

Отчёт по лабораторной работе 4.2.3.

Интерферометр Релея.

Работу выполнил Громов Артём
ЛФИ Б02-006

Долгопрудный, 2022 г.

1. Аннотация

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

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

Для устранения недостатка попадения на экран малой доли светового потока источника при изучении интерференции был разработан интерферометр Релея (рис. 1).

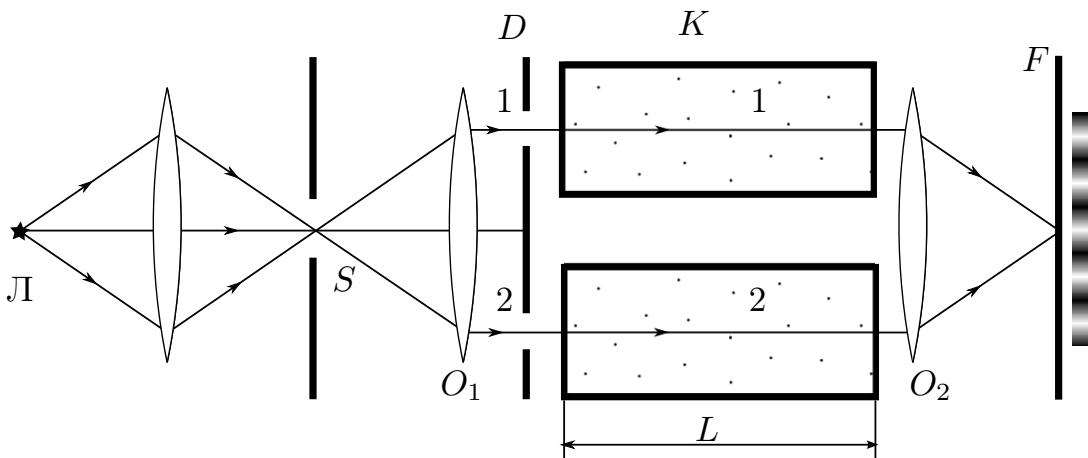


Рис. 1: Принципиальная схема устройства интерферометра Релея.

В этой схеме в качестве источника используют узкую щель S (шириной b), освещаемую сколимированным светом от лампочки L . Щель расположена в фокальной плоскости объектива O_1 . После экрана D с двойной щелью два параллельных пучка проходят через кюветы 1 и 2 и попадают на объектив O_2 , в фокальной плоскости которого рассматривается интерференционная картина. Для обеспечения когерентности пучков 1 и 2 ширина входной щели S выбирается так, чтобы радиус когерентности на экране D был больше расстояния между щелями 1 и 2 . На экране F рассматривается дифракционное изображение щели S , ширина изображения определяется шириной одной щели на экране D . Если интерференция рассматривается в белом свете, ширина щелей на экране D выбирается в 2–3 раза меньше расстояния между ними, так что в центральном максимуме видно 5–7 интерференционных полос.

Для более точного измерения смещения полос из-за изменения коэффициента преломления в одном из плеч в интерферометре Релея используют две интерференционные картины. Верхняя часть пучков 1 и 2 проходит через кюветы K с газом. Нижняя часть, проходящая под кюветами, образует в фокальной плоскости объектива O_2 неподвижную интерференционную картину. Для отдельного рассмотрения каждой системы полос (пучки света 1 и 2 параллельны и системы полос в фокальной плоскости совпадают) используют окуляр с цилиндрической линзой, которая пространственно разделяет эти системы полос. При заполнении кювет газами с одинаковыми коэффициентами преломления обе системы полос (верхняя и нижняя) совпадают. Различие коэффициентов преломления газов в кюветах приводит к смещению верхней системы полос относительно нижней из-за

возникновения между лучами 1 и 2 оптической разности хода $\Delta = L(n_2 - n_1)$ (L — длина кювет). По числу полос между центрами обеих картин можно рассчитать изменение коэффициента преломления n .

