© Кафедра физики СПбГПУ

Работа 3.13

ИЗМЕРЕНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ

М. Ю. Липовская
Ю. П. Яшин

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных понятий, используемых для объяснения волновых эффектов в оптике, является когерентность. Когерентными называются волны, одинаковые по частоте и разности фаз. Такие волны при их наложении складываются тоже с постоянной разностью фаз. Если их сложение в какой-то области происходит с разностью фаз, кратной 2π (в фазе), это приводит к увеличению интенсивности, если с разностью фаз, кратной π (в противофазе), это приводит к уменьшению интенсивности. Перераспределение интенсивности в плоскости наложения когерентных волн называется интерференцией.

Для наблюдения интерференции свет от одного источника нужно разделить на два пучка и затем наложить их друг на друга. Для этого существует два метода: деления волнового фронта и деления амплитуды. В методе деления волнового фронта пучок пропускается, например, через два близко расположенных отверстия в непрозрачном экране. Если расстояние между отверстиями больше некоторой характерной для данного источника величины, называемой шириной когерентности $h_{ког}$, интерференция пропадает. Во втором методе пучок делится на одной или нескольких частично отражающих, частично пропускающих поверхностях, при этом длина оптического пути разделенных пучков может отличаться. Если оптическая разность хода разделенных пучков больше некоторой характерной для данного источника величины, называемой длиной когерентности $l_{ког}$, интерференция пропадает. Длина и ширина когерентности являются важными характеристиками источника при использовании его в интерференционных схемах.

Для выполнения работы используются две части установки с одним и тем же источником света — газоразрядной ртутной лампой. В левой части установки собран интерферометр Майкельсона, при помощи которого измеряется длина когерентности зеленой линии излучения лампы и соответствующая ему длина волны. В правой части установки измеряется ширина когерентности той же спектральной линии при помощи системы узких щелей, расположенных на различных расстояниях друг от друга.

Рассмотрим сначала работу интерферометра Майкельсона, принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

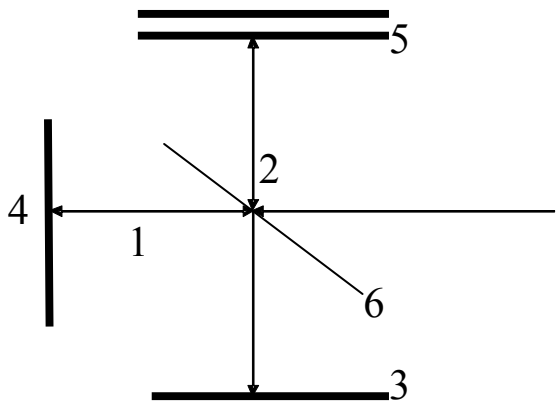

Рис. 1

Если длины оптических путей для лучей 1 и 2 различаются не более, чем на длину когерентности, в плоскости их наложения на матовом экране 3 формируется интерференционная картина. Если разность оптических путей для этих лучей становится больше, чем длина когерентности, они перестают быть когерентными и интерференционная картина пропадает. Зеркало 4 в интерферометре является неподвижным, а зеркало 5 может перемещаться при помощи микрометрического винта, что позволяет изменять длину пути для луча 2. Разделение лучей происходит на полупрозрачном зеркале 6. Если источник света излучает плоский волновой фронт, наблюдается система параллельных полос, если источник излучает сферический волновой фронт, наблюдается система концентрических окружностей. Хорошо настроенный интерферометр с источником со сферическим волновым фронтом демонстрирует в области интерференции систему концентрических окружностей с центром в середине экрана. Интерферометр собран на стальной платформе, что обеспечивает постоянство оптических длин путей для интерферирующих лучей, то есть стационарность интерференционной картины.

