

Лабораторная работа 3-1
ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА
(бипризмы Френеля)

Цель работы – изучить двулучевую интерференцию света с помощью бипризмы Френеля; определить характеристики светофильтра – длину волны в максимуме пропускания и полосу пропускания.

Краткие теоретические сведения

Интерференцией называется такое наложение волн, при котором результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей волн, приходящих в точку наложения.

Интерференция обусловлена принципом суперпозиции, в соответствии с которым в точке наложения двух световых волн складываются световые векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 (напряженности электрических полей), а не энергия. Поэтому при наложении волн с интенсивностями I_1 и I_2 результирующая *интенсивность*

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle, \quad (1)$$

где $\langle \cos \delta \rangle$ – усреднённое по времени значение косинуса *разности начальных фаз колебаний*, возбуждаемых в точке наложения каждым источником. Из этого соотношения видно, что интерференция возможна только при условии $\langle \cos \delta \rangle \neq 0$, т.е. при наложении *когерентных* (согласованных) волн. Если интенсивности $I_1 = I_2 = I_0$, результирующая интенсивность

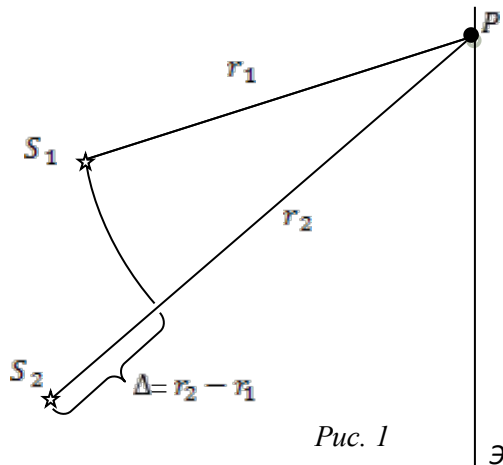
$$I(\delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

Величина δ зависит от взаимного расположения источников S_1 и S_2 и точки наложения P (рис. 1):

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (3)$$

где λ – длина световой волны в вакууме; Δ – оптическая разность хода лучей.

Для вакуума или воздуха $\Delta = r_2 - r_1$ (рис. 1), т.е. совпадает с геометрической разностью хода.



При перемещении точки P по экрану в заданном направлении, величины Δ и δ будут монотонно изменяться, а интенсивность I – периодически, т.е. на экране Э будет наблюдаться интерференционная картина в виде чередующихся светлых (максимумы) и темных (минимумы) полос. Общие условия наблюдения интерференционных максимумов и минимумов:

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &= k\lambda, \\ \Delta_{\min} &= \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda, \end{aligned} \quad (4)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – *порядок интерференционного максимума*. Максимум, соответствующий $k = 0$ называется *центральный*.

Описание опыта с бипризмой Френеля

По своей природе электромагнитное излучение (свет), испускаемое как независимыми естественными источниками, так и различными участками одного источника, *некогерентно*. Поэтому для получения когерентных пучков и наблюдения интерференции света излучение, идущее от одного источника малых размеров (точечного), тем или иным способом распределяется на два перекрывающихся пучка, распространяющихся в близких направлениях.

В данной работе такое деление осуществляется с помощью *бипризмы Френеля* (рис. 2), которая представляет собой две склеенных малыми основаниями стеклянных призмы с малыми преломляющими углами ψ .

