

Работа № 31

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Цель работы – изучение интерференционного метода измерения показателя преломления. Измерение показателя преломления плоско-параллельной стеклянной пластины.

Принцип действия интерферометра

Прибор, с помощью которого измеряется показатель преломления, называется рефрактометром. Рассмотрим рефрактометр, принцип действия которого основан на интерференции света – интерференционный рефрактометр. В нашей работе используется интерферометр Майкельсона. Интерферометр Майкельсона сыграл громадную роль в истории науки. В частности, с помощью такого интерферометра был осуществлен знаменитый опыт Майкельсона–Морли, целью которого было обнаружение движения Земли относительно эфира.

Схема интерферометра Майкельсона приведена на рис. 1. Стрелками показано направление распространения лучей. Световой пучок от источника света S падает на светоделитель $СД$ и разделяется на два пучка – 1 и 2 . Угол наклона светоделителя к оси падающего пучка равен 45° . Пучок 1 , отраженный от светоделителя, падает на плоское зеркало $З_1$, отражается от него ($1'$), частично проходит сквозь светоделитель ($1''$) и попадает на экран \mathcal{E} . Пучок 2 , прошедший светоделитель, падает на плоское зеркало $З_2$, отражается от него ($2'$), затем отражается ($2''$) от светоделителя и также попадает на экран \mathcal{E} . В области перекрытия пучков $1''$ и $2''$ на экране

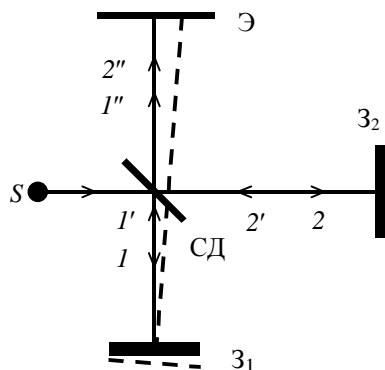


Рис. 1

наблюдается интерференционная картина.

Интенсивность света в каждой точке экрана зависит от разности фаз складываемых световых колебаний в данной точке. Для интерференционных измерений необходима высококонтрастная интерференционная картина, т.е. распределение интенсивности, в котором максимумы и минимумы достоверно отличаются от среднего фона. Такая картина получается, если, в идеале, излучение строго монохроматично, тогда разность фаз интерферирующих полей в каждой точке не зависит от времени. Такие поля называются когерентными.

Интерферирующие пучки проходят разные оптические пути. Под оптическим путем l_0 понимают путь, который прошел бы свет в вакууме за то же время, что и при прохождении геометрического пути l в среде с показателем преломления n :

$$t = l_0 / c = l / V = ln / c \Rightarrow l_0 = ln$$

В вакууме l и l_0 совпадают. Если на пути луча есть несколько участков с разными показателями преломления, то оптический путь на всем геометрическом пути равен сумме оптических путей на каждом из участков.

В курсе оптики [1, 2] показано, что если разность начальных фаз интерферирующих волн равна нулю, то разность фаз $\psi = \psi_2 - \psi_1$, возникающая при распространении волн, пропорциональна оптической разности хода лучей (разности оптических путей) $\Delta = l_{o2} - l_{o1}$:

$$\psi = \psi_2 - \psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения. Максимумы интенсивности света наблюдаются в том случае, когда разность фаз кратна 2π . В этом случае $\Delta = m\lambda$, $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

Если излучение немонахроматично, т.е. состоит из колебаний на разных частотах, то разность фаз в каждой точке нестационарна во времени. Если бы интерференционная картина регистрировалась с помощью быстрого фотоприемника (например, фотоаппарата с очень малым временем экспозиции), то на последовательности фотографий были бы видны контрастные интерференционные картины, однако от

снимка к снимку положение максимумов и минимумов хаотически бы менялось. Инерционный фотоприемник, например глаз, усредняет эти случайные колебания, и вместо интерференционной картины на экране зрительно наблюдается однородный «серый» фон. По этой причине невозможно наблюдать стационарную интерференционную картину полей двух разных источников излучения. Во всех интерферометрах два световых пучка получают от *одного* источника.