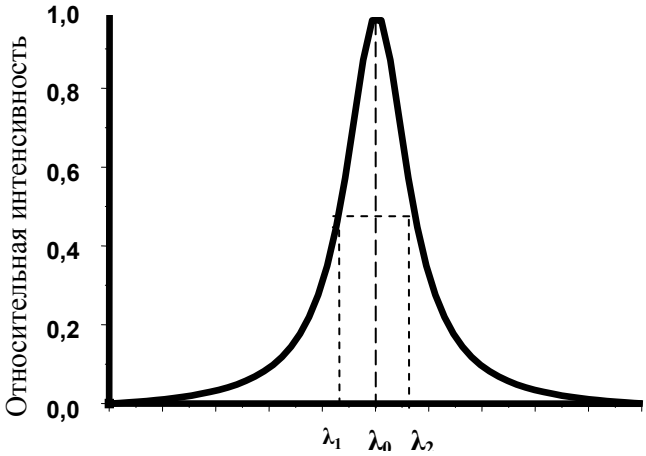

Рис. 2

Если оптическая разность хода лучей 1 и 2 для какой-то точки экрана отличается на нечетное число полуволн (лучи в противофазе), возникает область минимума интенсивности света, если разность хода отличается на четное число полуволн (лучи в фазе), будет максимум интенсивности [1]. Изменение интенсивности света удобно наблюдать в центре интерференционной картины. При вращении микрометрического винта зеркало 5 перемещается, разность хода лучей 1 и 2 изменяется и имеет место чередование в центре на экране темных и светлых пятен. При смещении зеркала на λ либо темное пятно опять становится темным, либо светлое пятно – светлым. Таким образом, наблюдая за чередованием темных или светлых пятен в центре интерференционной картины, можно измерить длину волны излучения. По исчезновению интерференционной картины можно получить информацию о длине когерентности. Если при смещении зеркала на d разность хода становится $2d > l_{ког}$, интерференционная картина должна исчезнуть.

Спектральные линии любого источника света не могут быть абсолютно узкими, они имеют форму, которую иллюстрирует рис. 2, где λ характеризует местоположение максимума колоколообразной кривой и считается длиной волны источника [2]. Ширина спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, при этом значения λ_2 и λ_1 определяются по половинному уровню от максимальной высоты. Длина когерентности $l_{ког}$ связана с шириной спектральной линии источника $\Delta\lambda$:

$$l_{ког} = \lambda^2 / \Delta\lambda \qquad (1)$$

где λ – длина волны источника [1].

Из формулы (1) следует, что измерив длину волны источника (по чередованию темных или светлых пятен в центре интерференционной картины) и длину когерентности (по исчезновению интерференционной картины), можно рассчитать ширину спектральной линии. Следует отметить, что ширина спектральной линии $\Delta\lambda$ газоразрядного источника зависит (из-за эффекта Допплера) от беспорядочного теплового движения атомов, поэтому при увеличении температуры и, соответственно, давления, спектральные линии становятся шире, а длина когерентности меньше. Для непрогретой лампы на данной установке вообще нельзя измерить длину когерентности, так как она слишком велика, и максимально возможное перемещение зеркала не позволяет наблюдать исчезновение интерференционных колец.

Для исследования поперечной когерентности используется схема Юнга (рис. 3), состоящая из неточечного источника в виде щели, освещаемой газоразрядной ртутной лампой с фильтром, и набора пар щелей для наблюдения интерференции. Пары щелей расположены на разных расстояниях друг от друга и считаются узкими. При использовании неточечного источника света интерференция наблюдается только при расстоянии между щелями, меньшими ширины когерентности $h_{ког}$, определяемой формулой

$$h_{ког} = \frac{\lambda}{\psi} \tag{2}$$

где λ – длина волны источника, ψ – угловая ширина источника, то есть угол, под которым виден источник в месте расположения щелей. Формулу поясняет рис. 3, на котором h – ширина щели. Таким образом, изменяя ширину освещаемой одиночной щели или расстояние до системы двойных щелей, мы можем менять угол ψ и в зависимости от расстояния между щелями либо получать, либо не получать на них интерференционную картину. Если расстояние между щелями g больше $h_{ког}$, интерференция пропадает, то есть условие пропадания интерференции $g \approx h_{ког}$.

