

РЕФРАКТОМЕТР ДЛЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВОГО КОНТРАСТА*)

Успешное использование фазового контраста в микроскопии естественно привело к идее использования этого метода и для других целей, в частности для количественного определения величин фазовых сдвигов при отражении света или прохождении светом вещества. Один из примеров такого рода применения фазового контраста представляет собой описываемый ниже рефрактометр для газов и жидкостей, достигший уже известной степени совершенства, позволяющей говорить не о предварительных опытах, а о серьезном использовании заложенного в его основу измерительного принципа.

Жидкость или газ, показатель преломления которых подлежит измерению, заполняет центральную часть A плоско-параллельной кюветы, представляющую собой сравнительно узкую ($2p = 1,4$ мм) прослойку, отделенную от остального объема B кюветы непрозрачными стенками D , толщиной $q = 1,25$ мм (рис. 1). Общая высота кюветы $2p + 2q + 2r = 38$ мм, ширина — 17,5 мм и толщина $t = 1 \div 100$ мм. Стенки кюветы образованы плоско-выпуклыми линзами с фокусным расстоянием $1 \div 2$ м. Источники света в виде щели шириной $18-25$ м и длиной 4,5 мм (освещаемой ртутной дугой через светофильтр или монохроматор, выделяющий зеленую линию $\lambda = 5461 \text{ Å}$, и полярийд) помещаются в фокальной плоскости одной из линз, в результате чего внутренность кюветы находится в параллельном пучке монохроматических лучей. Объем B кюветы заполняется жидкостью

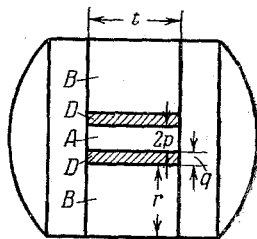


Рис. 1. Схема кюветы.

*) E. Ingelstam, Ark. för Fys. 6, № 4 (29), 287 (1953).

или газом, показатель преломления которого n_B известен. Если вещество, заполняющее объём A , имеет показатель преломления n_A , то между световыми пучками, проходящими через объёмы A и B , возникает фазовый сдвиг

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} t (n_B - n_A). \quad (1)$$

Вследствие малости толщин $2p$ и q фронт световой волны, проходящей через кювету, будет заметно искажён диффракционными явлениями. Расчёты автора показали, что для описанной геометрии кюветы диффракционная картина в фокальной плоскости выходной линзы кюветы описывается выражением

$$g(u) = p \frac{p}{kup} [\sin kup \cdot e^{i\varphi} - \sin ku(p+q)] + \\ + p \frac{p+r}{ku(p+r)} \sin ku(p+q+r), \quad (2)$$

где g — комплексная амплитуда волны в фокальной плоскости, u — диффракционный угол, $2p$ — амплитуда падающей волны (амплитудный контраст отсутствует) и $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Таким образом (так как $p \ll r$ и $q \ll r$) диффракционная картина в фокальной плоскости выходной линзы кюветы в основных чертах подобна получающейся от щели шириной $2p$, наложенной на «фон», представляющий собой более мелкую диффракционную картину от всей кюветы. Специальные измерения, проведённые автором, показали соответствие этой картины действительности, причём расстояния между полосами, соответствующими диффракции от щели, равны 740μ , а между полосами, соответствующими «фону», — 25μ ; интенсивность «фона» быстро убывает с ростом угла диффракции.

Как известно, метод фазового контраста, позволяющий превратить фазовую модуляцию волнового фронта в амплитудную, состоит

в том, что меняется на $\pm \frac{\pi}{2}$ относительный фазовый сдвиг между

диффрагированным и недиффрагированным световыми полями (одновременно может изменяться и амплитудное соотношение между полями). С этой целью в фокальную плоскость вводится «фазовая пластинка», выполняющая эту операцию. В данном случае в качестве «фазовой пластинки» автор использовал зеркало, представлявшее собой металлизированную стеклянную пластину (фазовый сдвиг при отражении от металлического слоя ψ) размером 21×14 мм или 18×10 мм, причём в центральной части зеркала оставался неметаллизированный участок шириной 50μ , простиравшийся на всю длину зеркала (фазовый сдвиг при отражении от этого участка равен нулю, а коэффициент отражения ниже, чем от металлизированного