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

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

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

$$n - 1 \approx \frac{2\pi\alpha}{k_B T} P. \quad (2)$$

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:

$$\delta n = \frac{2\pi\alpha}{k_B T} \delta P. \quad (3)$$

2. Экспериментальная установка

Схема прибора представлена на рис. 2 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 пластины J (компенсатор Жамена, см. ниже) и пластина Π . Позади пластины Π расположены объектив O_2 и окуляр O . Вид сверху (а) показывает расположение компонент в вертикальной плоскости, вид сбоку (б) — расположение в горизонтальной плоскости.

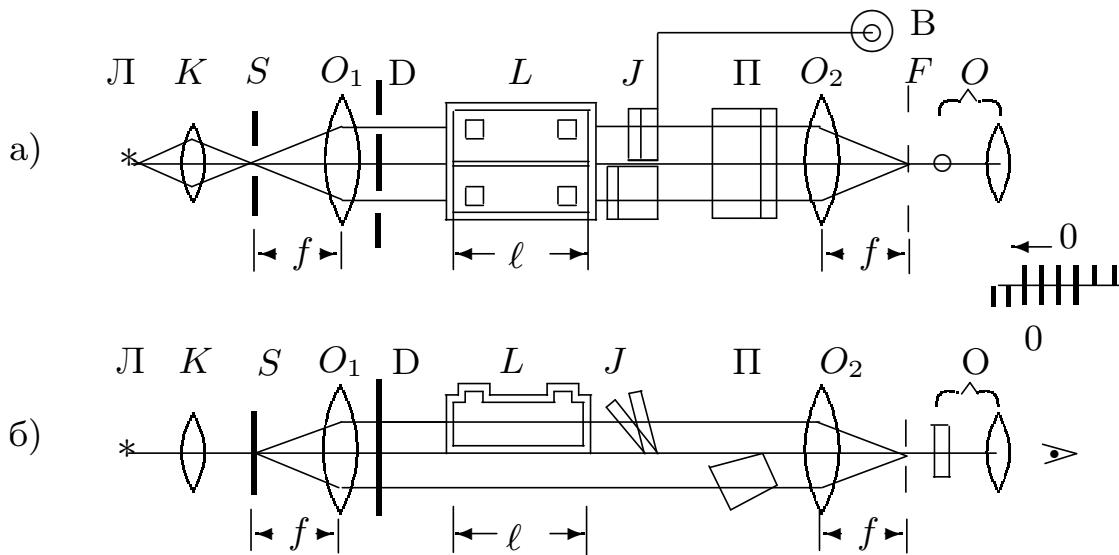


Рис. 2: Устройство интерферометра Релея: а) вид сверху; б) вид сбоку.

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 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 $\phi = \lambda/d$ 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 :

$$\delta y = f \frac{\lambda}{d}. \quad (4)$$

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 О 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 $\delta n = n_1 - n_2$, 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

$$\delta n = \frac{\Delta}{l} = m \frac{\lambda}{l}. \quad (5)$$

Для точного измерения разности хода используется компенсатор Жамена (J на рис. 2) — 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:

$$n = n_{\text{возд}} + \frac{\Delta}{l}. \quad (6)$$

Для определения величины Δ компенсатор следует прокалибровать.

3. Результаты измерений и обработка данных

3.1. Калибровка компенсатора

Уравняв давление в камерах, подождём 2–3 минуты, пока выровняются температуры. Установим начало отсчёта, совместив с помощью компенсатора обе системы полос. Установка нуля в белом свете — совмещение центральных полос — облегчается тем, что боковые полосы окрашены. Совместим (приблизительно) боковые полосы с симметричной окраской, а затем (как можно точнее) — центральные.

Прокалибуем компенсатор в единицах λ , выделив узкий интервал длин волн с помощью светофильтра. Занесём результаты калибровки в таблицу 1. Построим график зависимости значений микрометра z от номера полосы m (рис. 3). Аппроксимируем его прямой линией $z = am + b$. В итоге получим следующие коэффициенты $a = 34.6 \pm 0.2$, $b = 280.8 \pm 0.9$.

