

Лабораторная работа

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Конкретная цель	Критерий достижения цели
I. Изучение теории	
1. Интерференция волн	Без ошибок сформулировать понятия: интерференция волн, интерференционная картина, максимум колебаний, минимум колебаний, когерентность, разность хода, разность фаз и указать условия \min и \max с примерами.
2. Когерентность света	Без ошибок объяснить, почему два источника света не могут быть когерентными, определить понятия: длина и время когерентности, пространственная когерентность.
3. Интерференционная схема с бипризмой Френеля	Изобразить ход лучей через бипризму, показать зону интерференции и мнимые источники света
II. Практические навыки	
1. Юстировка оптической установки	Умение самостоятельно произвести необходимые операции.
2. Измерение расстояний с помощью окулярного микрометра	
3. Определение расстояния между мнимыми источниками света	

Оборудование: оптическая скамья, источник света, щелевая диафрагма, бипризма Френеля, окулярный микрометр, объектив, мерная лента.

I. Необходимые теоретические сведения

1.1. Интерференция волн

Если в среде распространяется одновременно две (или более) волны, то каждая точка среды участвует одновременно в двух (или более) колебаниях. Результирующее колебание точки является векторной суммой складываемых колебаний (принцип суперпозиции).

Пусть в данную точку волнового поля приходит две волны одинаковой частоты, создавая колебания, описываемые уравнениями:

$$y_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды, а φ_1 и φ_2 – начальные фазы колебаний
Результирующее колебание точки также будет гармоническим:

$$y = y_1 + y_2 = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

где $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ (1)

Из выражения (1) видно, что:

I) если разность фаз $\delta = \varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$, то в данной точке поля амплитуда результирующих колебаний A будет постоянной. В других точках поля разность фаз δ складываемых колебаний может принимать другие значения ($0 \leq \delta \leq 2\pi$), но важно, что в каждой точке она будет сохранять постоянное значение. Такие волны называются когерентными (то лат coharens-находящийся в связи);

II) если δ может принимать значения от 0 до 2π , то амплитуда A может принимать значения от A_{\max} до A_{\min} , где

$$A_{\max} = A_1 + A_2, \text{ при } \delta = 2m\pi \quad (2a)$$

$$A_{\min} = A_1 - A_2, \text{ при } \delta = (2m+1)\pi, \text{ где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2б)$$

Если $A_1 = A_2$, то $A_{\max} = 2A_1$, а $A_{\min} = 0$, т.е. в одних точках поля колебания резко усилятся, а в других уменьшатся до нуля. Т.к. энергия (интенсивность) волны $I \sim A^2$, то мы фактически будем наблюдать устойчивую картину перераспределения энергии в волновом поле. Такая картина называется **интерференционной**, а соответствующее явление – **интерференцией волн**. Интерферировать могут любые волны.

ВОПРОСЫ

1. Почему наличие интерференции является признаком волновой природы явления?
2. Какие точки максимума называются точками интерференционной картины? минимума?
3. Объясните условия, необходимые для наблюдения максимума и минимума в данной точке волнового поля.
4. Что будем наблюдать, если частота складываемых волн будет неодинакова?

1.2. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА ОТ ДВУХ ТОЧЕЧНЫХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Пусть S_1 и S_2 (рис.1) – точечные источники волн длиной λ . M – некоторая точка волнового поля, отстоящая от источников на расстоянии $r_1 = S_1M$ и $r_2 = S_2M$. Результат интерференции в точке M определяется разностью фаз δ колебаний, вызываемых в этой точке волнами, пришедшими от S_1 и S_2 . На практике разность фаз δ колебаний выражают через разность хода Δ :

Теперь условия можно переписать в виде:

Условие максимумов:

Условие минимумов:

Т.е. в интерференционной картине максимумы располагаются в тех точках, для которых в разности хода лучей укладывается целое число волн, а минимумы – в точках в которых разности хода укладывается нечетное число полуволн. Число называется порядком максимума. На рис.2 представлено расположение максимумов и минимумов в интерференционной картине двух точечных источников в однородной среде. Положение максимумов изображены сплошными, а минимумов – пунктирными линиями.

ВОПРОСЫ

5. Напишите уравнение геометрического места точек максимумов (минимумов). Какую кривую (поверхность) вы получили? Какова результирующая амплитуда в точках волнового поля?

Из рисунка видно, что интерференционная картина наблюдается, если только источники расположены не слишком близко друг от друга. Действительно, для осуществления минимума на разности хода (рис.3) должна уложиться хотя бы одна полуволна. Следовательно, если расстояние между источниками , то условие минимума неосуществимо и интерференционная картина вырождается. Таким образом, еще одно условие когерентности может быть сформулировано так: два источника не воспринимаются как один и создают интерференционную картину, если расстояние между ними больше половины длины волны.

