

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №46

ИЗУЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – экспериментальное подтверждение линейной зависимости показателя преломления газов от давления; определение показателя преломления воздуха в условиях опыта.

1. Теоретические основы работы

Классическая электронная теория дисперсии дает для газов при условии невысокого давления и при малых значениях затухания колебаний электронов следующее выражение для квадрата показателя преломления:

$$n^2 = 1 + \frac{e^2 n_0}{m \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; m – масса электрона; n_0 – концентрация молекул газа; ω_0 – частота собственных колебаний оптических электронов; ω – частота световой волны; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная. Поскольку при указанных условиях показатель преломления газов близок к единице, то

$$n^2 - 1 = (n + 1)(n - 1) \approx 2(n - 1)$$

и выражение (1) можно преобразовать таким образом:

$$n = 1 + \frac{e^2 n_0}{2m \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2)$$

Концентрация молекул может быть выражена через температуру и давление газа

$$n_0 = \frac{P}{kT}$$

и выражение (2) для показателя преломления газов может быть записано так

$$n = 1 + \frac{e^2 P}{2m \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2) kT}. \quad (3)$$

Следовательно, показатель преломления газов возрастает с ростом давления и уменьшается с ростом температуры. При постоянной температуре для данной частоты световой волны зависимость показателя преломления от давления можно представить в виде

$$n = 1 + B(\omega, T)P, \quad (4)$$

где $B(\omega, T)$ – константа, зависящая от частоты или длины волны света и температуры. Из выражения (4) следует, что при прочих неизменных условиях показатель преломления газов линейно зависит от давления.

Измерение показателя преломления газов, жидкостей и прозрачных твердых тел с высокой точностью возможно интерферометрическим методом.

В лабораторной работе для измерения показателя преломления воздуха используется интерферометр Майкельсона, отличающийся от классического тем, что оба его зеркала неподвижны. Принципиальная оптическая схема интерферометра приведена на рис. 1. Пучок света от источника I попадает на светоделительный кубик CD , где он расщепляется на два луча 1 и 2 . Луч 1 , продолжая и после прохождения через кубик CD распространяться в

прежнем направлении, попадает на зеркало Z_1 . После отражения от этого зеркала и второго отражения в светоделительном кубике CD он распространяется по направлению наблюдения H . Луч 2 после выхода из светоделительного кубика достигает зеркала 2, отражается от него

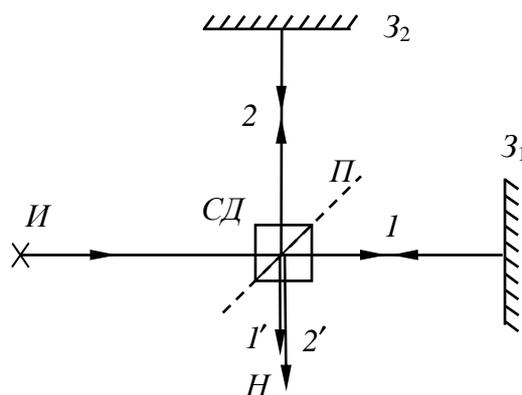


Рис. 1 Оптическая схема интерферометра Майкельсона

назад и через светоделительный кубик идет также по направлению наблюдения H .

Легко видеть, что световые волны в лучах 1 и 2, распространяющиеся по направлению наблюдения H , будут иметь между собой разность фаз, при условии, что оптические длины плеч интерферометра не равны друг другу. Плечами интерферометра принято называть расстояния от светоделительного элемента до зеркал прибора. При соблюдении условий временной и пространственной когерентности лучей $1'$ и $2'$ возможно возникновение интерференционной картины в приборе Майкельсона. Эту картину можно наблюдать на экране, если поместить собирающую линзу на пути лучей, распространяющихся в направлении наблюдения.

Заметим, что светоделительный кубик не вносит дополнительной оптической разности хода, поскольку от точки разделения до точки встречи оба луча проходят в стекле кубика одинаковое расстояние.

