

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 попадания на экран малой доли светового потока источника при изучении интерференции был разработан интерферометр Релея (рис. 1).

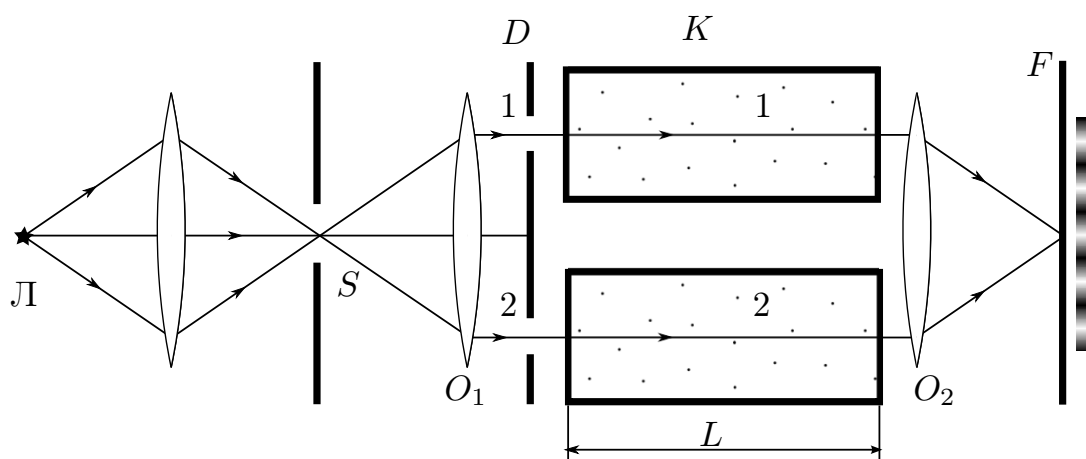


Рис. 1: Принципиальная схема устройства интерферометра Релея.

В этой схеме в качестве источника используют узкую щель  $S$  (шириной  $b$ ), освещаемую сколлимированным светом от лампочки Л. 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 К 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  $\varepsilon$  для газа невзаимодействующих диполей:

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

где  $N$  — концентрация молекул,  $\alpha$  — 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  $\delta P$ , 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  $\Lambda$  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 —  $\text{CO}_2$  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  $\Pi$ .

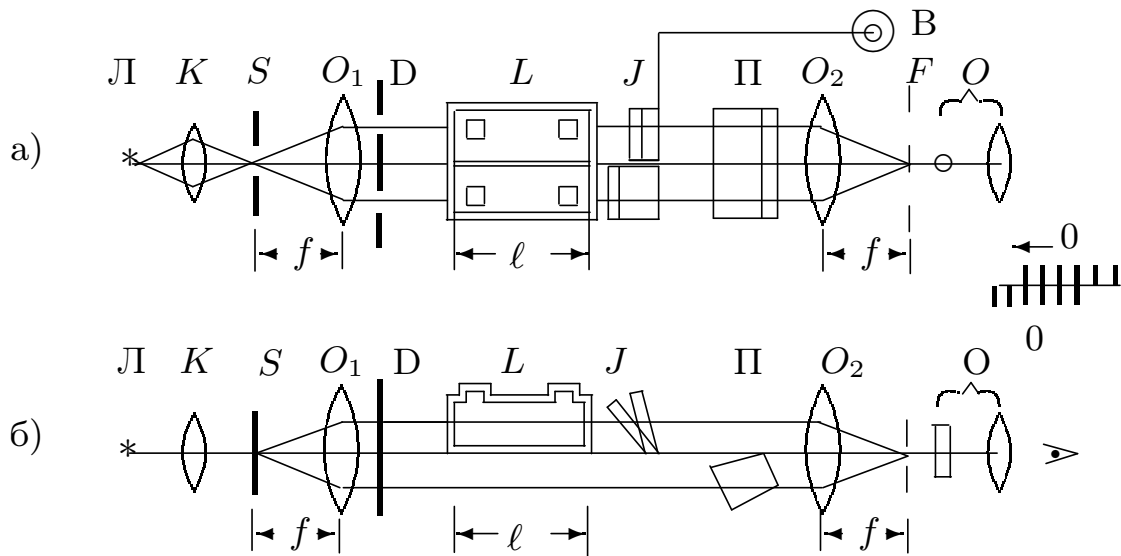


Рис. 2: Устройство интерферометра Релея: а) вид сверху; б) вид сбоку.