Если излучение квазимонохроматично, т.е. ширина спектра колебаний $\delta\lambda \ll \bar{\lambda}$, где $\bar{\lambda}$ – средняя длина волны спектра, то контрастная интерференционная картина наблюдается, если случайный сбой фазы намного меньше 2π . Для этого оптическая разность хода пучков должна быть намного меньше длины когерентности источника, т.е. такой разности хода волн, при которой интерференция исчезает. Длина когерентности непрерывного лазерного излучения составляет несколько метров минимум, тогда как оптическая разность хода пучков в данной лабораторной работе не превышает 1–2 см. Следовательно, необходимое условие для наблюдения контрастной интерференционной картины выполняется.

Если плавно изменять оптическую разность хода, то будут чередоваться максимумы и минимумы освещенности экрана. При изменении оптической разности хода на $\lambda/2$ светлое пятно сменится темным и т.п. Плавное изменение оптической разности хода на $N\lambda$ приведет к тому, что освещенность экрана пройдет через максимум (или минимум) N раз. Изменить оптическую разность хода в интерферометре Майкельсона можно, сместив одно из зеркал вдоль направления луча, или, при неподвижных зеркалах, изменив показатель преломления среды на пути одного из интерферирующих лучей. По такому принципу устроены высокоточные лазерные интерференционные измерители перемещений.

Однако для измерения показателя преломления интерферометр разъюстируют: одно из зеркал отклоняют на малый угол от нормали к оси падающего пучка (зеркало Z_1 на рис. 1, штриховая линия под зеркалом). Реально угол наклона составляет несколько угловых минут, т.е. существенно меньше показанного на рисунке. Вследствие разъюстировки пучки $1''$ и $2''$ не параллельны и на экране они перекрываются частично. Как известно из теории интерференции, при наложении монохроматических плоских волн с разными направлениями распространения наблюдается интерференционная картина в виде периодиче-

ской системы светлых и темных прямых полос, перпендикулярных к плоскости волновых векторов интерферирующих волн [1, 2]. Такая картина и будет наблюдаться на экране в области перекрытия пучков. При изменении разности фаз волн происходит сдвиг интерференционной картины как целого.

Примечание. Реальные волновые фронты – сферические поверхности, причем отклонение сферы от плоскости экрана в пределах диаметра пучка достигает $(20-30)\lambda$. Казалось бы, на экране должны наблюдаться интерференционные кольца Ньютона. Однако вид интерференционной картины определяется взаимным отклонением двух сферических поверхностей. Можно показать, что при малом угле разъюстировки интерференционная картина будет такой же, как и при интерференции плоских волн – система прямых полос.

Метод измерения

Между светоделителем и зеркалом Z_2 помещается стеклянная плоскопараллельная пластина толщины d с показателем преломления n (рис. 2). Нормаль к пластине и направление падающего луча составляют угол φ . При медленном повороте пластины постепенно изменяется угол φ и изменяется оптическая разность хода Δ .

Угол падения φ и угол преломления в пластинке φ' связаны законом преломления:

$$n_{\text{в}} \sin \varphi = n \sin \varphi', \quad (2)$$

где $n_{\text{в}} - 1 \approx 3 \cdot 10^{-4}$ – показатель преломления воздуха.

