

Лабораторная работа 4.2.3

Интерферометр Релея

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

1 Цель работы:

Ознакомление с интерференцией на двух щелях, устройством и принципом действия интерферометра Релея и с его применением для измерения показателей преломления газов.

2 Оборудование:

Технический интерферометр ИТР-1, светофильтр, баллон с углекислым газом, сильфон, манометр, краны.

3 Теоретическая справка

Зависимость показателя преломления газа от давления и температуры. Воспользуемся известной формулой диэлектрической проницаемости ε для газа невзаимодействующих диполей:

$$\varepsilon = n^2 = 1 + 4\pi N\alpha,$$

где N - концентрация молекул, α - поляризуемость молекулы (в ед. СГС). Эта формула справедлива для разреженных газов, и коэффициент преломления их мало отличается от единицы. Учитывая зависимость давления P газа от температуры $P = Nk_B T$, где k_B - константа Больцмана, получим соотношение

$$n - 1 \approx \frac{\alpha}{2k_B T} P.$$

Тогда для разности показателей преломления $\delta n = n_2 - n_1$, измеряемой с помощью интерферометра Релея, и разности давлений δP , измеряемой с помощью манометра, имеем простое соотношение:

$$\delta n = \frac{\alpha}{2k_B T} \delta P.$$

4 Экспериментальная установка

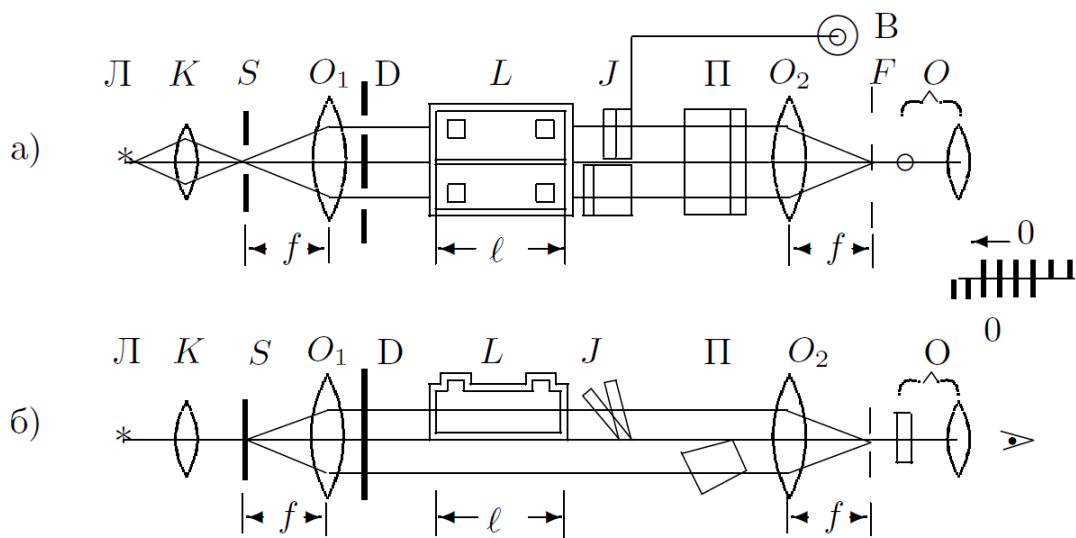


Рис. 1. Устройство интерферометра Релея:
а) вид сверху; б) вид сбоку

Интерферометр Релея - прибор для измерения разности показателей преломления - основан на явлении дифракции света на двух параллельных щелях. Схема прибора представлена на рис. 1 в вертикальной и горизонтальной проекциях. Лампа накаливания Л с помощью конденсора К ярко освещает узкую входную щель S, расположенную в фокусе объектива O_1 (фокусное расстояние f). Коллиматор, состоящий из щели S и объектива O_1 , посылает параллельный пучок на диафрагму D с двумя вертикальными щелями (расстояние между щелями d). Свет после двойной щели проходит кювету L, состоящую из двух одинаковых стеклянных камер, в которые вводятся исследуемые газы (в нашей установке - CO_2 или воздух). Кювета занимает только верхнюю часть пространства между объективами O_1 и O_2 , длина кюветы ℓ . За кюветой расположены две стеклянные пластинки J (компенсатор Жамена, см. ниже) и пластинка П.

Интерференционная картина (картина дифракции на двух щелях), наблюдаемая в фокальной плоскости F объектива O_2 , представляет собой две системы равноотстоящих полос, параллельных щелям: верхняя (подвижная) образована лучами, прошедшими через кювету, нижняя (неподвижная) - лучами, прошедшими под кюветой. Обе системы интерференционных полос разграничены при помощи пластины П тонкой разделительной линией. Для наблюдения двух систем полос в окуляре применена цилиндрическая линза диаметром 2,2 мм, ось которой расположена вертикально. Вторая («глазная») линза окуляра - обычная сферическая. Она служит для подстройки чёткости картины под глаз наблюдателя.