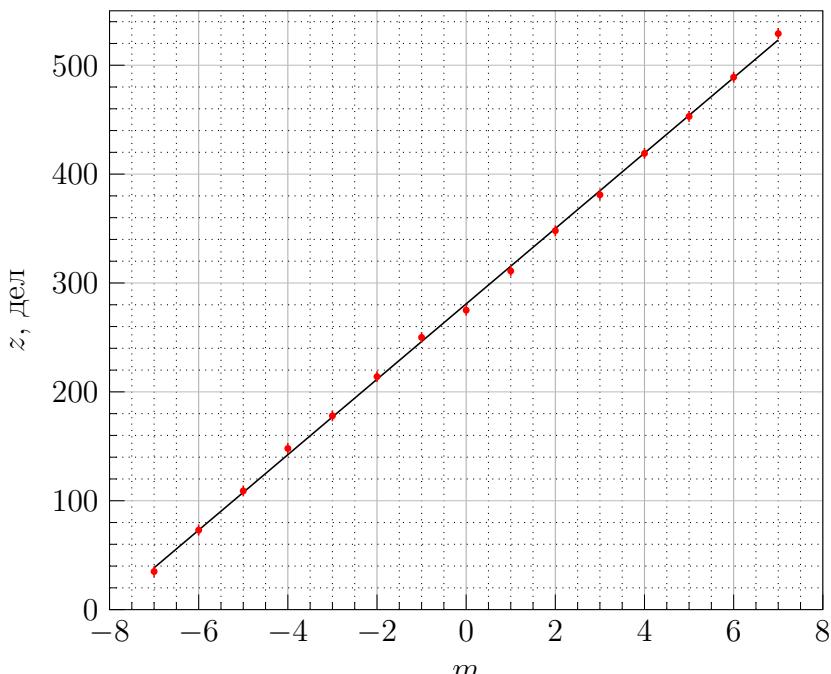


Рис. 3: График $z(m)$.

Длина кувейты составляет $l = 25$ см. Светофильтр настроен на длину волны $\lambda = 670$ нм и имеет ширину полосы пропускания $\delta\lambda = 100$ нм.

3.2. Исследование зависимости Δn от P для воздуха

Изменяя давление с помощью сильфона и совмещая нулевые полосы, снимем зависимость показаний компенсатора z от перепада давлений ΔP . Давление будем изменять от -1000 мм вод. ст. до 1000 мм вод. ст. Занесём полученные данные в таблицу 2.

Используя формулу (5) и калибровочную шкалу рассчитаем δn и построим график зависимости от P (рис. 4 слева).

Как видно из графика прямая, проходящая через ноль, плохо аппроксимирует наши данные. Также две первые и две последние и центральная точки выбиваются из прямой. Выкнем первые и последние точки, а остальные (кроме центральной) сдвинем на 100 мм

вод. ст. вправо (рис. 4 справа). Теперь зависимость хорошо аппроксимируется изначальной функцией. Возможно, это было вызвано сбитым нулём на манометре.

В итоге коэффициент для второго графика $a = (-268 \pm 3) \cdot 10^{-10}$ (мм вод. ст.) $^{-1}$. На основе него по формуле (3) рассчитаем поляризумость молекул воздуха $\alpha = -k_B T a / (2\pi) = 1.76 \pm 0.02 \cdot 10^{-30}$.

Найдём показатель преломления при нормальных условиях с помощью формулы (2) $n = 1 - aP = 1.000294 \pm 0.000004$. Знак минус обучловлен калибровкой.

Таблица 2.
Показатель преломления при разных давлениях.

P , мм вд. с.	-1000.0	-900.0	-800.0	-700.0	-600.0	-500.0
z , дел	614.0	588.0	521.0	484.0	447.0	411.0
$\delta n \cdot 10^{-7}$	258.0	238.0	186.0	157.0	129.0	101.0
$\sigma_{\delta n} \cdot 10^{-7}$	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

P , мм вд. с.	-400.0	-300.0	-200.0	-100.0	0.0	100.0	200.0
z , дел	374.0	341.0	309.0	273.0	275.0	196.0	166.0
$\delta n \cdot 10^{-7}$	72.0	47.0	22.0	-6.0	-4.0	-66.0	-89.0
$\sigma_{\delta n} \cdot 10^{-7}$	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