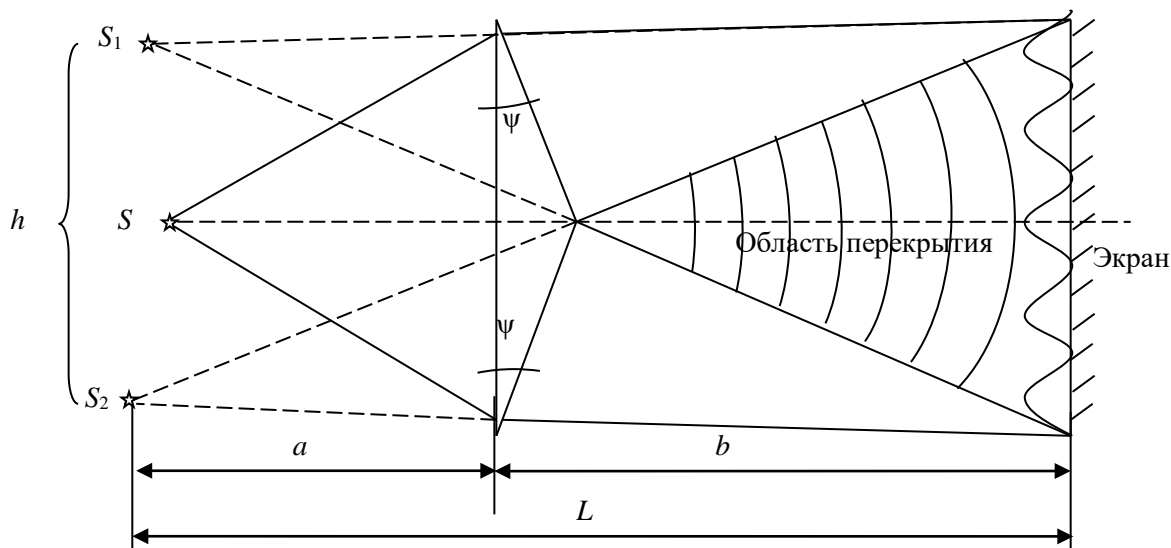


Рис. 2

Свет от источника S после преломления в бипризме распространяется в виде двух расходящихся когерентных пучков, как бы исходящих из точек S_1 и S_2 , являющихся мнимыми изображениями источника S . Поэтому можно сказать, что бипризма вместо одного некогерентного источника S дает два мнимых когерентных источника S_1 и S_2 . При малых ψ расстояние между источниками S_1 и S_2

$$h = 2a(n-1)\psi,$$

где a – расстояние от источника S до бипризмы; n – показатель преломления бипризмы; для стекла $n \approx 1,5$ и $h = a\psi$.

Для точечного и строго монохроматического источника S на установленном на расстоянии $L = a + b$ от него экране в области перекрытия пучков (рис. 2) должны наблюдаться интерференционные полосы с одинаковыми интенсивностями $I_{\max} = 4I_0$ и $I_{\min} = 0$ (см. (2) и рис. 3, а). Координаты x_k максимумов и минимумов зависят от порядка (номера) k полосы, длины световой волны λ , расстояния до экрана L и расстояния между источниками h :

$$x_k^{\max} = k \frac{\lambda L}{h}, \quad (5)$$

$$x_k^{\min} = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{h}$$

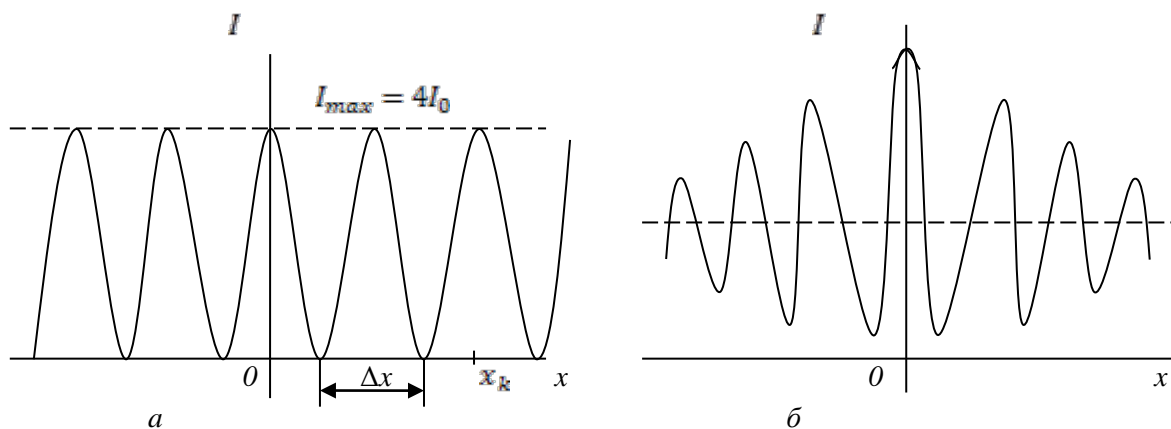


Рис. 3

Из условий (5) следует, что ширина интерференционной полосы $\Delta x = x_{k+1}^{\min} - x_k^{\min}$ не зависит от k , т.е. полосы располагаются эквидистантно на расстоянии