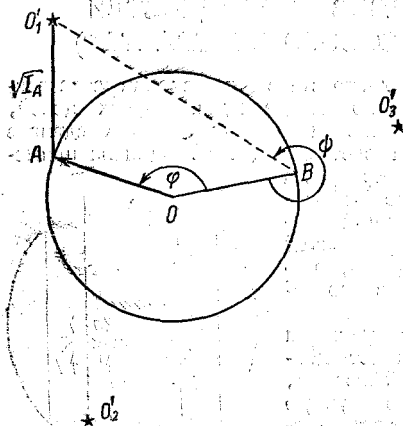


Рис. 2.

участка). Зеркало размещалось таким образом, чтобы на эту центральную неметаллизированную зону попадал центр дифракционной картины, а именно, только спектр нулевого порядка. (Экспериментальная проверка показала, что установка должна производиться с точностью порядка $1-3 \mu$.) В результате получилась система, соответствующая случаю положительного фазового контраста с преувеличенной интенсивностью диффрагированного поля. Соответствующая векторная диаграмма представлена

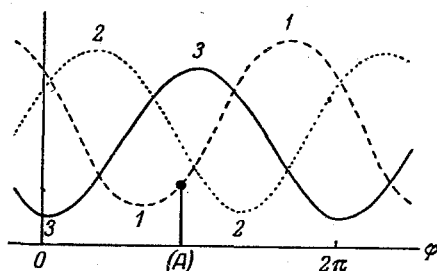


Рис. 3. Зависимость I_A от φ для различных ψ .

на рис. 2. Изменение фазового и амплитудного соотношений между полями A и B эквивалентно переносу полюса O в некоторую другую точку O' . Для обеспечения достаточной точности определения φ при любых его значениях в интервале $0-2\pi$ необходимо располагать возможностью менять ψ , а именно, придавать значению ψ по крайней мере три различных значения (полюса O_1' , O_2' , O_3' на рис. 2). Это достигается сменой «фазовых пластинок» — зеркал с различной толщиной металлического покрытия.

Если при помощи дополнительной линзы (см. рис. 7) получить изображение кюветы, то интенсивность I_A изображения области A будет зависеть от φ . Соответствующие зависимости для значений ψ , соответствующих O_1' , O_2' и O_3' на рис. 2, показаны на рис. 3. Высокая точность измерения φ получается, естественно, на прямолинейных участках этих кривых.

Изображение кюветы, получаемое при помощи описанного фазово-контрастного метода, искажается обстоятельствами двоякого рода. Во-первых, мелкой дифракционной «рябью» за счёт второго члена в выражении (2), во-вторых, за счёт дифракции на фазовой пластинке (рис. 4). Особенно значителен второй эффект, как это видно из рис. 5, представляющего собой регистrogramму интенсивности изображения кюветы, заполненной воздухом, для различных значений давления воздуха в объёме A . Обращает внимание довольно заметная зависимость интенсивности изображения области B (и D) от значения φ (т. е. давления в области A). Это обстоятельство должно учитываться либо путём предварительной градуировки прибора, либо путём детального расчёта этой зависимости. Примерный характер этой зависимости изображён на рис. 6.

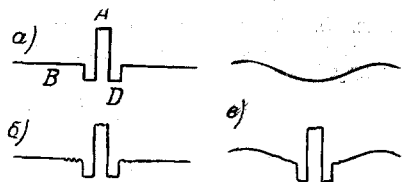


Рис. 4. Фазово-контрастное изображение кюветы. a — без учёта дифракции, $б$ — учитывая дифракцию пучка, проходящего через область B , $в$ — учитывая дифракцию на фазовой пластинке.