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  $\Pi$  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  $\delta y$  зависит от длины волны  $\lambda$ , 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  $\delta y$  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 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  $\delta n = n_1 - n_2$ , 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  $45^\circ$  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  $\Delta$  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.

Прокалибруем компенсатор в единицах  $\lambda$ , 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  $a = 34.6 \pm 0.2$ ,  $b = 280.8 \pm 0.9$ .

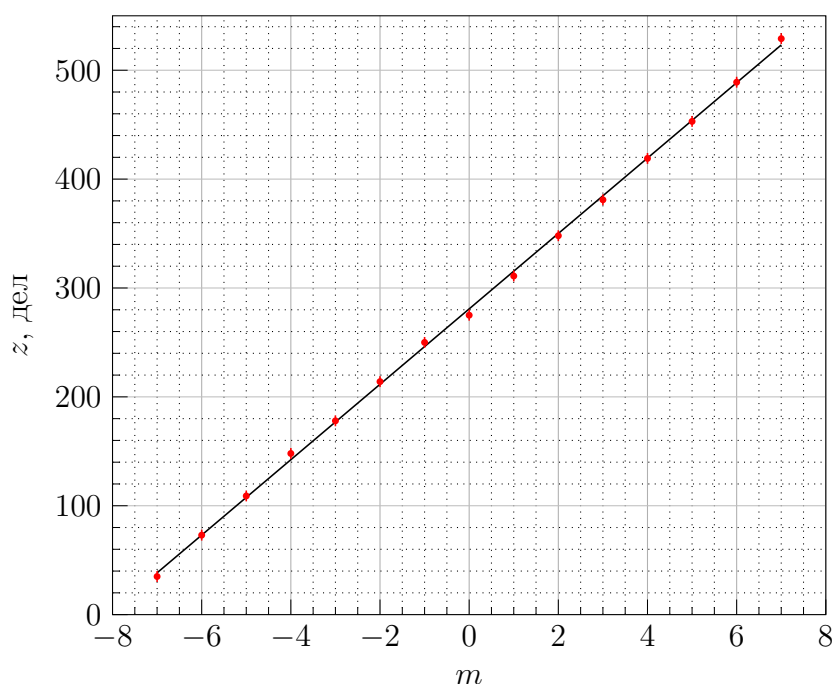


Рис. 3: График  $z(m)$ .

Таблица 1.  
Результаты калибровки.

$m$	$z$ , дел
0.0	275.0
1.0	311.0
2.0	348.0
3.0	381.0
4.0	419.0
5.0	453.0
6.0	489.0
7.0	529.0
-1.0	250.0
-2.0	214.0
-3.0	178.0
-4.0	148.0
-5.0	109.0
-6.0	73.0
-7.0	35.0

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 $\Delta n$ от $P$ для воздуха

Изменяя давление с помощью сильфона и совмещая нулевые полосы, снимем зависимость показаний компенсатора  $z$  от перепада давлений  $\Delta P$ . 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  $\delta n$  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. Выкинем 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.)<sup>-1</sup>. На основе него по формуле (3) рассчитаем поляризуемость 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 обусловлен калибровкой.

**Таблица 2.**

Показатель преломления при разных давлениях.