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{h} \quad (6)$$

Наличие реального у источника конечных линейных размеров приводит к общему снижению контрастности интерференционной картины, т.е. к уменьшению интенсивности всех максимумов и увеличению интенсивности во всех минимумах. Поэтому при увеличении линейных размеров источника качество интерференционной картины снижается и при размерах источника порядка ширины интерференционной полосы Δx интерференционные полосы вообще исчезают. Другая причина, ухудшающая условия наблюдения интерференции, заключается в отсутствии в природе строго монохроматических источников света: излучение всегда содержит определенный интервал длин волн $\Delta\lambda$. Это приводит к тому, что интенсивность максимумов и контрастность картины резко уменьшается с удалением от центра, как показано на *рис. 3,б*, в результате для реального источника максимальный порядок k_{max} наблюдаемых полос не превышает значения

$$k_{max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (7)$$

а общее число наблюдаемых на экране темных полос

$$N = 2k_{max} = \frac{2\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (8)$$

В данной работе бипризма Френеля освещается от лампы накаливания через светофильтры, поэтому входящие во все рассмотренные формулы величины означают следующее: λ – длина волны, соответствующая максимуму полосы пропускания светофильтра; $\Delta\lambda$ – ширина полосы пропускания светофильтра (*рис. 4*).

Измерив в эксперименте параметры интерференционной картины, можно на основании формул (6) и (8) определить характеристики λ и $\Delta\lambda$ для используемого светофильтра:

$$\lambda = \frac{\Delta x h}{L} \quad (9)$$

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda}{N} \quad (10)$$

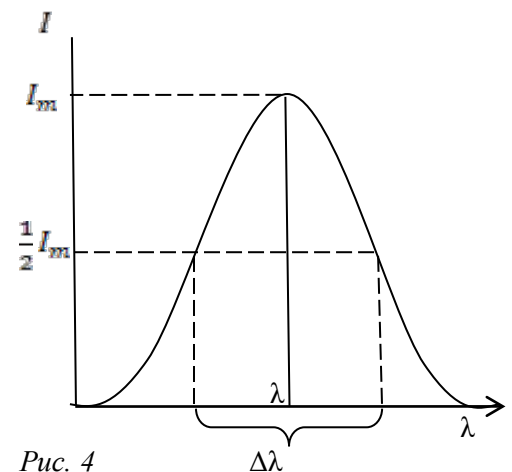


Рис. 4

Величины L , Δx и N измеряются непосредственно, а расстояние h определяется, как описано далее.

Экспериментальная установка

представляет собой *оптическую скамью* – массивный рельс с направляющими, на котором на рейтерах (специальных подставках) смонтированы все необходимые элементы оптической схемы (*рис. 5*).

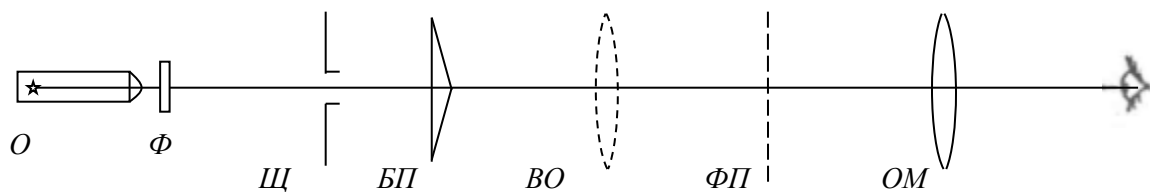


Рис. 5

Пучок света от лампы O проходит через сменный светофильтр Φ и попадает на раздвижную щель Ψ , которая играет роль узкого линейного источника. Выходящий из щели световой пучок направляется в центральную зону бипризмы Френеля $БП$. Интерференция получающихся после прохождения бипризмы двух перекрывающихся когерентных пучков наблюдается с помощью окулярного микрометра $ОМ$, работающего как лупа. Глаз видит мнимое увеличенное изображение интерференционных полос, локализованное на передней фокальной плоскости $ФП$ окуляра $ОМ$, играющей роль экрана. Сюда же проецируются изображения визирной нити и измерительной шкалы, позволяющих фиксировать положение интерференционных полос и измерять их координаты.