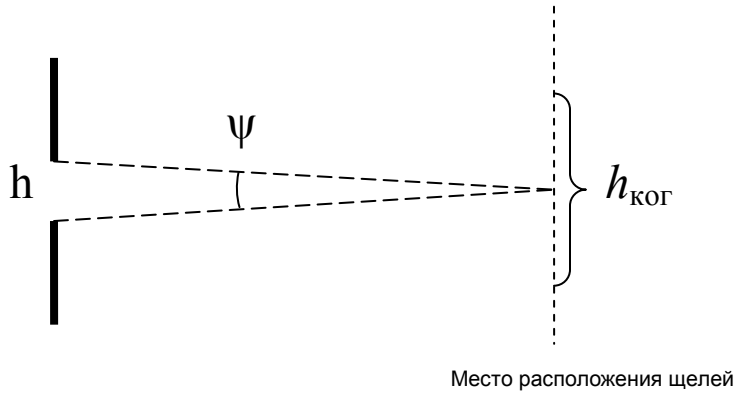

Рис. 3

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является изучение явления интерференции в интерферометре Майкельсона и в установке с двумя щелями (опыт Юнга). Определение условий исчезновения интерференции позволяет измерить длину и ширину когерентности зеленой линии в спектре ртутной газоразрядной лампы, по смещению интерференционной картины вычисляется ширина этой спектральной линии.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка смонтирована на рельсе, на котором укреплены рейтеры с расположенными на них деталями оптической схемы. Она состоит из двух частей, одна из которых позволяет проводить измерения с интерферометром Майкельсона (левая), вторая (правая) воспроизводит опыт Юнга с двумя щелями (см. рис. 4.)

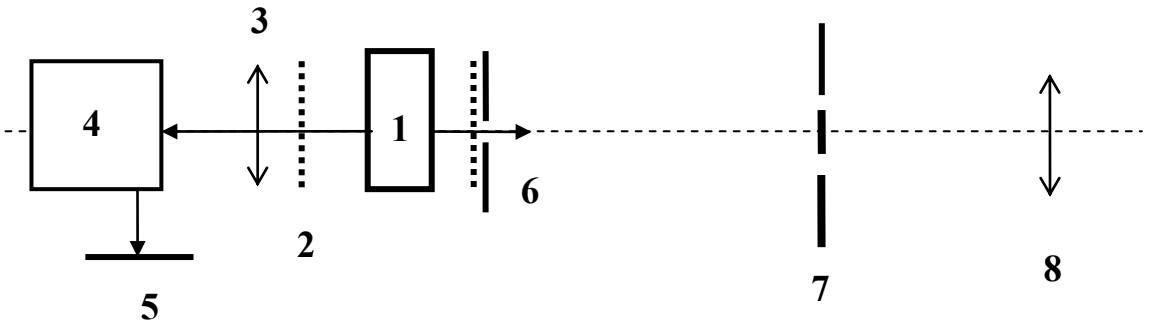

Рис. 4

Источником света является газоразрядная ртутная лампа 1 с оптическим фильтром 2, пропускающим излучение только зеленой линии спектра. Положительная линза 3 позволяет обеспечить удобную для настройки интерферометра 4 расходимость пучка. Для наблюдения получаемая интерференционная картина проецируется на расположенный перпендикулярно рельсу матовый экран 5. Для работы со схемой Юнга необходимо повернуть лампу вправо, переставить светофильтр 2 в правую часть установки сразу после лампы, прикрепить к держателю светофильтра одиночную щель 6 и направить свет на систему двойных щелей 7. Система двойных щелей 7 разделяет пучок для получения интерференции. Окуляр с увеличительным стеклом 8 позволяет наблюдать глазом интерференцию в области наложения волн и ее исчезновение.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ И ШИРИНЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ИСТОЧНИКА