При освещении интерферометра параллельным пучком монохроматического света наблюдаемая интерференционная картина представляет собой полосы равной толщины, цвет которых определяется длиной волны излучения. На рис. 2 представлена оптическая схема, поясняющая возникновение полос равной толщины.

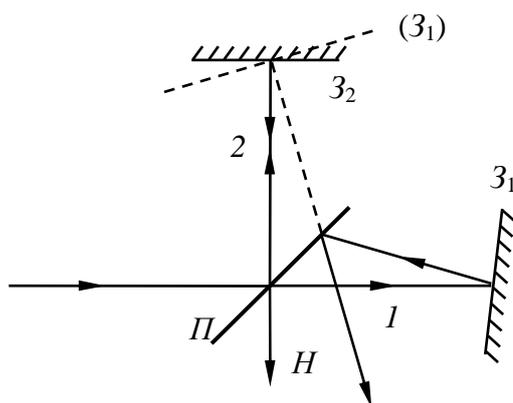


Рис. 2 Отражение зеркала Z_1 в полупрозрачном зеркале

Если плоскости зеркал Z_1 и Z_2 не перпендикулярны друг другу (а именно такой случай реализуется на практике), то ход луча, отраженного от зеркала Z_1 таков, что он кажется отраженным от изображения этого зеркала (Z_1) в полупрозрачной поверхности Π светоделительного кубика. Поверхности зеркала Z_2 и изображения первого зеркала (Z_1) образуют двугранный угол. Другими словами, между зеркалами возникает воздушный клин, толщина которого определяется наклоном зеркал и разностью оптических длин плеч

интерферометра. Клинь позволяет реализовать условия, необходимые для наблюдения интерференционной картины полос равной толщины – в нашем случае полос, параллельных ребру клина. Эта картина локализуется на поверхности клина, т. е. на «поверхности зеркал» или вблизи них, в зависимости от толщины клина. Наблюдение этой интерференционной картины осуществляется либо глазом, аккомодированным на поверхность клина, либо через оптическую систему, дающую изображение на экране.

Для определения зависимости показателя преломления воздуха от его давления в плечо 2 интерферометра вводят кювету K – металлический цилиндр, торцы которого герметически

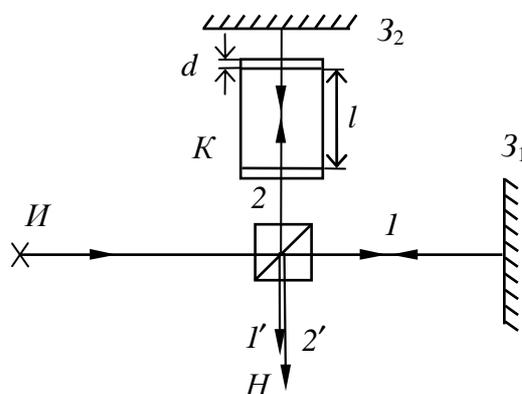


Рис. 3 Схема интерферометра с кюветой

закрываются стеклянными пластинками (см. рис. 3). Расстояние между внутренними поверхностями стекол является длиной кюветы l . Будем считать, что плечи интерферометра (расстояния от зеркал до центра светоделительного кубика) равны. Если обозначить показатель преломления воздуха при атмосферном давлении $n_{ат}$, а показатель преломления воздуха при давлении в кювете $n_{к}$, толщину стеклянных пластинок d , а показатель преломления стекла $n_{ст}$, то оптическая разность хода интерферирующих волн $\Delta_{опт}$ может быть записана так

$$\Delta_{опт} = 2l(n_{к} - n_{ат}) + 4d(n_{ст} - n_{ат}).$$

Запишем оптическую разность хода для двух значений давления воздуха в кювете:

$$\Delta_{опт2} = 2l(n_{к2} - n_{ат}) + 4d(n_{ст} - n_{ат}),$$

$$\Delta_{опт1} = 2l(n_{к1} - n_{ат}) + 4d(n_{ст} - n_{ат}).$$

Тогда изменение оптической разности хода при изменении давления воздуха в кювете

$$\Delta_{опт2} - \Delta_{опт1} = 2l(n_{к2} - n_{к1}) \quad (5)$$

зависит только от изменения показателя преломления воздуха.