Для юстировки (настройки) установки все элементы схемы могут перемещаться как вдоль оси системы, так и в поперечных направлениях (вертикальном и горизонтальном).

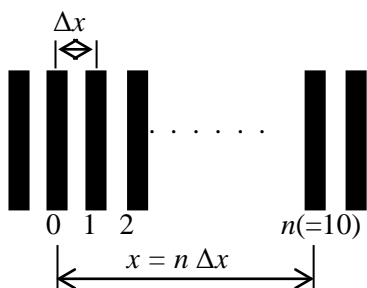


Рис. 6

Поскольку расстояние Δx весьма мало, то для повышения точности измерений поступают следующим образом. Устанавливают визирную нить окуляра на какую-нибудь темную полосу в левой части картины (рис. 6) и приписывают ей номер 0. Затем измеряют расстояние x между этой «нулевой» полосой и какой-нибудь полосой с номером n (обычно $n = 10$). В таком случае

$$\Delta x = \frac{x}{n} \quad (11)$$

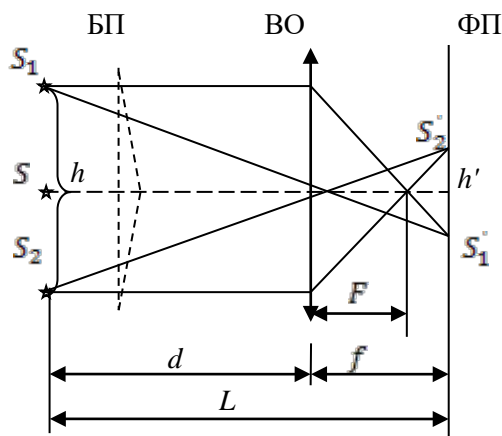


Рис. 7

Для определения расстояния h между мнимыми источниками используется вспомогательный объектив ВО (собирающая линза с известным фокусным расстоянием F), который устанавливается между бипризмой и окуляром (см. рис. 5). С помощью объектива на переднюю фокальную плоскость окуляра фокусируется действительное уменьшенное изображение мнимых источников S_1 и S_2 (изображений щели S в бипризме), как показано на рис. 7. Из рис. 7 видно, что

$$\frac{h}{h'} = \frac{d}{f} \quad \text{и} \quad d + f = L \quad (12)$$

Кроме того, расстояния d, f и F связаны формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (13)$$

Из отношений (12) и (13) после элементарных выкладок следует, что

$$\frac{h}{L} = \frac{(d-F)^2}{d^2 F} h', \quad (14)$$

т.е. определив с помощью окулярного микрометра величину h' и измерив расстояния L и d , можно найти значение h .

Подставив выражение (14) для h и ранее полученное выражение для Δx (11) в соотношение (9), получим рабочую формулу для определения длины световой волны

$$\lambda = \frac{x h' (d-F)^2}{n F d^2}. \quad (15)$$

Ширина полосы пропускания $\Delta \lambda$ светофильтра определяется по формуле (10) через визуально определенное общее число N наблюдаемых темных интерференционных полос и предварительно рассчитанное по (15) значение λ .

Порядок выполнения работы

1. Получить у лаборанта набор светофильтров.
2. Ознакомиться с установкой, в соответствии с инструкцией на рабочем месте произвести юстировку (настройку) установки и получить максимально четкую интерференционную картину; показать ее преподавателю.
3. Для каждого светофильтра измерить расстояние x_i между «нулевой» и n -ой темной полосой, как показано на рис. 3. Каждое измерение повторить столько раз, чтобы каждый студент бригады выполнил измерение, но не менее 3 раз, значения x_i и n занести в таблицу 1.
4. Сосчитать общее число N наблюдаемых в поле зрения окуляра темных полос и занести его в таблицу.
5. Установить вспомогательный объектив, получить четкое изображение двух светящихся щелей и измерить расстояние h_i между ними. Измерения повторить по количеству студентов в бригаде, но не менее 3 раз и результаты занести в таблицу.
6. Измерить расстояние d между плоскостями щели и вспомогательного объектива и занести его в таблицу.