Каждый луч прошедшего пучка будет параллелен падающему: плоскопараллельная пластинка только смещает луч, не изменяя его угла наклона. Поэтому параллельный пучок лучей отразится по нормали от плоского зеркала вне зависимости от угла наклона пластинки и смещения пучка. Отраженный пучок пойдет обратно по тому же пути через пластинку и к светоделителю. Следовательно, оптический путь луча от светоделителя СД через пластинку до зеркала Z_2 и обратно равен

$$L_0 = 2(l_2 - AB + n AC). \quad (3)$$

Геометрическая длина хода в пластинке равна

$$AC = d / \cos \varphi' = d / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi'} = dn / \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}. \quad (4)$$

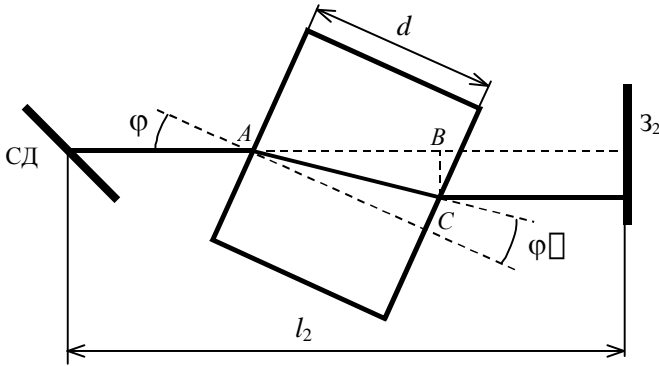


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что

$$AB = AC \cos(\varphi - \varphi') = AC(\cos \varphi \cos \varphi' + \sin \varphi \sin \varphi'). \quad (5)$$

Из (2) и (4) получаем

$$AB = AC \left(\cos \varphi \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} + \sin^2 \varphi \right) / n. \quad (6)$$

Подставив (4) и (6) в (3), получим выражение для оптического пути:

$$\begin{aligned} L_o &= 2 \left(l_2 - d \cos \varphi - \frac{d \sin^2 \varphi}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} + \frac{dn^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \right) = \\ &= 2 \left(l_2 + d \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - d \cos \varphi \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Начальное значение угла φ положим равным нулю. Тогда изменение оптического пути и соответственно изменение оптической разности хода интерферирующих пучков при повороте пластины равно

$$\begin{aligned} \delta &= L_o(\varphi) - L_o(0) = 2 \left(1 - \cos \varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - n \right) = \\ &= 2 \left(1 - \cos \varphi + n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{n^2}} - n \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Если при повороте пластины на угол φ происходит смещение интерференционной картины на N полос, то

$$\delta = N\lambda . \quad (9)$$

Воспользовавшись тригонометрическими формулами

$$1 - \cos \varphi = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad \sin^2 \varphi = 4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

и приближенными формулами

$$(1 - x)^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2}x, \quad \cos \frac{\varphi}{2} \approx 1 \quad \text{при } |\varphi| \ll 1,$$

выражение (8) и (9) можно записать в виде

$$4d \frac{n-1}{n} \sin^2 \frac{\varphi}{2} = N\lambda . \quad (10)$$

Из (10) получаем

$$\sqrt{N} = 2 \sqrt{\frac{(n-1)d}{n\lambda}} \sin \frac{\varphi}{2} \approx \sqrt{\frac{(n-1)d}{n\lambda}} \varphi , \quad (11)$$

где угол φ измеряется в радианах.

График зависимости числа полос \sqrt{N} от угла наклона нормали пластинки к оси пучка φ может быть построен на основании экспериментальных данных. Вид такого графика показан на рис. 3.

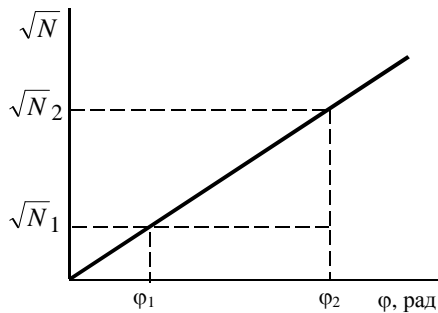


Рис. 3

Из формулы (11) следует, что угловой коэффициент k соответствующей прямой равен

$$k = \sqrt{\frac{(n-1)d}{n\lambda}}. \quad (12)$$

Если из графика, построенного на основании экспериментальных данных, угловой коэффициент k определен как

$$k = \frac{\Delta(\sqrt{N})}{\Delta\varphi} = \frac{\sqrt{N_2} - \sqrt{N_1}}{\varphi_2 - \varphi_1}, \quad (13)$$