При плавном изменении давления в кювете, а, значит, и оптической разности хода в наблюдаемой интерференционной картине происходит смещение полос. Число сместившихся полос Δm определяется условием

$$\Delta_{опт2} - \Delta_{опт1} = \Delta m \lambda, \quad (6)$$

где λ - длина волны света, освещающего интерферометр.

Из выражений (5) и (6) получим

$$2l(n_{к2} - n_{к1}) = \Delta m \lambda,$$

откуда

$$n_{к2} - n_{к1} = \frac{\Delta m \lambda}{2l}. \quad (7)$$

Таким образом, интерферометр Майкельсона позволяет измерить разность показателей преломления воздуха Δn , соответствующую разности давлений Δp в кювете:

$$\Delta n = (n_{к} - n_{ат}) = \Delta m \frac{\lambda}{2l}, \quad (8)$$

где $n_{ат}$ – показатель преломления при атмосферном давлении $p_{ат}$; n_k – показатель преломления при избыточном давлении воздуха в кювете p_k ; λ – длина волны лазерного излучения в вакууме; l – длина кюветы, Δm – число сместившихся интерференционных полос при изменении давления в кювете от p_k до $p_{ат}$.

В тоже время из формулы (4) следует, что для данного спектрального состава излучения при постоянной температуре изменение показателя преломления воздуха прямо пропорционально изменению давления

$$\Delta n = B(\omega, T) \Delta P. \quad (9)$$

Определим по формуле (8) значения Δn для различных разностей давлений и построим график $\Delta n = f(\Delta p)$. Из формулы (9) видно, что эта зависимость линейная и описывается уравнением прямой, выходящей из начала координат

$$y = Bx,$$

где $y = \Delta n$; $x = \Delta p$. Угловым коэффициентом в уравнении прямой является коэффициент $B(T)$, входящий в формулу (9). Угловым коэффициентом можно определить графически или с помощью аналитической аппроксимации. Теперь, зная значение коэффициента B , по формуле (4) можно рассчитать значение показателя преломления при любом заданном давлении.

Значение показателя преломления воздуха для данной длины волны, найденное экспериментально в условиях опыта, можно привести к нормальным условиям, используя соотношение

$$\frac{n_0 - 1}{n - 1} = \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p}, \quad (10)$$

где n_0 – значение показателя преломления при нормальных условиях; n – значение показателя преломления в условиях опыта; $p_0 = 760$ мм рт ст и $T_0 = 293,15^\circ$ К – нормальные давление и температура.

2. Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на интерферометре Майкельсона (лабораторный оптический комплекс ЛОК-3), схема которого представлена на рис. 4. Два зеркала интерферометра $З_1$ и $З_2$ закреплены в неподвижных оправах, ориентация плоскостей зеркал изменяется с помощью регулировочных винтов I .

Для разделения светового пучка на два используется светоделительный кубик 2. Светоделительный кубик изготавливают, разрезая стеклянный кубик по диагонали и