$P$ , мм вод. ст.	-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 вод. ст.	-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 вод. ст.	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

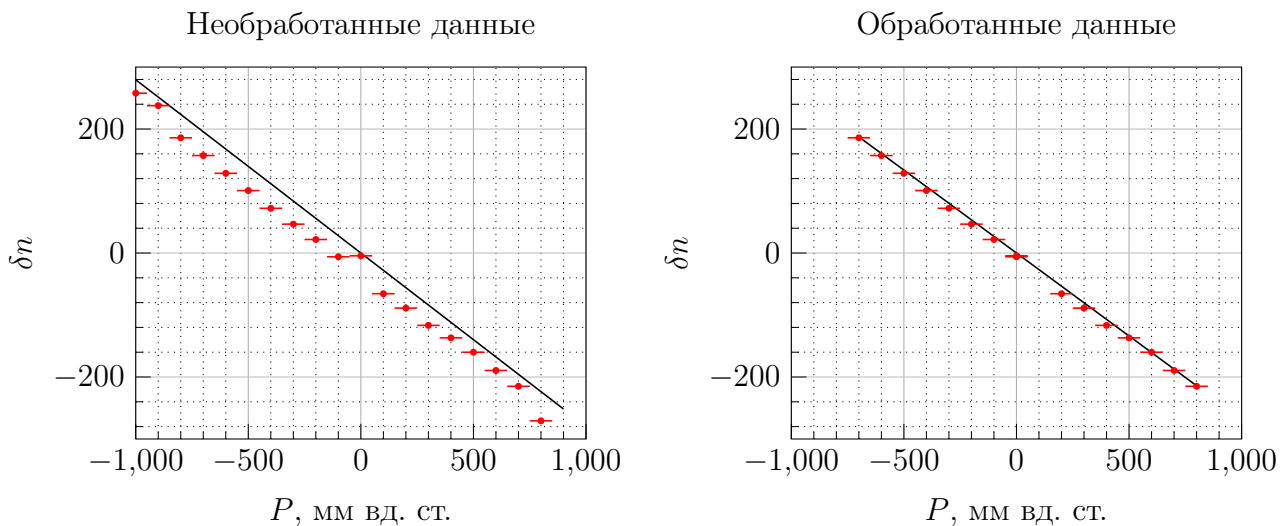


Рис. 4: Графики  $\delta n(P)$

### 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.

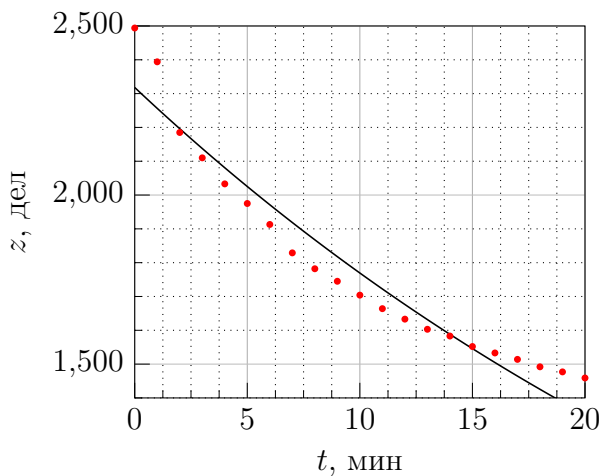


Рис. 5: График  $z(t)$ .

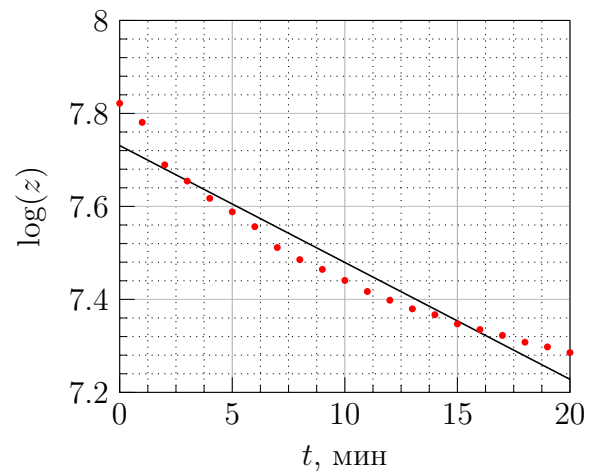


Рис. 6: График  $\log(z)$  от  $t$ .

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  $\delta n$ , доступный для измерений, исходя из возможностей компенсатора: минимальная величина  $\delta n$ , 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 поляризуемость 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.



[illegible]