
Отчёт по работе 5.2.3

Интерферометр Рэлея

Карташов Константин Б04-005

I Анотация

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

Оборудование:

- ▷ технический интерферометр ИТР-1
 - ▷ светофильтр
 - ▷ баллон с углекислым газом
 - ▷ сильфон
 - ▷ манометр
 - ▷ краны
-

II Теоретическая часть

i Устройство установки

Интерферометр Рэлея – прибор для измерения разности показателей преломления, основанный на явлении дифракции света на двух параллельных щелях. Схема прибора представлена на рис. 1. Лампа накаливания Л с помощью конденсора К освещает узкую входную щель S, расположенную в фокусе объектива O_1 . Коллиматор состоящий из щели S и объектива O_1 , посылает параллельный пучок на диафрагму D с двумя вертикальными щелями. Свет после двойной щели проходит кювету L, состоящую из двух одинаковых стеклянных камер, в которые вводятся исследуемые газы. Кювета занимает только верхнюю часть пространства между объективами O_1 и O_2 , длина кюветы l . За кюветой расположены две стеклянные пластины J и пластинка П.

Интерференционная картина наблюдаемая в объектива интерферометра, представляет собой две система равноотстоящих полос, параллельных щелям: верхняя (подвижная) образована лучами, прошедшими через кюветы, нижняя (неподвижная) образована лучами прошедшими под ними.

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 :

$$\delta y = f \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

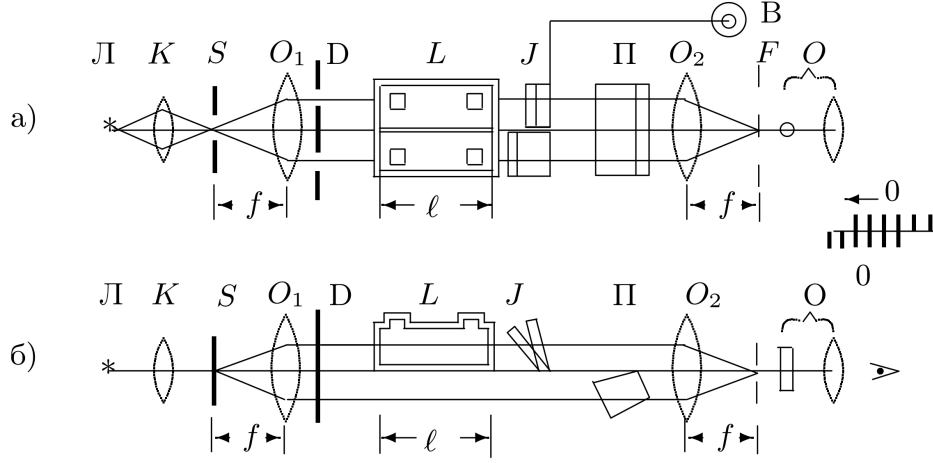


Рис. 1: Устройство интерферометра Рэлея: а) вид сверху; б) вид сбоку

При заполнении камер газами с одинаковым показателем преломления 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 нижней. Смещение на одну полосу соответствует дополнительной разности хода $\Delta = \lambda$. Посчитав число полос m между центрами обеих картин, можно рассчитать

$$\delta n = \frac{\Delta}{l} = m \frac{\lambda}{l}. \quad (2)$$

Показатель преломления n исследуемого газа определяется путём сравнения с воздухом при атмосферном давлении:

$$n = n_{\text{возд}} + \frac{\Delta}{l}. \quad (3)$$

Величина Δ определяется из смещения положения компенсатора J. Для этого компенсатор следует откалибровать.

ii Зависимость показателя преломления газа от давления и температуры.

Диэлектрическая проницаемость ε газа невзаимодействующих диполей, считается по формуле:

$$\varepsilon = n^2 = 1 + N\alpha, \quad (4)$$

где N – концентрация молекул, α – поляризуемость молекулы (в СИ). Эта формула справедлива для разрежённых газов, и их коэффициент преломления мало отличается от единицы. Учитывая зависимость давления P газа от температуры $P = NkT$, где k – постоянная Больцмана, получим соотношение

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

Тогда для разности показателей преломления δn , измеряемой с помощью интерферометра Рэлея, и разности давления δP , измеряемой с помощью манометра, имеем простое соотношения:

$$\delta n = \frac{\alpha}{2kT} \delta P, \quad \left. \frac{\partial n}{\partial P} \right|_{T=\text{const}} = \frac{\alpha}{2kT}. \quad (5)$$

