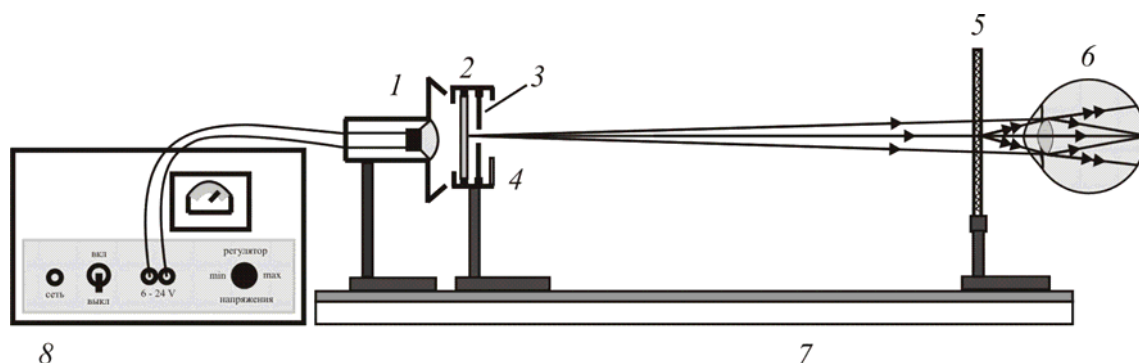


Рис.12. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – осветитель – тепловой источник света, 2 – матовое стекло, 3 – ирисовая диафрагма, 4 – миллиметровая линейка, 5 – специальный дифракционный экран с множеством пар малых прозрачных неоднородностей, 6 – глаз наблюдателя; 7 – рельс, на котором закреплены элементы установки; 8 – блок питания осветителя.



Рис.13. Внешний вид лабораторной установки.

Установка укомплектована двумя дифракционными экранами. Дифракционный экран I имеет постоянное значение расстояния d между прозрачными участками, составляющими пары, по всей своей площади. Дифракционный экран II является комбинированным экраном с набором из пяти областей с различными значениями постоянной d .

Вторичным источником света служит матовое стекло 2, освещаемое лампой накаливания 1 (галогенная лампа, 50 Вт), подключаемая через блок питания 8 (~ 12 В) к сети переменного тока ~ 220 В, 50Гц. На панели блока питания находится тумблер включения «Вкл – выкл» и ручка «Регулятор напряжения» для изменения яркости свечения лампы. Ирисовая диафрагма 3 служит для изменения диаметра источника D .

Рядом с рычажком ирисовой диафрагмы находится миллиметровая шкала для определения D . Под диафрагмой расположена миллиметровая линейка 4 для определения видимого периода интерференционных полос. Дифракционный экран 5 крепится в зажиме, установленном на рейтере на рельсе 7. Смещая рейтер, можно изменять расстояние z_0 между источником света и экраном 5.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Наблюдение эффекта уменьшения контраста интерференционных полос Юнга при увеличении размеров теплового источника света; наблюдение осциллирующего характера изменения контраста полос и эффекта обращения контраста полос.

Включить источник света 1. Для этого включить вилку блока питания 8 в розетку электрической сети ~ 220 В, 50 Гц и переключить тумблер на панели блока питания в положение «Вкл».

1. Установить дифракционный экран I в зажим. Установить наименьший размер D отверстия ирисовой диафрагмы.
2. Посмотреть через дифракционный экран I на источник света и наблюдать интерференционные полосы Юнга совместно с изображением источника света. Установить оптимальную для визуального наблюдения интенсивность (яркость) источника поворотом ручки «Регулятор напряжения» на панели блока питания.
3. Определить угловой период $\Lambda_\alpha = ml / z_0$ наблюдаемых интерференционных полос и по формуле (18) определить расстояние d между идентичными неоднородностями в дифракционном экране I.
4. Плавно увеличивая размер D ирисовой диафрагмы, наблюдать эффект уменьшения контраста интерференционных полос Юнга при неизменном периоде полос Λ . Дать объяснение наблюдаемому эффекту. (При большом диаметре D источника можно уменьшить его интенсивность (яркость) путем поворота ручки «Регулятор напряжения» на панели блока питания).
5. Увеличивая диаметр D источника, наблюдать осциллирующий характер изменения контраста полос – небольшое увеличение контраста полос после практически нулевого значения. Наблюдать эффект обращения контраста полос – появление в центре интерференционной картины темной полосы вместо светлой. Дать объяснение наблюдаемому эффекту.