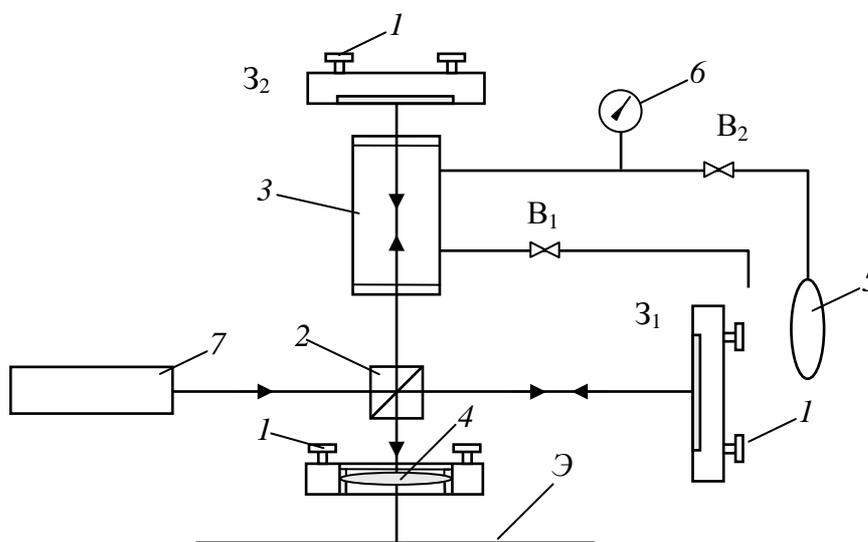


Рис. 4 Схема экспериментальной установки

склеивая обе части так, что поверхность склейки становится полупрозрачной, т. е. частично отражает и частично пропускает падающий на нее свет. Во втором плече интерферометра размещается оптическая кювета 3 с исследуемым газом, в данном случае с воздухом. Кювета имеет два штуцера, к которым подсоединены шланги. Интерференционная картина наблюдается на экране Э, на который она проецируется собирающей линзой 4 с некоторым увеличением. Избыточное давление воздуха в кювете создается резиновым насосом 5 и измеряется манометром 6. Вентили В₁ и В₂ позволяют изолировать кювету от окружающей среды. Интерферометр освещается квазимонохроматическим излучением лазера 7. Лазерное излучение характеризуется высокой степенью временной и пространственной когерентности, что обеспечивает возможность наблюдения интерференционной картины при больших оптических разностях хода двух волн.

3. Порядок выполнения работы

1. Заполните табл. 1 спецификации измерительных приборов, запишите данные установки и условия опыта.

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

Название прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность

Данные установки: длина волны излучения лазера $\lambda = 632,8$ нм;
длина кюветы $l = 57,0$ мм.

Перевод показаний манометра в избыточное давление: $\Delta p = (125 - N) \cdot 3$ мм рт ст

Условия опыта: температура окружающей среды $T =$ К
атмосферное давление $p =$ мм рт ст

2. Включите лазер и убедитесь, что на экране Э наблюдаются два пятна красного цвета, соответствующие лучам, отраженным от зеркал З₁ и З₂ интерферометра. Плавно вращая регулировочные винты зеркала З₁, добейтесь совмещения пятен. В области перекрытия световых пучков возникнет интерференционная картина в виде параллельных полос красного цвета. Направление интерференционных полос для проведения измерений не имеет значения. Если интерференционные полосы очень широкие и это затрудняет измерения, то попытайтесь добиться уменьшения их ширины, осторожно вращая регулировочные винты зеркала З₁.

3. В интервале избыточного давления воздуха в кювете от 20 до 110 единиц по показания манометра проведите измерение числа сместившихся интерференционных полос при изменении давления в кювете от избыточного до атмосферного, для чего

– закройте вентиль В₁ и откройте вентиль В₂;

– насосом 5 накачайте воздух в кювету так, чтобы показания манометра установились на 20 делениях и закройте вентиль В₂. Показания манометра запишите в табл.2.

– осторожно и плавно откройте вентиль В₁ и одновременно начинайте подсчет числа интерференционных полос, пересекающих какую-либо метку на экране. Когда давление в кювете достигнет атмосферного давления, интерференционные полосы перестают перемещаться. Запишите число Δm сместившихся полос в табл.2;

– повторите измерения, каждый раз устанавливая избыточное давление в кювете по показаниям манометра на 10 единиц больше.

