ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

ров такого рода применения фазового конграста представляет собой описываемый ниже рефрактометр для газов и жидкостей, достигший уже известной степени совершенства, позволяющей говорить не о предварительных опытах, а о серьёзном 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, отделённую от остального объё а B кюветы непрозрачными стенками D, толщинсй q = 1,25 мм (рис. 1). Общая высота кюветы 2p + 2q + 2r = 38 мм, ширина – 17,5 мм



Рис. 1. Схема кюветы.

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 $18-25 \mu$ и длиной 4,5 мм (освещаемой ртутной дугой через светофильтр или монохроматор, выделяющий зелёную линию $\lambda = 5461$ Å, и поляроид) помещаются в фокальной плоскости одной из линз, в результате чего внутренность кюветы находится в параллельном пучке монохроматических лучей. Объём В кюветы заполняется жидкостью

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

421

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

Вследствие малости толщин 2*p* и *q* фрэнт 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

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

где $g \leftarrow$ комплексная амплитуда волны в фэкальной плоскоста, $u - диф-фракционный угол, <math>2\rho - амплитуда$ падающей волны (амплитудный контраст отсутствует) и $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Таким образом (так как p << r й q << 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 полосами, соответствуюмежду щими диффракции от щели, равны 740 µ, а мэжду полосами, соответствующими «фону», -25 µ; 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 $\pm \frac{\pi}{2}$ отно-

сительный 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 слунае в качестве «фазовой пластинки» автор использовал зеркало, представлявшее собой металлизированную стеклянную пластину (фазовый сдвиг при отражении от металлического слоя 4) размером 21 × 14 мм или 18 × 10 мм, причём в центральной части зеркала оставался неметаллизированный участок шириной 50 µ, простиравшийся на всю диину зеркала (фазовый сдвиг при отражении от этого участка равен нулю, а коэффициент отражения ниже, чем от металлизированного

422

£

участка). Зеркало размещалось таким образом, чтобы на эту центральную неметаллизированную зону попадал центр диффракционной картины, а именно, только спектр нулевого порядка. (Экспериментальная проверка показала, что установка должна производигься с точностью порядка 1 — 3 µ.) В результате получилась система, соогветствующая случаю положительного фазового контраста с преувеличенной интенсивностью поря фрагированного поля. Соответствующая 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 металличе-«ского покрытия.

Если при помощи дополнительной линзы (см. рис. 7) получить изображение кюветы, то интенсивность I_A изображения области Aбудет 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.

Рис. 4. Фазово-контрастное изображение кюветы. a — без учёта диффракции, δ — учитывая диффракцию пучка, проходящего через область B, b — учитывая диффракцию на фазовой пластинке.

Изображение кюветы, получаемое при помощи описанного фазово-контрастного метода, искажается обстоятельствами двоякого рода. Во-первых, мелкой диффракционной «рябыо» за счёт второго члена в выражении (2), во-вторых, за счёт диффракции на фазовой пластинке (рис. 4). Особенно значителен второй эффект, как это видно из рис. 5, представляющего собой регистрограмму интенсивности изображения кюветы, заполненной воздухом, для различных φ (различные эначения давления воздуха в объёме *А*). Обращает внимание довольно заметная зависимость интенсивности изображения φ (т. е. давления воздуха в объёме *А*). Эго обстоятельство должно учитываться либо путём предварительной градуировки прибора, либо путём детального расчёта этой зависимости изображен на рис. 6.





Определение *ф* 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 одяя 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 недостаточномонохроматизованном свете неопределённости φ (дисперсия среды), так и неопределённости ψ (дисперсия фазового сдвига при отражении от металлического зеркала). Автор отмечает, что, используя зелёнуюлинию ртути, возможно измерять (при $t = 10 \ \text{мм}$) n-1 в пределах (0,05 ÷ 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 А кюветь, что позволяет производить измерения с малыми количествами вещества.

В. Юрьев