

4.2.3. ИНТЕРФЕРОМЕТР РЕЛЕЯ

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

Оборудование: технический интерферометр ИТР-1, светофильтр, баллон с углекислым газом, сильфон, манометр, краны.

Теоретическая часть

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

$$n - 1 \approx \frac{\alpha}{2k_{\text{B}}T}P.$$

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:

$$\delta n = \frac{\alpha}{2k_{\text{B}}T} \delta P$$

Экспериментальная установка

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 L с помощью конденсора K 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 Π тонкой разделительной линией. Для наблюдения двух систем полос в окуляре применена цилиндрическая линза

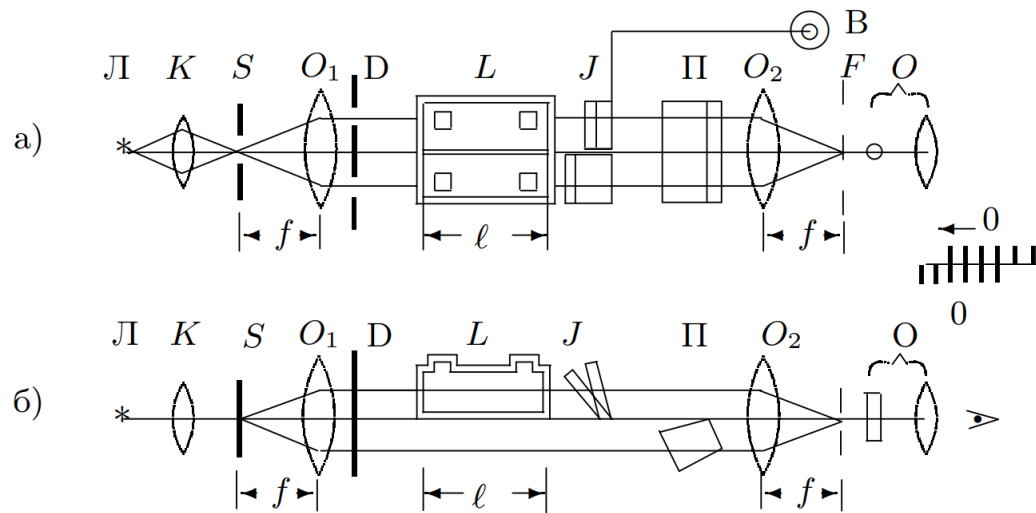


Рис. 1: Устройство интерферометра Релея: а) вид сверху; б) вид сбоку

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 :

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

В техническом интерферометре ИТР-1, который используется в нашей работе, $f \approx 20$ см, $d \approx 1,5$ см, и δy оказывается порядка 10^{-3} см. Для наблюдения таких мелких интерференционных полос требуется окуляр с большим увеличением ($\gamma \approx 150\times$). 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 рассмотрении 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

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

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:

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

Для определения величины Δ компенсатор следует прокалибровать.

Результаты и обработка

1. Проведем калибровку компенсатора: совместим обе системы полос, используя компенсатор, смещаем верхнюю систему относительно нижней, так чтобы полосы, оставленные светофильтром снова совпали. Длина, используемой кюветы:

$$l = 10 \text{ см.}$$

Полоса пропускания светофильтра:

$$\lambda \in [6200 \text{ \AA}, 7200 \text{ \AA}].$$

Полученные данные приведены в таблице , построенный по ним график (рис.) демонстрирует линейную зависимость.

2. Снимем зависимость разности показателей преломления δn от разности давлений ΔP : изменяя давление при помощи сильфона и совмещая нулевые полосы, снимем зависимость z от ΔP , далее, используя калибровку и формулу (2), получим нужную зависимость. Полученные данные приведены в таблице , построенный по ним график (рис.) демонстрирует линейную зависимость. Рассчитаем среднюю поляризуемость молекул воздуха по формуле:

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

Получим

$$\alpha = (2.40 \pm 0.04) \cdot 10^{-29}$$

Также оценим показатель преломления воздуха

$$n_{\text{возд}} = \frac{\alpha}{2k_B T} P + 1 = (1.0003 \pm 0.00001)$$

3. Сравним показатели преломления воздуха и углекислого газа: заполняем камеру углекислым газом, Совмещаем нулевые полосы, снимаем зависимость равновесного положения компенсатора от времени. Полученные данные приведены в таблице .