то показатель преломления может быть вычислен по формуле, полученной из (12):

$$n = \frac{1}{1 - k^2\lambda/d}. \quad (14)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рефрактометр) состоит из интерферометра Майкельсона, плоскопараллельной пластины с неизвестным показателем преломления, поворотного держателя пластины и устройства отсчета угла поворота. Источником света в установке является гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм.

В качестве светоделителя в интерферометре используется призма-куб. Стекланный куб разрезан по диагональной плоскости и затем склеен так, что между гипотенузными гранями двух его половин образуется плоскопараллельный слой оптического клея. На границах стекло – клей световой пучок частично отражается, частично преломляется в другую половину куба. Толщина этого промежутка порядка 0,02 мм, поэтому смещение каждого пучка поперек оптической оси из-за преломления на плоскопараллельном слое намного меньше диаметра пучка. Параметры склеивающего слоя подбираются такими,

чтобы интенсивности прошедшего и отраженного света были примерно одинаковыми.

В начале работы пластина должна быть установлена перпендикулярно к падающему лучу. В дальнейшем угол поворота φ пластины отсчитывается от этого положения. Чтобы его определить, можно воспользоваться тем, что, как видно из рис. 2, при таком положении пластины минимален оптический путь луча как в пластине, так и в целом на участке светоделитель – зеркало Z_2 . При повороте пластины на угол φ как по часовой стрелке, так и против оптический путь увеличивается. Следовательно, в обоих случаях при увеличении угла поворота интерференционная картина будет смещаться в одну и ту же сторону. Поэтому вначале пластину устанавливают с отклонением от перпендикулярности на некоторый визуально заметный угол, а затем медленно его уменьшают. При этом замечают направление движения интерференционных полос. При переходе пластинкой перпендикулярного положения интерференционные полосы останавливаются, а затем, с ростом угла наклона пластинки, начинают двигаться в противоположном направлении. Именно для визуального определения перпендикулярного положения пластинки разъюстируют одно из зеркал интерферометра. Показание отсчетного устройства угла поворота пластины, соответствующее смене направления движения интерференционных полос, следует принять за начало отсчета.

Задания

1. Измерить ряд значений угла поворота пластины φ для $N = 4; 9; 16; 25 \dots 100$.
2. Построить график зависимости \sqrt{N} от φ .
3. Определить из графика угловой коэффициент прямой.
4. По формуле (14) определить показатель преломления n .

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Нарисовать оптическую схему интерферометра Майкельсона. Между какими пучками наблюдается интерференция?
3. Что такое оптическая длина пути? Как разность фаз интерферирующих волн зависит от их оптической разности хода? При какой разности хода наблюдается максимум (минимум) интерференционной картины?
4. Какой источник излучения называется монохроматическим, квазимонохроматическим?
5. Какие волны называются когерентными? Можно ли визуально наблюдать интерференцию волн от двух источников излучения?
6. Что такое длина когерентности? При каком условии можно наблюдать интерференцию волн от квазимонохроматического источника излучения?
7. Как получить на экране интерферометра Майкельсона интерференционную картину в виде параллельных полос?
8. Как по смещению интерференционной картины в зависимости от угла поворота пластины определить положение, когда пластина перпендикулярна к оси пучка?
9. Вывести формулу (14).
10. Какие предположения были приняты при выводе формулы (14)?

Литература

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4: Волны. Оптика. – М.: Астрель, 2001 (§ 4.5).
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики. 4-е изд. – М.: Высш. шк., 1997 (§ 171, 172, 175).