При малых дифракционных углах $\varphi = \lambda/d$ расстояние между соседними светлыми (или тёмными) полосами δy зависит от длины волны λ , фокусного расстояния f

объектива O_2 и расстояния между дифракционными щелями d :

$$\delta y = f \frac{\lambda}{d}.$$

В техническом интерферометре ИТР-1, который используется в нашей работе, $f \simeq 20$ см, $d \simeq 1,5$ см, и δy оказывается порядка 10^{-3} см. Для наблюдения таких мелких интерференционных полос требуется окуляр с большим увеличением ($\gamma \simeq 150\times$). Короткофокусная цилиндрическая линза окуляра O сильно растягивает интерференционную картину по горизонтали, не меняя её вертикальных размеров и тем самым мало ослабляя освещённость полос. Изображение светящейся точки в фокальной плоскости объектива O_2 при рассматривании через цилиндрическую линзу имеет вид светлой вертикальной линии, длина которой определяется диаметром объектива. Поэтому распределение освещённости в нижней части светлой линии зависит от действия нижней части объектива, а в верхней части линии - от верхней части объектива. Таким образом, наблюдатель видит две системы полос: верхняя образована лучами, прошедшими через кюветы, нижняя - лучами, прошедшими под кюветами.

При заполнении камер газами с одинаковым показателем преломления n обе системы полос совпадают. Оптическая разность хода $\Delta = \delta n \cdot l$, возникающая при прохождении света через камеры с разными газами $\delta n = n_2 - n_1$, ведёт к поперечному смещению верхней дифракционной картины относительно неподвижной нижней. Смещение на одну полосу соответствует дополнительной разности хода $\Delta = \lambda$. Просчитав число полос m между центрами обеих картин, можно рассчитать

$$\delta n = \frac{\Delta}{l} = m \frac{\lambda}{l}.$$

Для точного измерения разности хода используется компенсатор Жамена (J на рис. 1) - устройство, которое позволяет вернуть подвижную систему полос к первоначальному положению, т. е. вновь совместить обе системы полос. В установке компенсатор Жамена расположен за кюветой. Он состоит из двух одинаковых плоскопараллельных стеклянных пластинок, установленных на пути лучей под углом 45° к горизонтали. Вращение одной из пластин вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси системы, вызывает увеличение или уменьшение оптической длины пути соответствующего луча. Ось вращения снабжена рычагом, конец которого смещается при помощи микрометрического винта B .

Интерферометр Релея можно применять для измерения небольших изменений показателей преломления жидкостей или газов, а также для определения примесей различных газов в воздухе (например, для измерения концентрации рудничного газа в шахте). Показатель преломления n исследуемого газа определяется путём сравнения

с воздухом при атмосферном давлении:

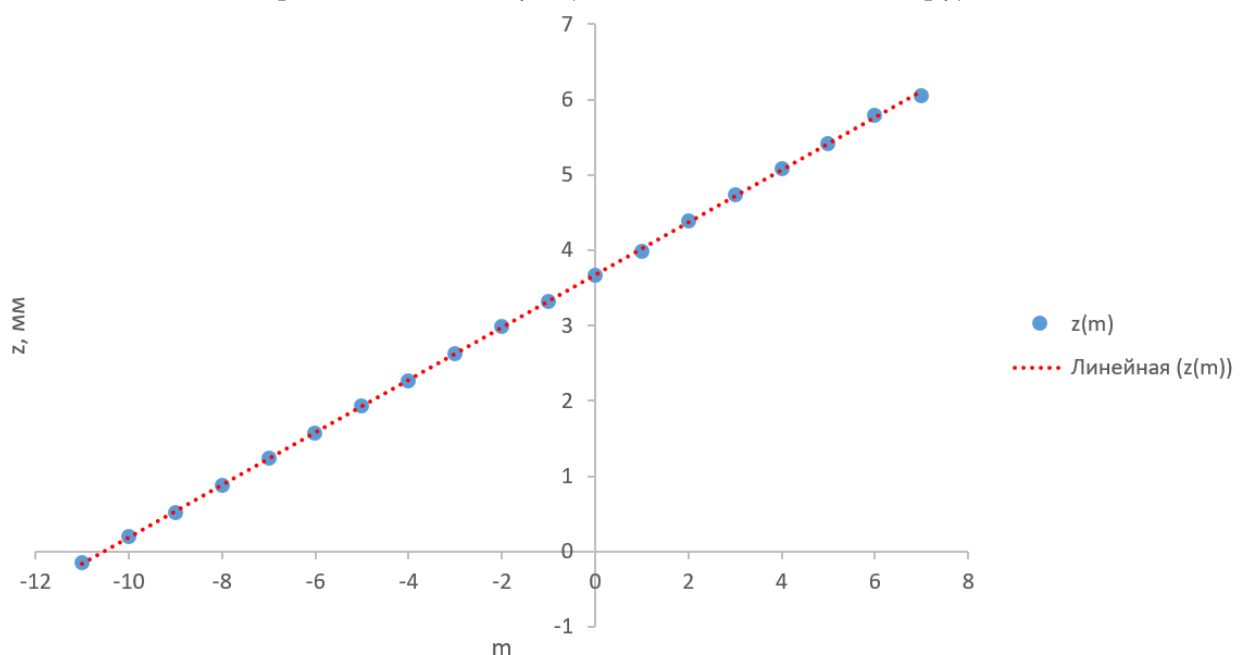
$$n = n_{\text{возд}} + \frac{\Delta}{\ell}.$$