Показатель преломления углекислого газа:

$$n_{CO_2} \approx n_{\text{возд}} + m \frac{\lambda}{l} = (1.0003 \pm 0.00002)$$

Выводы

- В данной работе были оценены средняя поляризация молекулы и показатель преломления воздуха при нормальных условиях. Полученные значения совпали с табличными.
- Был проведен эксперимент по измерению показателя преломления углекислого газа. Полученное значение сильно отличается от табличного, то есть результатам данного опыта нельзя доверять. Ошибка могла произойти на этапе закачки углекислого газа в камеру, судя по тому что отклонение от положения равновесия составило лишь пара полос. Также сами измерения могли проводиться неправильно

Рис. 2: Калибровочный график

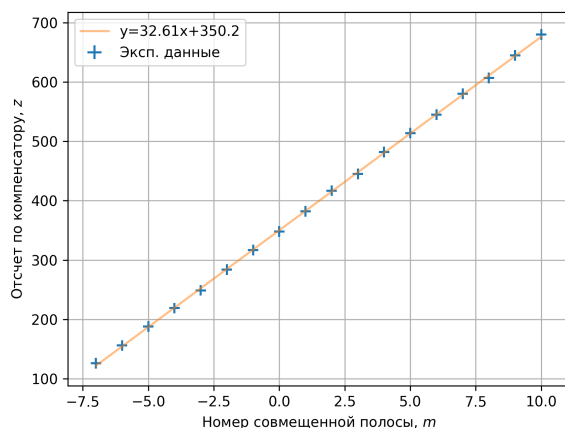
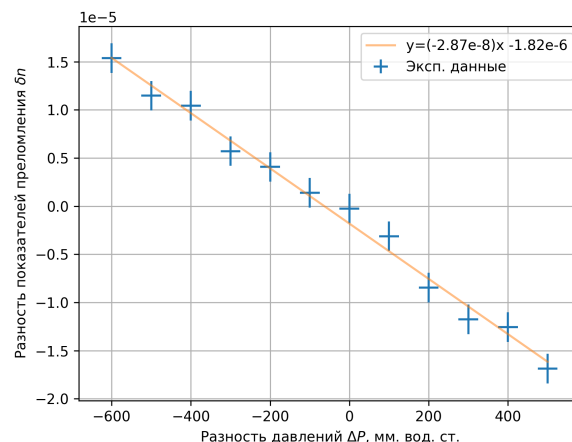
Рис. 3: Зависимость δn от ΔP 

Таблица 1:
Калибровка
компенсатора

	m	z
0	0	348
1	1	382
2	2	417
3	3	445
4	4	482
5	5	514
6	6	545
7	7	580
8	8	607
9	9	645
10	10	680
11	-1	317
12	-2	284
13	-3	249
14	-4	219
15	-5	188
16	-6	156
17	-7	126

Таблица 2: Зависимость δn от ΔP

	ΔP	z	m	$\delta n, \cdot 10^{-5}$
0	0	349	-0.03	-0.02
1	100	335	-0.46	-0.31
2	200	309	-1.26	-0.84
3	300	293	-1.75	-1.17
4	400	289	-1.87	-1.25
5	500	268	-2.52	-1.68
6	-100	357	0.20	0.13
7	-200	370	0.60	0.40
8	-300	378	0.85	0.57
9	-400	401	1.55	1.04
10	-500	406	1.71	1.14
11	-600	425	2.29	1.53

Таблица 3: Зависимость
равновесного положения
компенсатора от времени

	T, c	z
0	0	294
1	60	315
2	120	345
3	180	345