1. Включите ртутную лампу и дайте ей прогреться в течение 10 минут.
2. Убедитесь, что излучение лампы направлено в сторону интерферометра Майкельсона и зеленый светофильтр без двойной щели расположен между выходным окном лампы и линзой перед интерферометром.
3. Убедитесь, что интерферометр настроен и на матовом экране видна четкая интерференционная картина в виде системы концентрических колец. Если интерферометр не настроен, обратитесь к преподавателю.
4. Перемещая зеркало 5 в интерферометре при помощи микрометрического винта, наблюдайте последовательное появление темных пятен в центре. Измерьте по винту расстояние d, соответствующее появлению n темных пятен. Так как изменение длины оптического пути для луча в интерферометре в два раза больше d, можно определить длину волны излучения по формуле (3).

$$\lambda=2d/10n \qquad (3)$$

Коэффициент 10 учитывает влияние рычага, связывающего микрометрический винт и зеркало 5. То есть, перемещение микрометрического винта передается с уменьшением в 10 раз на зеркало 5.

Проведите 10 раз подобные измерения. Удобные значения n для проведения измерений $n = 5 \div 15$.

5. Оцените использованную длину волны излучения ртутной лампы.
6. Перемещая зеркало 5 (рис. 1) микрометрическим винтом из положения с максимальной яркостью полос, добейтесь исчезновения интерференционной картины при дальнейшем увеличении показаний микрометра. Запишите это значение. Затем, уменьшая показания микрометра, вновь добейтесь появления отчетливой интерференционной картины. Продолжая, уменьшать показания микрометра, вновь добейтесь исчезновения интерференционной картины. Запишите это значение. Разность значений, отсчитанных по микрометрическому винту D, при которых интерференционная картина исчезает, позволяет по формуле (4) определить $l_{ког}$.

$$l_{ког} = 2D/10 \qquad (4)$$

Проведите 7÷10 раз измерение величины D.

ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ИСТОЧНИКА

1. Поверните лампу 1 вправо для работы со схемой Юнга.
2. Переставьте рейтер со светофильтром 2 в правую часть установки и укрепите на нем одиночную щель 6.
3. На расстоянии примерно 60 см от одиночной щели 6 установите при помощи рейтера систему двойных щелей 7, а на расстоянии 25÷26 см от нее — окуляр 8 с увеличительным стеклом. Изменяя ширину одиночной щели a или изменяя расстояние до системы двойных щелей L, наблюдайте в окуляр исчезновение интерференции при данном расстоянии g между щелями. Соответствующие исчезновению интерференции значения a, L и g запишите в протокол в таблицу 1. Проведите измерение параметров исчезновения интерференции 7÷10 раз для разных расстояний между щелями g.

Таблица 1

a ширина одиночной щели, мм	L расстояние от одиночной до двойной щели, см	g расстояние между щелями в системе двойных щелей, мм	$\Psi = a/L$ угол, под которым виден источник, рад	$h_{ког}$ длина когерентности, мм

УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Оцените по формуле (3) длину волны ртутной лампы. Оцените погрешность.
2. Оцените $l_{ког}$ по формуле (4). Оцените погрешность.
3. Сосчитайте угол Ψ для всех наборов параметров a, L и g в схеме Юнга, для которых наблюдалось исчезновение интерференции. По формуле (2), используя вычисленную вами длину волны, сосчитайте $h_{ког}$ для всех наборов параметров. Занесите полученные значения в таблицу 1, они должны быть примерно равны g.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов И.Е., Волновые процессы. Основные законы: Учебное пособие для ВУЗов, М., Лаборатория Базовых Знаний, 1999, 256 с.
2. Физический энциклопедический словарь. М. Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 1995, 928 с.