1.3. ШИРИНА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПОЛОСЫ

Расстояние между соседними линиями минимум (максимумов) называется шириной интерференционной полосы . Найдем ее величину. Для этого проведем через точку М волнового поля плоскость наблюдения параллельной прямой, соединяющей точечные источники . Проведем перпендикулярно так, чтобы . В плоскость наблюдения введем ось ОХ с началом координат в т.О. Очевидно, что в т.О будет наблюдаться максимум нулевого порядка ($=0$) (сравни рис.2 и 4). Максимумы

следующих порядков () будут располагаться симметрично относительно т.О. Пусть в т.М с координатой X наблюдается максимум порядка . Из рис.4 получим:

Отсюда

Ближайший в точке М максимум будет иметь порядок . тогда ширина интерференционной полосы будет равна

Т.е. не зависит от порядка интерференции (при каком условии?). Чем дальше плоскость наблюдения от источника, тем шире будут расстояния между максимумами (сим.рис.2).

ВОПРОС

7. От каких еще факторов и как зависит ?

1.4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Электромагнитное излучение в диапазоне от 0,01 нм до 1 см называют оптическими. Светом обычно называют видимое излучение в диапазоне от 400 нм до 760 нм.

В практике с помощью двух независимых источников света (двух ламп) не удастся получить интерференционную картину. Чем это объяснить? На основании выше изложенного выделим важнейшие условия для получения интерференции:

1. частоты волн должны быть одинаковы;
2. должны складываться поперечные волны, в которых колебания имеют одинаковые направления, т.е. плоскополяризованные волны;
3. подразумевалось, что колебания происходят непрерывно в течение всего времени наблюдения.

Условия 1 и 2 нетрудно выполнить, третье условие не имеет места в оптике и определяет специфику оптических интерференционных схем. Источником световых волн является атом. Получив энергию (при нагревании тела, в электрическом поле и т.д.), атом «сбрасывает» ее за некоторое время , излучая электромагнитную волну, и переходит в стационарное состояние до следующего возбуждения. Испущенная волна имеет вид «куска» монохроматической волны, называемого цугом волны (рис.5).

Т.к. излучаемая волна распространяется со скоростью света , то длина цуга . По экспериментальным оценкам . В каждом цуге длиной содержится длин волн. При наложении двух цугов (одной частоты) на экране может возникнуть интерференционная картина, но длительность ее составит . У следующей пары цугов разность фаз будет иной, и

интерференционная картина будет сменять другую сотни миллионов раз. Ни глаз (инерция зрения 0,1 с), ни другой приемник света не в состоянии следить за быстрой сменой картин и фиксирует только равномерную освещенность экрана. Т.о. обычные источники света не могут создавать интерференционную картину и являются некогерентными.

Как на практике обеспечить постоянство разности фаз колебаний, необходимое для их интерференции? Здесь возможны два пути: один из них заключается в том, что можно согласовывать акты излучения света атомами – этот путь сейчас реализован в лазерах. Другой путь позволяет осуществить интерференцию с обычными источниками света. Идея состоит в том, чтобы заставить интерферировать не колебания, идущие от разных атомов, а колебания, приходящие в точку наблюдения от одного и того же атома, но по разным путям. Одна из таких схем предложена Френелем.

ВОПРОСЫ

8. Прочему понятие двух когерентных источников в оптике отличается от аналогичного понятия для упругих волн?
9. Можно ли подобрать две когерентные лампы накаливания?
10. Дайте описание электромагнитной волны.

1.5. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СХЕМА С БИПРИЗМОЙ ФРЕНЕЛЯ

Бипризма Френеля представляет собой симметричную стеклянную призму с очень малыми преломляющими углами (рис.б). Источником света служит ярко освещенная узкая щель, параллельная ребру тупого угла бипризмы. Дважды преломляясь в обеих частях бипризмы, каждый луч расщепляется на два, которые перекрываясь за бипризмой образуют интерференционную картину. Если на пути интерферирующих пучков поставить экран, то на нем можно наблюдать систему темных (минимумы) и светлых (максимумы) полос, параллельных щели. Т.к. полученная картина будет выглядеть очень мелкой, то ее рассматривают с помощью окулярного микрометра O_k , позволяющего проводить измерения ширины полос.

Можно показать, что если падающий пучок лучей достаточно узкий, то продолжения преломленных пучков дают два мнимых изображения, лежащих в плоскости щели. Схема с бипризмой сводится к схеме интерференции от двух точечных источников (рис.4) с тем только различием, что угловая ширина зоны интерференции будет ограничена углом:

где n - показатель преломления вещества бипризмы.