Для определения величины Δ компенсатор следует прокалибровать.

5 Измерения, Обработка

1)

Построим калибровочный график, отложив по оси абсцисс номер совмещённой полосы m , а по оси ординат величину z (отсчёт по компенсатору)



Линейность графика действительно сохраняется вдали от нулевого положения компенсатора (разброс точек случаен вдоль всей линеаризационной прямой)

Аппроксимация по МНК:

Найдем угловые коэффициенты прямых для каждой установки по МНК.

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

$$b = \langle y_i \rangle - a \langle x_i \rangle$$

Также рассчитаем их погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$

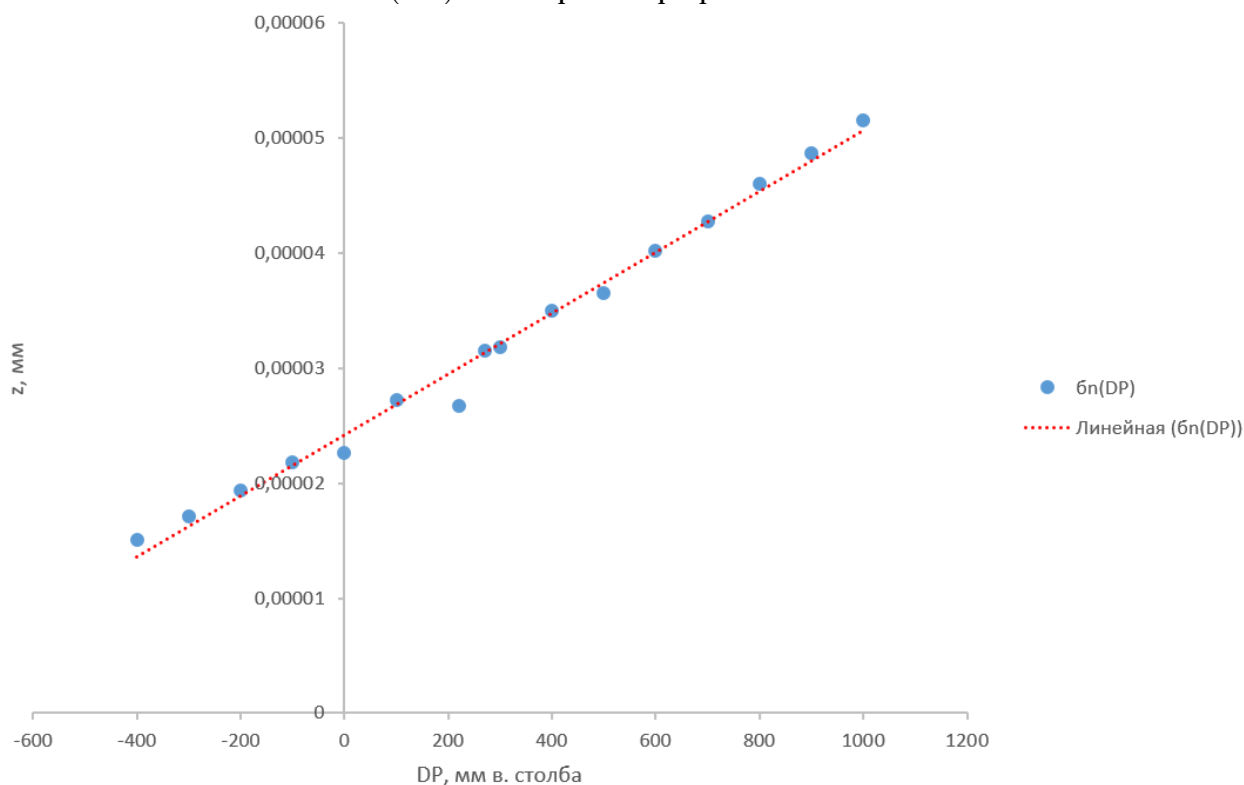
$$z = (3.6705 \pm 0.0053) + (0.34842 \pm 0.00091) \cdot m$$

Коэффициент наклона будет использоваться для пересчета количества полос между двумя положениями микрометра.

