

приходящихся на 1 мм длины решетки.

3. Оценить погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
2. Чем отличается дифракция Фраунгофера от дифракции Френеля?
3. В чем заключается метод зон Френеля?
4. Как изменяется дифракционная картина, если поворачивать дифракционную решетку относительно луча?
5. Как изменяется дифракционная картина от щели при изменении ширины щели?
6. Чем отличаются дифракционные картины белого и монохроматического света?
7. Объяснить изменения в дифракционной картине при изменении числа щелей дифракционной решетки.
8. Записать условие минимумов и максимумов при дифракции на щели.

506. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

506.1. Цель работы

Измерение показателя преломления газов с помощью интерферометра.

506.2. Разделы теории

Интерферометры [1. Гл. 22, §175]; [2. Гл. XVII, §123,124]; [3. Гл.4, 4.5,4.6].

506.3. Приборы и принадлежности

Интерферометр L1-3 (интерферометр Релея), манометри-

ческая система.

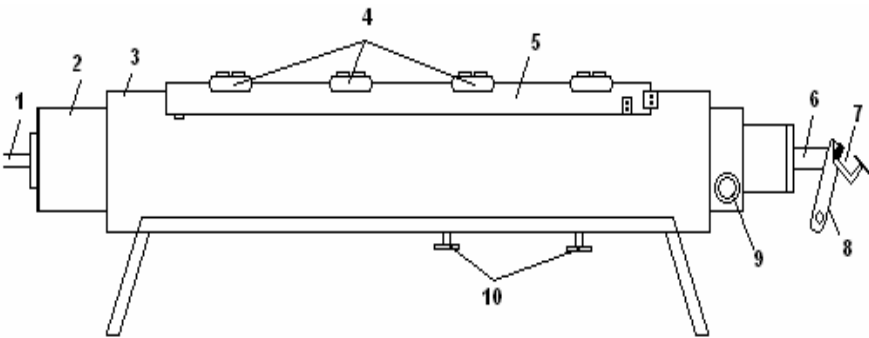
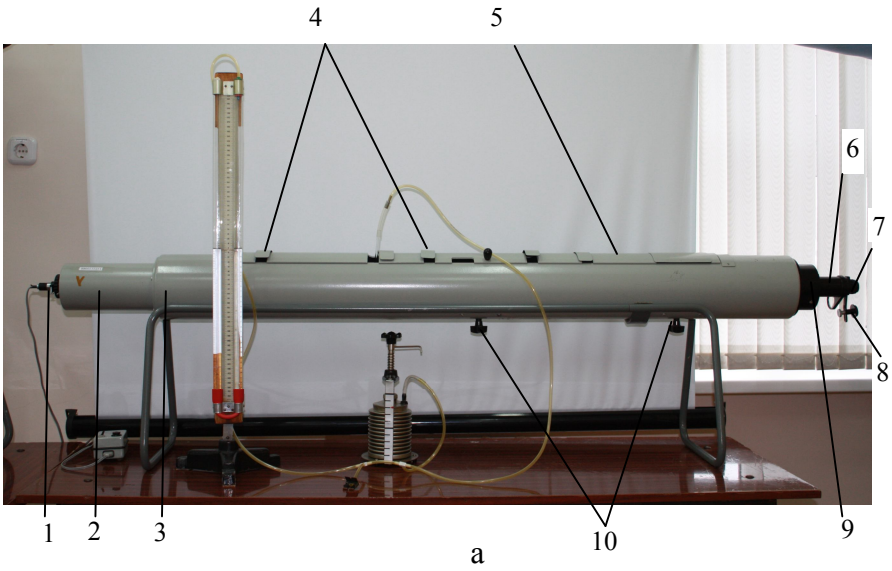
506.4 Описание установки

Интерферометр Релея (LI-3) является прецизионным прибором для измерения показателей преломления газов и жидкостей. Чувствительность прибора позволяет измерять изменения показателя преломления до 8-го десятичного знака. Интерферометр применяется также для определения примесей различных газов в воздухе. Внешний вид интерферометра показан на рис. 506.1.

В интерферометре Релея используется дифракция Фраунгофера на двух щелях. Оптическая схема интерферометра показана на рис. 506.2.

Свет от источника 1 освещает вертикальную входную щель 2, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора 3. Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, падает на диафрагму 4 с двумя щелями. Прошедший через эти щели свет получен разделением фронта волны одного светового пучка, вышедшего из одного источника. Щели являются когерентными источниками света, а испускаемые ими световые волны – когерентными волнами. Дифрагированные от этих щелей световые пучки перекрываются в фокальной плоскости объектива 6, в которой и создается интерференционная картина – чередующиеся темные и спектральные полосы, расположенные симметрично относительно центральной белой полосы.