ВОПРОСЫ

11. Выразите угол отклонения лучей в бипризме через ее показатель преломления и преломляющий угол.
12. Почему преломляющий угол бипризмы должен быть очень мал?
13. Как изменится картина, если щель и ребро бипризмы не будут параллельны?

1.6. РОЛЬ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ИСТОЧНИКА СВЕТА. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ

Выше предлагалось, что источники точечные. Однако, реальные источники света имеют конечные размеры, значительно превосходящие длину световой волны. Согласно изложенному выше, интерферируют между собой волны, исходящие из одной и той же точки источника. Волны, исходящие из атомов А и В (рис.7) протяженного источника, создадут интерференционные картины, не совпадающие между собой. Чем больше расстояние АВ, тем сильнее будет размыта интерференционная картина, и при значительной ширине источника практически перестанет наблюдаться. Т.е., с увеличением размеров источника уменьшается резкость интерференционной картины, ее контрастность. Считается, что интерференционная картина будет еще достаточно резкой, если сдвиг интерференционных полос от крайних точек источника не превышает примерно $\frac{1}{4}$ ширины полосы. Оценка допустимых размеров источника (см.) дает приближенное условие:

Где θ - **апертура интерференции**, т.е. угол расхождения интерферирующих лучей, идущих от источника (рис.7). Чем меньше апертура интерференции, тем больше допустимые размеры источника. Если условие (8) выполнено, и следовательно, размеры источника не препятствуют возникновению интерференционной картины, то говорят, что имеет место **пространственная когерентность**.

ВОПРОСЫ

14. Как будет меняться интерференционная картина, если постепенно увеличивать ширину щели (рис.6)? передвигать бипризму?

1.7 ВЛИЯНИЕ НЕМОНОХРОМАТИЧНОСТИ ИСТОЧНИКА НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННУЮ КАРТИНУ

Нарушим теперь условие монохроматичности источника света. Пусть в состав излучения входит излучение с длинами волн от λ_1 до λ_2 . Согласно формуле (6) с ростом λ растет ширина полосы Δx . Поэтому при удалении от центра картины максимумы будут «разбегаться», и полосы начнут

размываться. На рис.8 изображены графики распределения интенсивности для длин волн λ_1 и λ_2 . Между этими крайними кривыми непрерывно располагаются кривые интенсивности для промежуточных длин волн (пунктирные линии). Мы видим, что с ростом порядка интерференции максимумы кривой для λ_1 все более «обгоняет» максимумы кривой λ_2 и догоняет ее максимум следующего порядка – это приводит к постепенному уменьшению контрастности наблюдаемой картины. Полосы исчезнут совсем, когда максимум m -порядка для λ_1 совпадет с максимумом $(m+1)$ -порядка для λ_2 . В этом случае весь провал между максимумами m -порядка и $(m+1)$ -порядков для λ_1 будет заполнен максимумами $(m+1)$ -порядка промежуточных длин волн данного спектрального интервала $\Delta\lambda$. Итак, условие исчезновения полос:

Рассмотрим возможные случаи:

- 1) Если излучение источника таково, что входящие в его состав монохроматические волны практически не различимы по цвету ($\Delta\lambda \ll \lambda$), то интерференционная картина будет одноцветной. В этом случае, начиная с порядка m , определяемого формулой (9), исчезает всякая интерференционная картина – далее будет простирается равномерное световое поле.
- 2) Для белого света и визуального наблюдения ($\Delta\lambda \approx \lambda$) сравнимо λ . В этом случае λ_1 и интерференционные полосы, казалось бы, наблюдаться не должны. Однако, благодаря способности глаза различать цвета, мы будем наблюдать цветную интерференционную картину. При λ_1 (центр интерференционной картины) получится белая полоса (волны всех длин имеют максимумы), а по обе стороны от нее будут видны цветные полосы, за которыми потянется равномерное освещенное световое поле.
- 3) Если свет состоит из двух отдельных монохроматических линий с длинами волн λ_1 и λ_2 , то интерференционная картина исчезнет, а затем появится вновь и станет резкой при $\Delta\lambda \ll \lambda$ и т.д. Чем меньше $\Delta\lambda$, тем больше периодов можно наблюдать.

ВОПРОС

15. Как можно реализовать случаи 1), 2), 3), в установке с бипризмой Френеля?

1.8 ДЛИНА И ВРЕМЯ КОГЕРЕНТНОСТИ

Из общего понятия интерференции волн мы знаем, что порядок интерференции определяется разностью хода Δr : $\Delta r = m\lambda$. Т.к. для некогерентного света при $\Delta r \gg \lambda$ интерференционная картина исчезнет, то очевидно, что максимальная разность хода Δr_{max} , при которой еще будет видна интерференционная картина, определяется соотношением:

Величина называется длиной когерентности. Для того, чтобы наблюдать интерференцию, необходимо обеспечить условия, при которых разность хода интерферирующих лучей будет меньше .