Дополнительные задания

1. Наблюдать интерференционную картину в белом свете (без светофильтров), сосчитать общее число N' наблюдаемых темных полос и занести его в протокол.
2. Медленно увеличивая ширину щели наблюдать изменения в интерференционной картине. Результаты наблюдений записать в протокол. Если установка оснащена соответствующим микрометром, определить

наибольшее значение ширины щели b_{\max} , при котором еще наблюдаются интерференционные полосы и записать его в протокол.

3. Установить первоначальную ширину щели (четкая интерференционная картина) и, медленно приближая бипризму к щели, наблюдать изменения в интерференционной картине (контрастность, расстояние между полосами, общее число наблюдаемых полос). *Результаты наблюдений записать в протокол.*

Обработка результатов

1. По формуле (15) рассчитать длину волны λ в максимуме пропускания каждого светофильтра и занести результаты в таблицу. *Сделать вывод о совпадении с литературными данными. При наличии отклонений объяснить их причины.*

2. По формуле (10) оценить ширину $\Delta\lambda$ полосы пропускания для каждого светофильтра и занести результаты в таблицу.

Дополнительные задания

1. По измеренному числу полос N' определить максимальный порядок k' наблюдаемых полос в белом свете и сравнить его с предварительно рассчитанными значениями $k_{\text{теор.}}$. Объяснить причину расхождения k' и $k_{\text{теор.}}$.

Примечание. При расчете $k_{\text{теор.}}$ для границ интервала длин волн, соответствующего белому свету, принять значения $\lambda_1 = 400$ нм (фиолетовый свет) и $\lambda_2 = 750$ нм (красный свет).

2. *Объяснить в выводе результаты наблюдений по влиянию ширины щели на интерференционную картину.* Определить отношение $b_{\max}/\Delta x$ и сопоставить его с теоретическим значением.

3. *Объяснить в выводе наблюдаемую зависимость параметров интерференционной картины от расстояния между бипризмой и щелью.*

Светофильтр	.	.	
n	.	.	
x_i , мм	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
$x = \langle x_i \rangle$, мм			
N	.	.	
h'_i , мм	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
	.	.	
$h' = \langle h'_i \rangle$, мм			
F , мм	.	.	
d , мм	.	.	
λ , нм			
$\Delta\lambda$, нм			
$k_{\text{теор.}} =$	$N' =$	$k' =$	

Контрольные вопросы

1. Что называется интенсивностью света? Выведите формулы (1) и (2).
2. Какие волны называются когерентными? Почему световые волны, испускаемые независимыми источниками, некогерентные?
3. Объясните принцип получения когерентных световых волн и приведите 5-7 конкретных примеров интерференционных волн (помимо бипризмы Френеля).
4. Обязательно ли будет наблюдаться интерференция при наложении когерентных волн в случае: а) звуковых волн; б) световых волн?

5. Что называется оптической и геометрической разностью хода лучей (волн)?
6. Выведите формулу (3). Запишите выражение δ через длину световой волны λ' в однородной среде.
7. Выведите условие (4).
8. Выведите формулы (5) и (6). Почему преломляющие углы бипризмы должны быть очень малы?
9. * Принимая в опыте с бипризмой Френеля $a = b = 0,5$ м и разрешающую способность глаза $\Delta x_0 = 0,2$ мм, оцените максимальное допустимое значение преломляющего угла бипризмы ψ при наблюдении интерференции невооруженным глазом и в проведенном в работе опыте.
- 10.* Получите закон распределения интенсивности на экране $I(x)$ в опыте с бипризмой в зависимости от расстояния от центра картины.
- 11.* Как и почему влияет на интерференционную картину неполная монохроматичность используемого света? Выведите соотношение (7).
- 12.* Как и почему влияют на интерференционную картину линейные размеры источника света? Получите выражение для предельно допустимой ширины щели b_{\max} в опыте с бипризмой Френеля.
13. Выведите соотношение (14) и получите рабочую формулу (15).

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. –Т.2. – § 110, 119, 120, 121, 122.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики, оптика. – М.: Наука, 1980. – § 26, 27, 28, 30, 33.

Составители: Бригинец В.П., Гусева О.А., Моисеенко В.И., Пугач О.В.