III Экспериментальная часть

Параметры установки

- ▷ Длина кюветы $l = 25$ см
- ▷ Длина волны пропускаемая фильтром $\lambda = 670 \pm 50$ нм
- ▷ Температура воздуха $T = 23^\circ\text{C} = 296$ К
- ▷ Атмосферное давление $P = 99.6$ кПа

i Калибровка компенсатора

В обеих кюветах находится воздух при атмосферном давлении и при одинаковой температуре. Совместим центральные полосы дифракционных картин и зафиксируем соответствующее показание компенсатора z – оно будет нулевым. Теперь будем смещать дифракционную картину на целое число полос m влево и вправо и фиксировать соответствующие показания компенсатора (табл. 1). По полученным точкам построим калибровочную прямую методом наименьших квадратов (рис. 2).

Случайная погрешность проведённой прямой оказалась достаточно малой $\varepsilon \approx 0.5\%$. Поэтому в качестве систематической погрешности измерения разности хода будет брать длину волны фильтра, так как в дальнейших измерениях происходит постоянное смещение дифракционной картины, и точное смещение полос не является возможным ($\Delta\Delta_{\text{сист}} = \lambda$).

ii Зависимость показателя преломления воздуха от давления

В одной из кювет находится воздух под атмосферным давлением, в другой воздух под давлением. Будем менять давление в пределах от -1000 до 1000 мм вод. ст. и смещать центральные полосы для каждого значения давлений, в процессе фиксируя положение компенсатора соответствующее значению давления. Далее по калибровочному графику рассчитаем разность хода, и по формуле (2) найдём соответствующую величину δn . Все измеренные и полученные величины записаны в табл.

m	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
z	17	48	79	117	153	185	220	261
m	0	1	2	3	4	5	6	7
z	261	296	331	364	401	437	472	501