P , мм вд. с.	300.0	400.0	500.0	600.0	700.0	800.0	900.0
z , дел	130.0	104.0	74.0	36.0	3.0	-69.0	-140.0
$\delta n \cdot 10^{-7}$	-117.0	-137.0	-160.0	-189.0	-215.0	-271.0	-326.0
$\sigma_{\delta n} \cdot 10^{-7}$	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

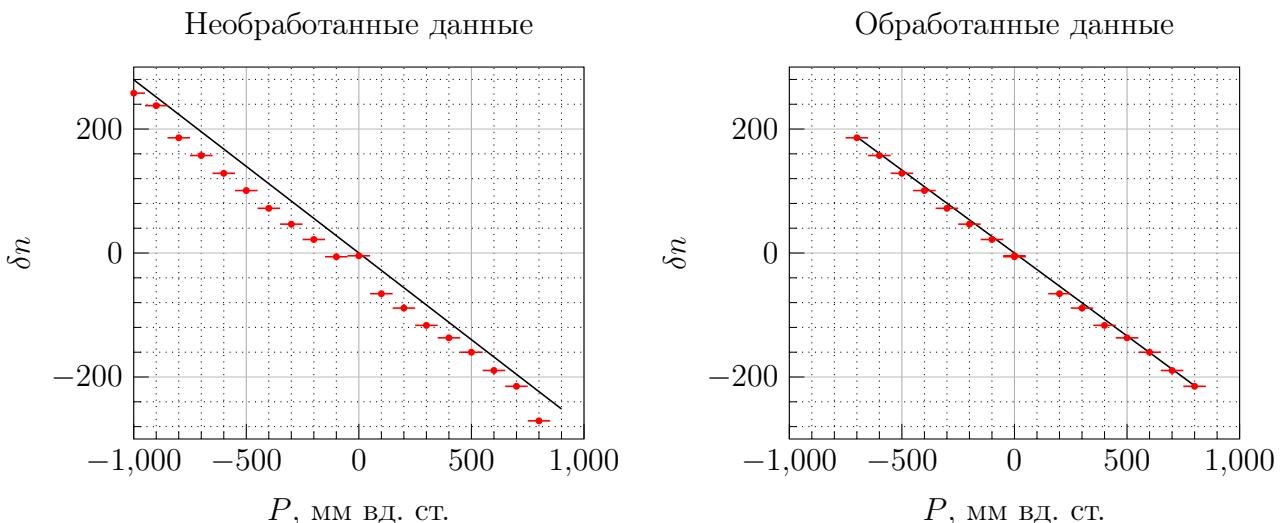


Рис. 4: Графики $\delta n(P)$

3.3. Исследования углекислого газа

Соединим первую камеру кюветы с атмосферой, открыв кран K_1 , и отключим манометр, закрыв кран K_2 . Заполним углекислым газом камеру с открытым концом.

Снимем зависимость равновесного положения компенсатора от времени, раз в минуту совмещая нулевые полосы, и оценим время установления равновесия. Занесём полученные данные в таблицу 3.

Таблица 3.
Положение компенсатора в зависимости от времени.

t , мин	0	1	2	3	4	5	6
z , дел	2494	2394	2185	2110	2033	1975	1913

t , мин	7	8	9	10	11	12	13
z , дел	1829	1782	1745	1704	1664	1633	1603

t , мин	14	15	16	17	18	19	20
z , дел	1583	1552	1533	1514	1492	1477	1459

Построим график зависимости $\log(z)$ от t . Аппроксимируем его прямой. В результате аппроксимации получим, что время установления равновесия равно $\tau = 39 \pm 2$ мин. Аппроксимация экспонентой не дала хороших результатов. Возможно, закон установления равновесия гораздо сложнее из-за влияния внешних факторов. Отобразим результат на рис. 5 и 6.