6. Зафиксировать диаметр D источника, при котором наблюдается практически нулевой контраст полос. В этом случае радиус пространственной когерентности $\rho_c \approx d$. Рассчитать значение ρ_c по формуле (13) и сравнить с экспериментальным значением $\rho_c \approx d$.

Задание 2. Определение радиуса пространственной когерентности излучения протяженного теплового источника.

1. Установить в зажим комбинированный дифракционный экран II.
При наименьшем диаметре D источника, когда контраст наблюдаемых интерференционных полос достаточно высокий, определить угловой период полос $\Lambda_\alpha = ml/z_0$, а затем по формуле (19) определить расстояние d между идентичными неоднородностями S_1 и S_2 для каждой из пяти областей в дифракционном экране.
2. Установить средний диаметр D источника. Наблюдая полосы через различные области дифракционного экрана, определить для какой области контраст полос становится практически нулевым. В этом случае $\rho_c \approx d$. Рассчитать ρ_c по формуле (13) при данном D и сравнить с экспериментальным значением ρ_c .

Задание 3. Определение угла дифракции света на неоднородностях в экране и размеров этих неоднородностей.

Определить видимый размер дифракционного поля B' и по формуле (21) определить диаметр b прозрачных пятен в дифракционном экране. Сравнить значения b и d .

Задание 4. Определение радиуса когерентности излучения осветительных источников в аудитории.

Наблюдать интерференционные полосы Юнга от источника света в аудитории (на потолке или на стене) с помощью комбинированного дифракционного экрана с дискретным набором областей с различным значением постоянной d . Оценить радиус когерентности ρ_c света этого источника в плоскости экрана.

Контрольные вопросы и задания

1. Дать определение явлению интерференции света.
2. Нарисовать схемы интерференционного эксперимента Юнга.

3. Сформулировать условия наблюдения максимумов и минимумов интенсивности в интерференционной схеме Юнга с точечным источником света.
4. Записать формулу для периода интерференционных полос Юнга. Записать формулу для степени пространственной когерентности и контраста полос Юнга при использовании круглого источника света.
5. Дать определение пространственной когерентности света, понятиям радиус и область пространственной когерентности света.
6. Дать физическое объяснение эффекту проявления пространственной когерентности света в интерференционном эксперименте Юнга.
7. Почему при увеличении размеров источника света уменьшается контраст полос Юнга?
8. От каких параметров экрана с отверстиями в схеме Юнга зависит контраст интерференционных полос?
9. С помощью какого дифракционного экрана можно существенно увеличить интенсивность в интерференционной картине Юнга?
10. От чего зависит размер дифракционного гало (дифракционного поля), в пределах которого наблюдаются полосы Юнга?

Литература

1. Е.И. Бутиков. Оптика. – СПб.: Невский Диалект, 2003. – 480 с.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика. Издание 5-е. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
3. Н.И. Калитеевский. Волновая оптика. – М.: Высшая школа, 1995. – 463 с.
4. А.Н. Матвеев. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
5. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. Физическая оптика. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
6. В.П. Рябухо, О.А. Перепелицына, А.А. Чаусский. Изучение эффекта проявления пространственной когерентности света в интерференционной схеме Юнга в демонстрационном и лабораторном эксперименте. Физическое образование в вузах. 2001. Т.7. Вып.4. С.99-111.

Дополнительная литература

- 1Д. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- 2Д. М. Франсон, С. Сланский. Когерентность в оптике. – М.: Наука, 1967. – 80 с.
- 3Д. Дж. Гудмен. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. – 528с.
- 4Д. М. Франсон. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 171 с.