Таблица 2

Измерение зависимости числа сместившихся интерференционных полос от избыточного давления в кювете

N , дел	Δp мм рт ст	Δm	Δn

4. Обработка результатов измерений

1. Пересчитайте показания манометра в избыточное давление Δp , выраженное в мм рт ст.
1. По формуле (8) рассчитайте изменение показателя преломления воздуха Δn для каждого значения избыточного давления.
2. Постройте график зависимости Δn от Δp , имея в виду, что график представляет собой прямую, выходящую из начала координат.
3. Используя графическую или аналитическую аппроксимацию, определите угловой коэффициент B уравнения прямой (9).
4. По формуле (4) рассчитайте значение показателя преломления воздуха при атмосферном давлении в условиях опыта.
5. Рассчитайте погрешность определения показателя преломления в условиях опыта.
6. Запишите окончательный результат в стандартном виде, указав длину волны света, температуру воздуха и атмосферное давление.
7. По формуле (10) приведите значение показателя преломления воздуха для данной длины волны к нормальным условиям.

Расчет погрешности измерений

Расчетная формула для определения показателя преломления имеет вид

$$n(p, T) = 1 + B(T)p.$$

Абсолютная погрешность показателя преломления можно вычислить по формуле

$$\Delta n = \Delta(Bp) = \delta_{(Bp)} Bp,$$

где $\delta_{(Bp)}$ – относительная погрешность произведения Bp равна

$$\delta_{(Bp)} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_p^2},$$

где δ_B – относительная погрешность определения коэффициента B ; δ_p – относительная погрешность измерения атмосферного давления.

5. Контрольные вопросы

1. От каких физических величин, и каким образом зависит показатель преломления газов?
2. Как показатель преломления газов зависит от давления?
3. Нарисуйте оптическую схему интерферометра Майкельсона и объясните назначение всех его элементов.
4. Чем обеспечена высокая пространственная и временная когерентность интерферирующих световых пучков?
5. Какой тип интерференционной картины наблюдается в лабораторной работе – линии равной толщины или линии равного наклона?
6. Объясните, почему при изменении давления в кювете происходит смещение полос в интерференционной картине. В каком направлении перемещаются интерференционные полосы при изменении давления в кювете?
7. Как зависит ширина интерференционных полос от угла между плоскостями зеркал интерферометра?

ПРИЛОЖЕНИЕ

ГОСТ 8.395-80

Нормальный воздух - воздух при температуре 20° С, атмосферном давлении 101324,72 Па, с объемной долей азота 78,10%, кислорода 20,95%, аргона 0,93%, углекислого газа 0,03%, парциальном давлении водяных паров 1333,22 Па (относительная влажность с учетом округления - 58%). Плотность нормального воздуха - 1,20 кг/м³; показатель преломления $n_n = 1,00027159$ для первичной эталонной длины волны $\lambda_n = 605,61574$ нм и $n_n = 1,00027259$ - для вторичной эталонной длины волны $\lambda_n = 546,07819$ нм.

Состав воздуха:

Элемент	Обозначение	По объёму, %	По массе, %
Азот	N ₂	78,084	75,50
Кислород	O ₂	20,9476	23,15
Аргон	Ar	0,934	1,292
Углекислый газ	CO ₂	0,0314	0,046
Неон	Ne	0,001818	0,0014
Метан	CH ₄	0,0002	0,000084
Гелий	He	0,000524	0,000073
Криптон	Kr	0,000114	0,003
Водород	H ₂	0,00005	0,00008
Ксенон	Xe	0,0000087	0,00004
Вода	H ₂ O	?	?

Необходимо отметить, что состав воздуха может меняться: в крупных городах содержание углекислого газа будет выше, чем в лесах.

Кроме того воздух всегда содержит пары воды. Так, при температуре 0 °С 1 м³ воздуха может вмещать максимально 5 граммов воды, а при температуре +10 °С – уже 10 граммов.