Таблица 1: Данные для калибровки компенсатора

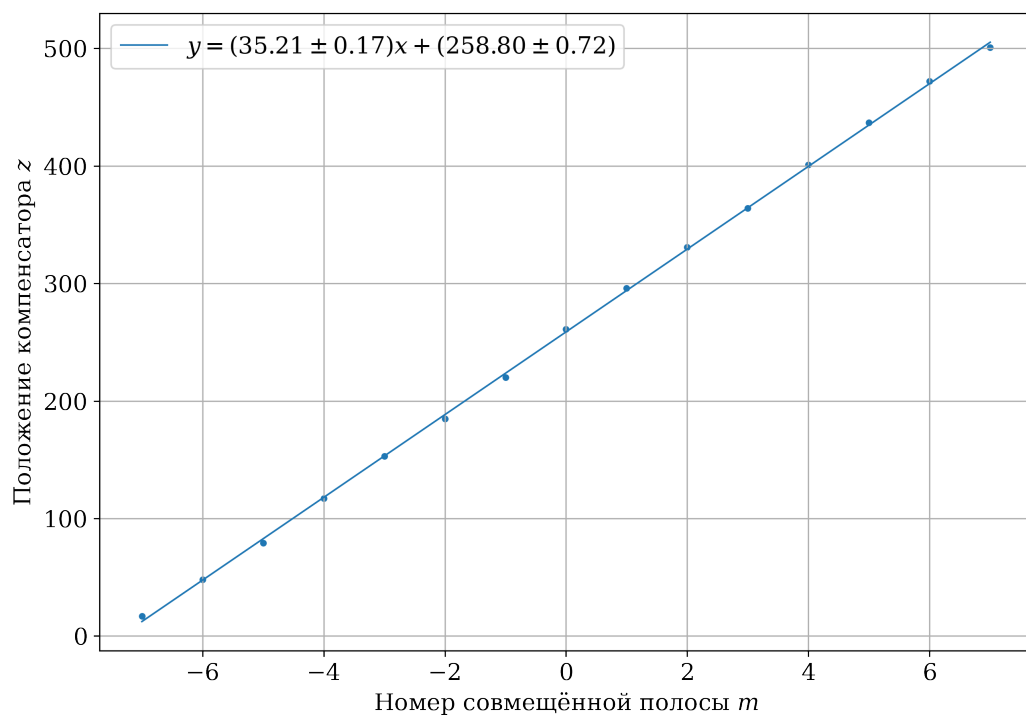


Рис. 2: Калибровочная прямая компенсатора

ΔP , мм вод.ст.	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100
ΔP , Па	-9800	-8820	-7840	-6860	-5880	-4900	-3920	-2940	-1960	-980
z	632	577	540	500	457	422	386	356	322	281
$\delta n \cdot 10^6$	28.4	24.21	21.4	18.35	15.08	12.42	9.68	7.4	4.81	1.69
ΔP , мм вод.ст.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ΔP , Па	980	1960	2940	3920	4900	5880	6860	7840	8820	9800
z	210	182	150	116	90	46	9	-26	-54	-100
$\delta n \cdot 10^6$	-3.71	-5.84	-8.28	-10.87	-12.84	-16.19	-19.01	-21.67	-23.8	-27.3

Таблица 2: Данные для построения зависимости $\delta n(P)$

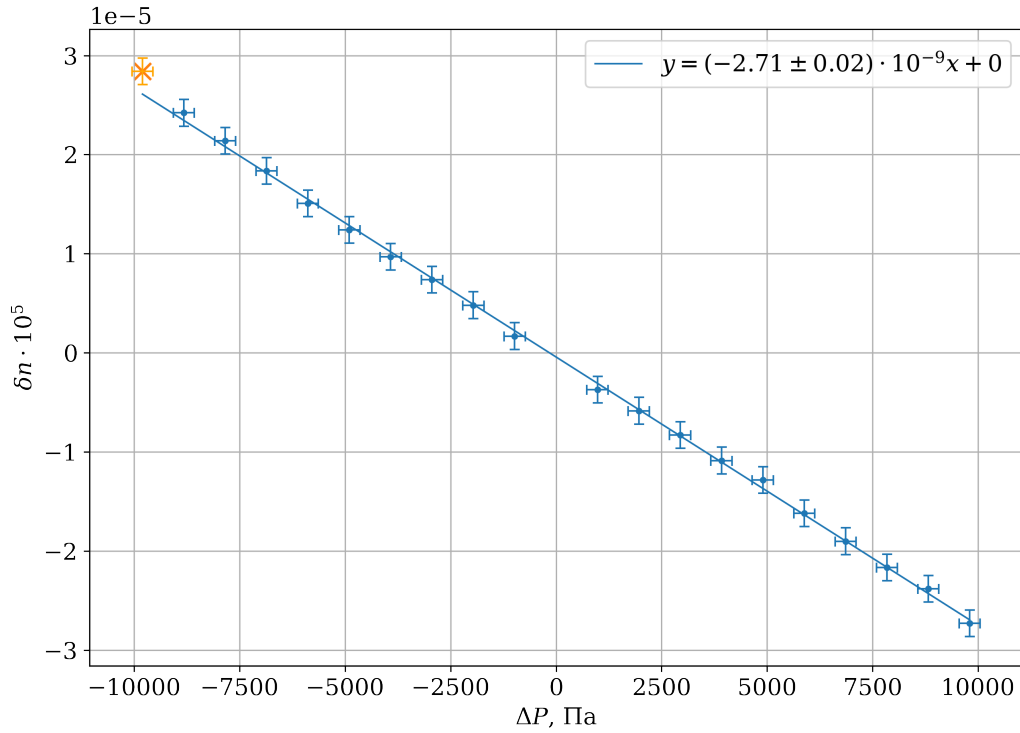


Рис. 3: График зависимости показателя преломления от давления

По данным из табл. 2 построим график с погрешностями $\Delta\delta n = \Delta\Delta_{\text{сист}}/l = 2.68 \cdot 10^{-6}$ (из формулы 2) и $\Delta\Delta P = 50 \text{ мм вод.ст.} \approx 500 \text{ Па}$ из-за необходимости постоянно поддерживать давление вручную. Видим, что одно значение сильно выбивается на фоне остальных (выделено оранжевым крестом), оно будет исключено из дальнейших расчётов. По методу наименьших квадратов проведём прямую через точки (рис. 3).