В п.1.4. мы говорили, что свет испускается атомом в виде цугов длиной Δl , где Δt - время излучения цуга. Очевидно, что длина цуга и длина когерентности должны совпадать. В самом деле, если разность хода волны окажется больше длины цуга, то интерференция не будет наблюдаться, т.к. обе части цуга не могут встретиться, а два разных цуга некогерентны. Поскольку обе части цуга уходят от источника одновременно, то разность фаз определяется только временем, на которое опаздывает к встрече одна из частей цуга, и будет одинаковой для всех следующих друг за другом цугов. Т.е. в области, где выполняется условие $\Delta l < l_c$ колебания когерентны и имеет место **временная когерентность**, т.к. осуществление интерференции зависит от времени запаздывания. Длительность цуга называют **временем когерентности**. Т.е. интерференция наблюдается, если разность хода будет меньше длины когерентности $\Delta l < l_c$ и или, другими словами, задержка цуга по времени не будет превышать времени когерентности $\Delta t < t_c$.

Теперь, когда мы выяснили, какую роль играют в интерференции размеры источника света и его монохроматичность, можно сделать вывод: интерференция в оптике наблюдается при наложении двух (или большего числа волн), идущих от одного и того же реального источника света, причем лишь в тех областях пространства, в которых имеет место пространственная и временная когерентность.

II. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

2.1 ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ

Для получения интерференционной картины необходимо отъюстировать установку. Для этого:

1. Выставить на оптическую скамью осветитель и рейтеры с раздвижной щелью и окулярным микрометром и отцентрируйте их по высоте. Отодвиньте окуляр-микрометр на другой конец скамьи.
2. Включите осветитель.

ВНИМАНИЕ!

В данной работе используется **ртутная лампа сверхвысокого давления** (см. описание лаб. раб. №3).

ПОМНИТЕ!

Нельзя включать лампу без кожуха и защитного стекла

3. Установите ширину щели и передвигая ее поперек скамьи, добейтесь чтобы пучок шел вдоль скамьи.
4. На расстоянии 30-40 см от щели установите бипризму и отцентрируйте ее по высоте. Двигая бипризму поперек скамьи добейтесь, чтобы перекрытие световых пучков шло вдоль оси скамьи. Это удобнее сделать, если на скамью поставить белый экран (листок бумаги).
5. Уменьшая ширину щели и слегка поворачивая бипризму вокруг оси системы, получите в поле зрения окуляра микрометра максимально отчетливую интерференционную картину – систему окрашенных полос с центральной белой полосой.
6. Поставьте на лампу светофильтр (зеленый, синий, оранжевый). Полосы станут одноцветными и число их увеличится.

2.2 ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ОКУЛЯРНЫМ МИКРОМЕТРОМ

В винтовом окулярном микрометре (рис.9а) вблизи фокальной плоскости окуляра ОК находится стеклянная пластина Пл с нанесенными на ней миллиметровыми делениями (рис.9б) и небольшая рамка Р с двойным штрихом и косым крестом. Рамка перемещается с помощью барабана с микрометрическим винтом. Один поворот барабана соответствует перемещению креста на 1 мм. Барабан разделен на 100 частей. Следовательно, цена деления его 0,01 мм.

Для определения ширины интерференционной полосы крест микрометра наведите на какую-нибудь темную полосу и снимите отсчет по шкале и барабану. Например, би-штрих находится между 5 и 6-м делением шкалы, а на барабане против нулевой отметки находится 33-е деление. Отсчет . Затем косой штрих переместите барабаном на 5-10 полос, вновь наведите на середину темной полосы и снимите отсчет по шкале и барабану. Например, пусть $n=10$ полос и $L=7,64$ мм. Тогда . В нашем примере $\Delta x=0,231$ мм.

2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ МНИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ.

Для определения между микрометром и бипризмой поместите объектив (линзу). Определение можно провести несколькими способами.

1 способ. Фокусное расстояние линзы должно быть известно. Придвинув объектив непосредственно к бипризме, найдите такое положение окуляр-микрометра, при котором в его поле зрения получится резкое двойное изображение щели (без параллакса относительно визирного креста). Измерьте не менее трех раз расстояние между серединами этих изображений и запишите положение объектива.

Затем отодвиньте окуляр-микрометр на конец скамьи и, перемещая объектив, опять получите резкое двойное изображение щели. Снова измерьте расстояние между этими изображениями и запишите новое положение объектива. Нетрудно показать, что где Δ - расстояние между двумя положениями объектива.