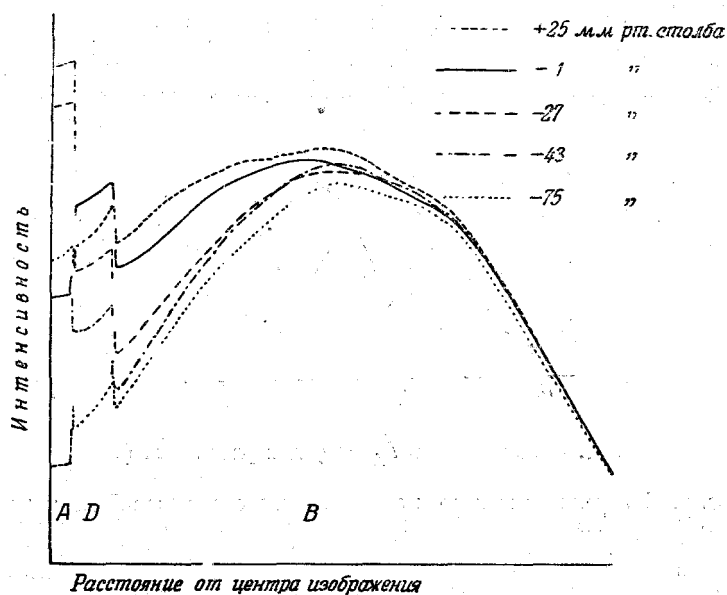


Рис. 5. Регистрограмма зависимости интенсивности изображения кюветы от расстояния до центра изображения для различных давлений воздуха в области А. Давление воздуха в области В условно принять равным нулю.

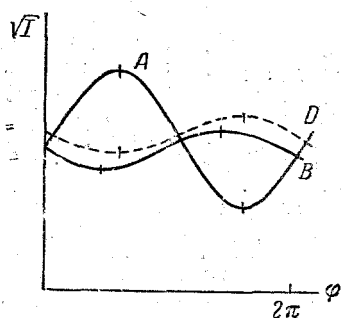


Рис. 6. Зависимость амплитуды световой волны в плоскости изображения кюветы от величины фазового сдвига φ для областей *A*, *B* и *D*.

Определение φ автор осуществляет следующим образом. В плоскости изображения кюветы устанавливается маска с двумя щелями (шириной — 0,15 мм), одна из которых вырезает участок изображения области A , а другая — области B или D . Свет, проникающий через щели, направляется на два фотоумножителя и измеряется отношение фототоков. Скелетная схема установки изображена на рис. 7.

Так как описанным методом φ определяется только с точностью до целого кратного 2π , необходимы дополнительные грубые измерения φ , осуществляемые либо при помощи непосредственного счёта числа полных периодов изменения φ (если определяется постепенное изменение φ),

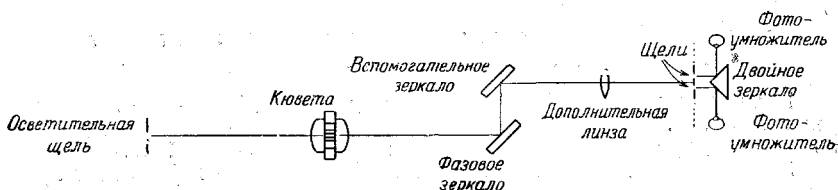


Рис. 7. Скелетная схема рефрактометра.

либо при помощи вспомогательного интерферометра Юнга, устанавливаемого непосредственно после кюветы и убираемого после грубого определения φ для уточнения этого значения описанным методом.

Рефрактометр, построенный автором, позволял производить измерения φ с погрешностью, не превышавшей $2\pi \cdot 10^{-3}$, т. е. при толщине кюветы 10 мм определять $n-1$ с точностью до $0,04 \cdot 10^{-6}$.

Верхний предел измеримых значений φ определяется степенью монохроматичности света, как вследствие возникающей при недостаточно монохроматизованном свете неопределённости φ (дисперсия среды), так и неопределённости ψ (дисперсия фазового сдвига при отражении от металлического зеркала). Автор отмечает, что, используя зелёную линию ртути, возможно измерять (при $t = 10$ мм) $n-1$ в пределах $(0,05 \div 1500) \cdot 10^{-6}$. Если вместо фотоэлектрического метода сравнения интенсивностей изображений областей A и B (или D) воспользоваться визуальным методом, то точность измерений оказывается на порядок меньше.

Автор подробно анализирует возможные источники погрешностей, а также области применения прибора. В частности, он указывает на возможность непрерывного контроля давления или концентрации газовой или жидкой смеси, а также обращает внимание на малость рабочего объёма A кюветы, что позволяет производить измерения с малыми количествами вещества.

В. Юрьев