2) Длина волны светового фильтра $\lambda = 656$ нм.

Длина кюветы $l = 25$ см

Рассчитаем зависимость $\delta n(\Delta P)$ и построим график



Аппроксимация по МНК (с учетом выбросов)

$$\delta n = (0.000024452.4e - 7) + (2.639e - 84.6e - 10) \cdot \Delta P$$

По коэффициенту наклона рассчитаем поляризуемость "молекул воздуха".

$$\frac{\delta n}{\Delta P} = \frac{\alpha}{2k_b T}$$

$$\alpha = k \cdot 2k_b T = (1.63 \pm 0.03) \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$$

Температура в лаборатории $T = 22.4^\circ \text{ C}$

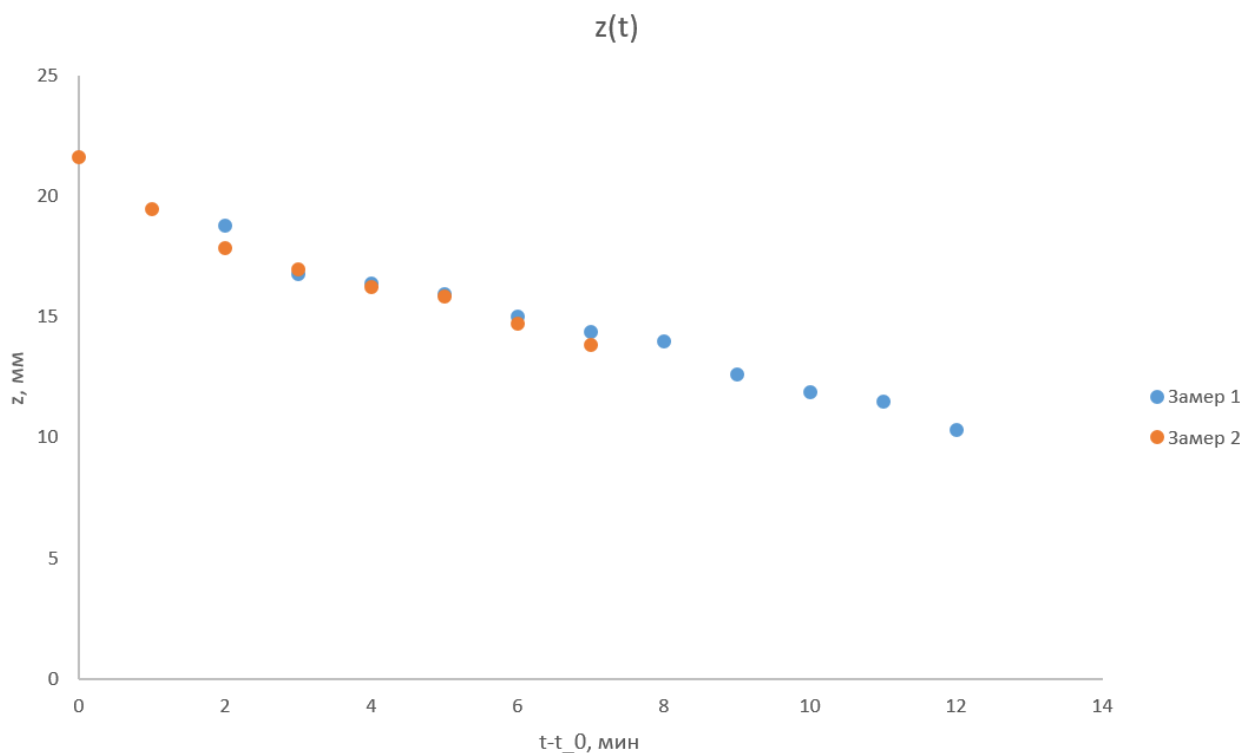
Давление в лаборатории $P_0 = 101900$ Па.

Посчитаем показатель преломления

$$n = 1 + \frac{\alpha}{2k_b T} P = (1.00027 \pm 0.00005)$$

Что сходится с табличным значением

3) Приведу зависимость, связанную с концентрацией CO_2 от времени



Взяв максимальное $z = 21.65$ мм, получим показатель преломления CO_2

$$n = (1.0004 \pm 0.0001)$$

Что также довольно близко к табличному значению 1.00045

6 Вывод

Интерферометр Релея действительно может с высокой точностью измерять показатели преломления, в частности, газов.

7 Ресурсы

Расчет по МНК: метод-наименьших-квадратов.рф