Из рис. 506.2,а видно, что верхняя часть пучков проходит через двойную кювету 5, а нижняя – проходит под кюветой непосредственно в объектив 6. Обе системы полос рассматриваются с помощью окуляра 7, представляющего собой сильную цилиндрическую линзу. (Цилиндрическая линза обеспечивает фокусировку лучей, расходящихся в горизонтальной плоскости, но не дает вертикальной фокусировки.)



б
Рис. 506.1

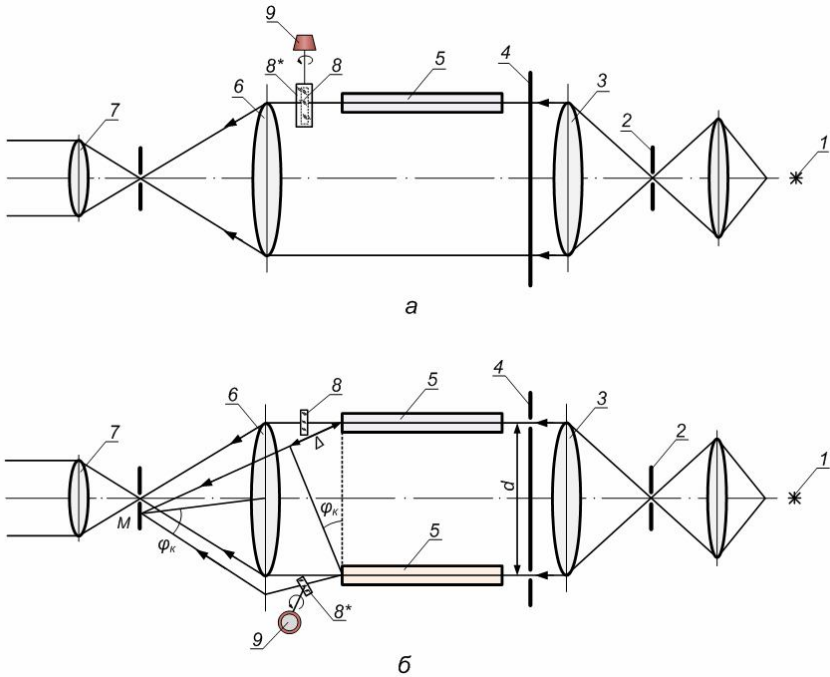


Рис. 506.2

На рис. 506.3 показаны системы интерференционных полос, наблюдаемых в окуляре 7: а – системы полос полностью совмещены; б – верхняя система полос смещена относительно нижней.

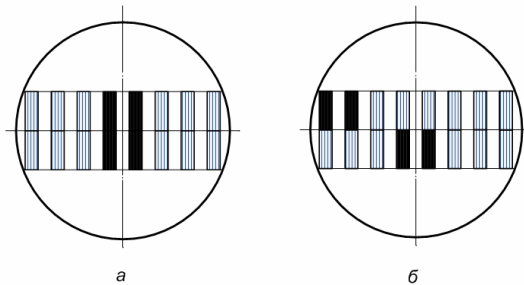


Рис. 506.3

Интерференционные максимумы определяются оптической

разностью хода $\Delta = \pm k\lambda$, где k – порядок интерференции, λ – длина световой волны.

Когда оптическая разность хода в отделениях кюветы равна нулю (кювета заполнена воздухом при одинаковых давлении и температуре), обе системы полос совпадают друг с другом. В центре поля зрения возникает нулевой максимум (светлая полоса), далее симметрично расположены максимумы более высоких порядков (спектрально окрашенные полосы). Если в одном из отделений кюветы изменится давление газа (воздуха) и, следовательно, его показатель преломления, то появится дополнительная разность хода. Она зависит от разности показателей преломления газов $\delta n = (n_2 - n_1)$ и от длины кюветы l . Оптическая разность хода для лучей, образующих верхнюю систему полос, выразится следующим образом:

$$\Delta' = \Delta + l\delta n = d \sin \varphi_k + l\delta n,$$

где d – расстояние между щелями, φ_k – угол дифракции интерферирующих лучей (в центре $\varphi_0 = 0$), $l\delta n$ – дополнительная разность хода, возникающая из-за существования разности показателей преломления δn газов в отделениях кюветы.