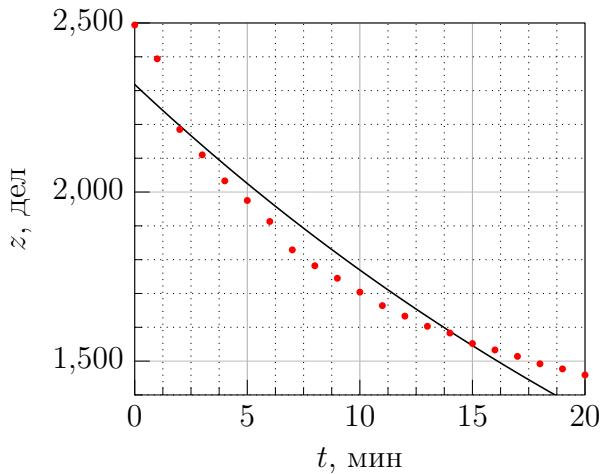


Рис. 5: График $z(t)$.

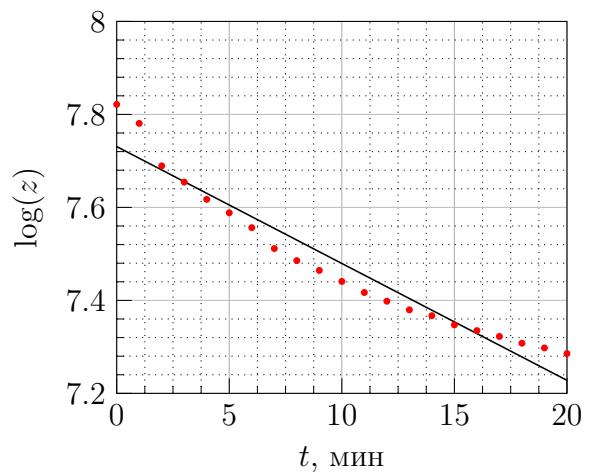


Рис. 6: График $\log(z)$ от t .

Рассчитаем показатель преломления углекислого газа используя формулу (6), значение показателя преломления воздуха из предыдущего опыта и калибровочную кривую. Подставим в неё значение микрометра в нулевой момент времени и получим, что $n_{CO_2} = 1.000465 \pm 0.000004$.

3.4. Оценка возможностей компенсатора

Оценим интервал δn , доступный для измерений, исходя из возможностей компенсатора: минимальная величина δn , доступная для измерений, определяется точностью компенсатора и равна $1.4 \cdot 10^{-8}$, максимальная — диапазоном его работы. И равна $8.7 \cdot 10^{-6}$

4. Обсуждение результатов

Значения полученные для показателей преломления воздуха и углекислого газа согласуются со справочными довольно неплохо: $n_{\text{возд}} = 1.000293$ и $n_{CO_2} = 1.00045$. Также полярезуемость воздуха совпала со справочными данными $\alpha = 2 \cdot 10^{-29}$. Однако плохо получилось аппроксимировать процесс установления равновесия, наверно, из-за сложного процесса и несовершенства установки.

Самым плохим прибором оказался манометр, так у него был сбит нулевой уровень, из-за чего пришлось преобразовывать данные.

5. Вывод

Исследование можно считать удачным, однако стоит пререпроверить результаты с использованием качественного оборудования.

$\$m\$$	$\$z\$, \text{дел}$	$\$P\$, \text{мм вд.}$	$\$z \$, \text{дел}$	$\$t\$, \text{мин}$	$\$z \$, \text{дел}$	$\$L\$, \text{см}$	$\$\\lambda\$,$	const
0	275	-1000	614	0	2494			25
1	311	-900	588	1	2394			670
2	348	-800	521	2	2185			50
3	381	-700	484	3	2110			5
4	419	-600	447	4	2033			22.8
5	453	-500	411	5	1975			0.2
6	489	-400	374	6	1913			99.3
7	529	-300	341	7	1829			0.1
-1	250	-200	309	8	1782			
-2	214	-100	273	9	1745			
-3	178	0	275	10	1704			
-4	148	100	196	11	1664			
-5	109	200	166	12	1633			
-6	73	300	130	13	1603			
-7	35	400	104	14	1583			
		500	74	15	1552			
		600	36	16	1533			
		700	3	17	1514			
		800	-69	18	1492			
		900	-140	19	1477			
				20	1459			