Полученное по методу наименьших квадратов значение $\delta n/\delta P = (-2.71 \pm 0.02) \cdot 10^{-9}$. Из теоретической части следует, что это значение должно быть положительным (формула (4)), поэтому мы можем сделать вывод, что калибровочный график должен быть развёрнут относительно оси ординат. Берём значение $\delta n/\delta P = 2.71$. Систематическая погрешность $\varepsilon_{\text{сист}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\Delta P}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta n}{\delta n}\right)^2}$. Эта погрешность определяется крайними точками через которые проводится прямая, т.е. $\varepsilon_{\text{сист}} = \sqrt{\left(\frac{500}{10000}\right)^2 + \left(\frac{2.6}{28}\right)^2} \approx 10\%$ – относительная погрешность коэффициента наклона графика. Поэтому $\delta n/\delta P = (2.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$.

По формуле (1) найдём среднюю поляризацию молекул воздуха:

$$\alpha = 2kT \frac{\delta n}{\delta P} = 2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 296 \cdot 2.7 \cdot 10^{-9} \approx (2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-29} \text{ Кл} \cdot \text{м}.$$

t, c	0	65	120	180	240	300	360
z	2497	2215	2090	2022	1990	1803	1720
$\delta n \cdot 10^6$	160.85	140.58	131.6	126.71	124.41	110.98	105.01
t, c	420	480	540	600	660	720	780
z	1651	1586	1515	1468	1415	1362	1289
$\delta n \cdot 10^6$	100.05	95.38	90.28	86.9	83.09	79.28	74.04
t, c	840	900	965	1025	1080	1140	1211
z	1243	1241	1198	1164	1130	1100	1058
$\delta n \cdot 10^6$	70.73	70.59	67.5	65.05	62.61	60.45	57.44

Таблица 3: Зависимость показателя преломления от времени после накачки CO_2

По формуле (4) найдём коэффициент преломления воздуха:

$$n = \sqrt{1 + N\alpha} = \sqrt{1 + 2P \frac{\delta n}{\delta P}} \approx 1 + P \frac{\delta n}{\delta P} = 1 + 10^5 \cdot 2.7 \cdot 10^{-9} \approx 1.00027 \pm 0.0003.$$

Полученные значения для показателя преломления воздуха содержат в своей погрешности табличное значение данной величины.

iii Показатель преломления CO_2

В одной из кювет будет находится воздух под атмосферным давлением, в другой углекислый газ под атмосферным давлением. Сначала мы будем напускать в кювету углекислый газ, и наблюдать за смещением интерференционной картины, когда она перестанет смещаться, зафиксируем положение компенсатора. Далее пронаблюдаем за смещением спектральной картины, фиксируя положение компенсатора и момент времени с остановки напуска углекислого газа. По формуле (2) найдём также δn . Данные занесём в таблицу 3.

По начальному положению компенсатора и формуле (3) вычислим показатель преломления углекислого газа:

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{возд}} + \delta n = 0.00027 + 0.00016 = 0.00043.$$

Погрешность суммы:

$$\Delta n_{\text{CO}_2} = \sqrt{\Delta^2 n_{\text{возд}} + \Delta^2 \delta n} = \sqrt{0.00003^2 + 0.0000027^2} = 0.00003.$$

Итого $n_{\text{CO}_2} = 0.00043 \pm 0.00003$.

iv Диапазон измерений интерферометра

Диапазон допустимых для измерения интервалов δn ограничен снизу погрешностью $\delta n_{\min} = \Delta \delta n = 2.68 \cdot 10^{-6}$. Сверху измерения ограничены порядком $\delta n_{\max} \sim 10^{-4}$.

IV Выводы

1. Пронаблюдав интерференционную картинку, основываясь на которой, откалибровывали интерферометр Рэлея.
 2. Пронаблюдали зависимость интерференционной картины от давления воздуха в кювете, основываясь на этом, рассчитали среднюю поляризацию молекул воздуха $\alpha = (2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-29}$ Кл·м и коэффициент преломления воздуха при атмосферном давлении $n_{\text{возд}} = 1.00027 \pm 0.00003$ в разумных пределах табличного значения.
 3. Пронаблюдали зависимость интерференционной картины от газа в кювете, наблюдали изменение показателя преломления с изменением состава газа во времени. Основывая на этом нашли показатель преломления углекислого газа $n_{\text{CO}_2} = 0.00043 \pm 0.00003$ в разумных пределах табличного значения.
 4. Оценили диапазон измерений интерферометра Рэлея.
-