Нижняя система интерференционных полос образована световыми пучками, проходящими ниже двойной кюветы. В точке М (см. рис. 506.2,б) разности хода Δ' в верхней системе полос будет соответствовать разность хода $\Delta = d \sin \varphi_k = k\lambda$ в нижней системе полос. Смещение интерференционной картины на одну полосу соответствует изменению оптического хода лучей на одну длину волны. Отметив смещение на k полос, можно записать:

$$l(n_2 - n_1) = l\delta n = k\lambda. \quad (506.1)$$

Смещение может происходить и не на целое число полос. В этом случае k будет дробным числом. При измерениях нижняя система интерференционных полос остается неподвижной и служит индексом, по которому производится отсчет смещения верхней системы полос.

Для измерения смещения полос служат компенсационные пластины 8 (компенсатор Жамена) на рис. 506.2,б. Одна из них неподвижна, другая может поворачиваться вокруг вертикальной оси с помощью поворотного рычага. Положение рычага можно изменять, вращая измерительный барабан 9. Поворот пластины изменяет ее эффективную толщину, следовательно, вносимая ею дополнительная разность хода будет полностью компенсировать разность хода лучей Δ' в отделениях кюветы. Обе системы полос, верхняя и нижняя, будут полностью совпадать друг с другом $\Delta' = \Delta$.

Внешний вид интерферометра LI-3 показан на рис. 506.1. К трубчатому корпусу 3 привинчен коллиматор 2 с защитным колпаком и ламповым патроном 1. Внутри корпуса имеются гнёзда для крепления двойных измерительных кювет при помощи крепёжных винтов 10. На другом конце трубчатого корпуса находится оптическая система наблюдения с измерительным устройством (рис. 506.4). Интерференционная картина наблюдается в окуляре 7. Отсчёты производятся по измерительному барабану компенсатора 9, используя лупу 8.

Шкала 12 измерительного барабана компенсатора имеет 100 делений. Один полный оборот измерительного барабана соответствует 100 единицам интерферометрической величины i . Число оборотов барабана считывается по горизонтальной шкале 11, имеющей 30 делений. Перед началом измерений следует определить начало отсчета (деление барабана, при котором системы полос совмещены). Затем необходимо проградуировать измерительный барабан компенсатора. Градуировка проводится в длинах волн с использованием монохроматического светофильтра.

При измерениях крышка 5 корпуса (рис.506.1) должна быть закрыта. Трубки для подвода исследуемых газов проходят через соответствующие выемки и закрываются задвижками 4 (рис.506.1). В левом отделении кюветы находится эталонный газ (воздух) и давление в нем всегда равно атмосферному. В правом отделении кюветы давление воздуха меняется. Изменение дав-

ления производится с помощью сиффона, соединенного трубкой с правой частью кюветы.

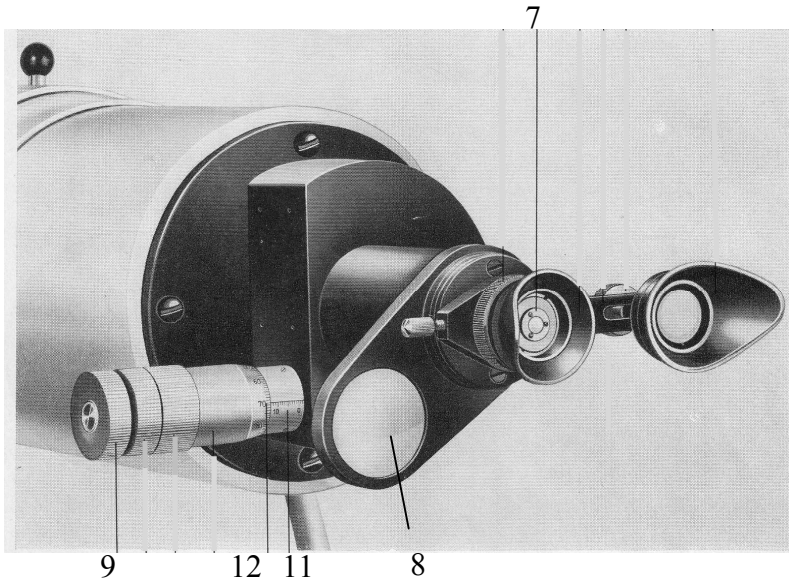


Рис.506.4

Сиффон 1 (рис. 506.5) представляет собой сосуд переменного объема. Вращая рукоятку, можно уменьшать или увеличивать объем сиффона, при этом соответственно будет увеличиваться или уменьшаться давление в соединенном с ним отделении кюветы 4.

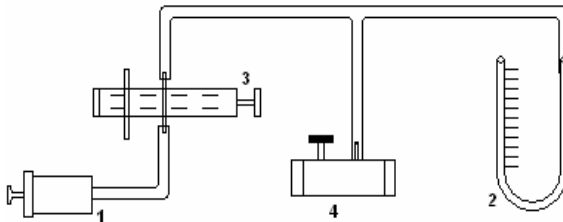


Рис. 506.5

Клапан 3 позволяет выравнивать давление в кювете и

сильфоне с атмосферным. Давление измеряется жидкостным (водяным) манометром 2, цена деления шкалы равна 1 мм вод. ст.

506.5. Изучение зависимости коэффициента преломления газа от давления и температуры

Коэффициент преломления газа связан с его плотностью соотношением

$$n - 1 = 2\pi N\alpha, \quad (506.2)$$

где N – число молекул в единице объема, α – поляризуемость молекулы.

С другой стороны

$$p = NKT, \quad (506.3)$$

где K – постоянная Больцмана. Из формул (506.2) и (506.3) имеем

$$n - 1 = \frac{2\pi\alpha}{KT} p. \quad (506.4)$$

Из (506.4) следует, что при постоянной температуре изменение показателя преломления Δn и изменение давления Δp связаны зависимостью

$$\Delta n = \frac{2\pi\alpha}{KT} \Delta p. \quad (506.5)$$

Величина Δn измеряется с помощью интерферометра, Δp – с помощью манометра. Одновременное измерение этих величин (и температуры) позволяет определить поляризуемость молекул воздуха и, следовательно, рассчитать коэффициент преломления воздуха для любых значений p и T по формуле (506.4). Следует отметить, что воздух является смесью нескольких газов; поэтому под поляризуемостью молекул воздуха нужно понимать некоторую среднюю величину, определяемую соотношением

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i \alpha_i N_i, \quad (506.6)$$

где α_i и N_i – поляризуемость и концентрация молекул различных газов, входящих в состав воздуха, N – общее число молекул в единице объема.

Формула (506.4) позволяет установить связь коэффициента преломления газа n при температуре T и давлении p с коэффициентом преломления воздуха n_0 при нормальных условиях ($T_0 = 273^0 K, p_0 = 1,013 \cdot 10^5 Pa$):

$$n - 1 = (n_0 - 1) \frac{T_0 p}{T p_0}. \quad (506.7)$$

506.6 Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Записать показания барометра P'_a и термометра t' , показывающие температуру и атмосферное давление в лаборатории.

2. Открыть крышку корпуса прибора и убедиться в наличии и целостности кюветы для газа длиной 0,5 м (0,25 м). Красная маркировочная точка на кювете должна быть обращена к окуляру. Левое отделение кюветы открыто в атмосферу, а правое соединено трубками с системой изменения давления (сильфоном и манометром).

3. При открытом клапане 3 увеличить объем сильфона до красной отметки по шкале, вращая винт сильфона против часовой стрелки.

4. Включить тумблер блока питания лампы интерферометра. Закрывать аккуратно крышку интерферометра.

5. Наблюдая в окуляр, рассмотреть интерференционную картину – верхнюю и нижнюю системы полос. Окуляр можно сфокусировать, поворачивая накатанное кольцо окуляра.

Внимание! Вращение микрометрического винта барабана компенсатора следует совершать медленно. При этом естественный люфт микрометрического винта будет минимален.

6. Наблюдая интерференционную картину через окуляр, вращением микрометрического винта 9 привести системы верх-

них и нижних полос к полному совмещению по центральной нулевой полосе и по двум центральным тёмным полосам (см. рис. 506.3,а). **Очень важно**, чтобы верхние полосы соответствовали нижним и по цвету, и по освещенности.

7. Снять отсчет по измерительному барабану компенсатора. Нулевое деление шкалы барабана должно совпадать с нулевым делением горизонтальной шкалы. При отсутствии совпадения «0», операцию совмещения верхней и нижней систем полос провести 4 – 5 раз, нарушая совмещение полос и вновь восстанавливая его (допустимы отклонения в пределах 10 делений).

Записать результаты определения «нулевого деления», вычислить среднее значение N_0 . Среднее значение N_0 необходимо вычитать из каждого отсчета интерферометрического числа i при измерениях. Интерферометрическое число i – есть отсчет по барабану компенсатора, полученный при смещении полос.

8. Выполнить калибровку шкалы микрометрического винта барабана компенсатора в длинах волн монохроматического света ($\lambda = 5,7 \cdot 10^{-7}$ м).

Надеть на окуляр насадку со светофильтрами. Проверить видимость интерференционной картины через «белый светофильтр». Затем, поворачивая кассету по часовой стрелке, установить зеленый светофильтр. В окуляре видна отчетливая интерференционная картина в монохроматическом свете.

Снять градуировочный график (график зависимости интерферометрического числа i от смещенных полос k).

Для этого, вращая микрометрический винт против часовой стрелки, последовательно совместить первую, вторую, и т.д. (до 6–7 полос) подвижные верхние светлые полосы с нулевой нижней неподвижной полосой. Записать соответствующие отсчеты по барабану i в таблицу. Провести измерения в обратном направлении, усреднить полученные значения числа i и построить график $i_{cp} = f(k)$. График вычертить на миллиметровой бумаге в возможно большем масштабе.

9. Убрать насадку со светофильтрами. Проверить совмещение систем полос в окуляре, положение нуля шкалы бараба-

на. Присоединить сиффон и манометр к кювете, закрыв клапан 3 (см. рис. 506.5, уровни жидкости в обоих столбиках манометра должны быть на нулевой отметке).

10. Плавно поворачивая винт сиффона по часовой стрелке, создать в правом отделении кюветы избыточное давление (Δp) в 10 мм вод. ст. (см. вклейку «Измерение давления жидкостным манометром»). Подождать 1–2 минуты для установления температуры, произвести совмещение систем интерференционных полос. По шкале барабана компенсатора взять отсчёты числа i .

Продолжить измерения, увеличивая давление в кювете с шагом 10 мм вод. ст. до давления 100 мм вод. ст. Значения избыточных давлений (Δp) и соответствующие отсчёты числа i записать в таблицу.

Измерения повторить 3 раза для тех же значений избыточного давления и рассчитать среднее значение интерферометрического числа i_{cp} для каждого значения давления (Δp).

11. По окончании измерений выровнять давление в кювете с атмосферным, открыв клапан 3. Увеличить объем сиффона до исходного значения (красной отметки на шкале). Совместить системы полос в окуляре. Выключить осветитель интерферометра.

12. С помощью градуировочного графика определить число сместившихся полос k для каждого значения избыточного давления (Δp). Вычислить изменение показателя преломления δn для каждого значения избыточного давления (Δp), используя формулу (506.1), в которой: k – число сместившихся интерференционных полос; $\lambda = 5,7 \cdot 10^{-7}$ м – средняя длина волны видимого света; $l = 0,5$ м – длина кюветы.

13. По полученным результатам построить графики зависимостей $\delta n = f(\Delta p)$, $\delta n = f(P)$, $n = f(P)$ (по указанию преподавателя).

14. Используя график зависимости $\delta n = f(\Delta p)$, вычислить по формуле (506.5) среднюю поляризуемость α молекул возду-

ха.

Средняя поляризуемость α молекул воздуха равна тангенсу угла наклона графика $\delta n = f(\Delta p)$ к оси Δp

$$\alpha = \frac{\Delta n}{\Delta p}.$$

15. Определить коэффициент преломления воздуха n при условиях опыта (506.4).

16. Определить значение коэффициента преломления воздуха n_0 при нормальных условиях (506.7).

17. Проанализировать полученные экспериментальные результаты, оценить погрешности измерения δn и k , сделать выводы.

Справочные данные:

K – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

1 атмосфера = 101325 Па = $1,013 \cdot 10^5$ Па; 1 бар = 10^5 Па;

1 мм рт. ст. = 133,3 Па; 1 мм вод. ст. = 9,81 Па;

$n_0 = 1,000292$ – показатель преломления воздуха при нормальных условиях.

Контрольные вопросы

1. Каким способом получают когерентные источники в исследуемом интерферометре?

2. Какая картина будет наблюдаться, если щель 2 (см. рис. 506.2) заменить малым круглым отверстием?

3. Почему тёмные полосы, наблюдаемые в интерферометре, имеют цветные каёмки?

4. Какая картина будет наблюдаться, если использовать монохроматический источник?

5. Точность совмещения полос в данном приборе равна приблизительно $1/30$ ширины полосы. Какова при этом погрешность в определении разности показателей преломления газа в кюветах?