

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ГАЗАХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

И. И. Перепечко, В. Ф. Яковлев

Для определения коэффициента поглощения ультразвука в слабопоглощающих газах интерферометром обычно используют метод ширины пика [1—3], регистрируя ток, текущий через кварц, или ток в выходном контуре генератора. Значительно проще кривую реакции можно получить, наблюдая за изменением напряжения на кварце.

Амплитуда давления на излучателе в ультразвуковом интерферометре с переменной длиной пути определяется, как известно [2], выражением:

$$P_{x=0} = P_0 \frac{1 - \gamma^2 t^{-4\alpha r} - i2\gamma t^{-2\alpha r} \sin 2\omega r / c}{1 - 2\gamma t^{-2\alpha r} \cos 2\omega r / c + \gamma^2 t^{-4\alpha r}},$$

где γ — коэффициент отражения, ω — круговая частота, α — коэффициент поглощения, r — расстояние между кристаллом и отражателем, c — скорость звука в газовой среде. Это давление, вследствие прямого пьезоэффекта, будет вызывать дополнительное напряжение на кварце.

Очевидно, что амплитуда такого напряжения прямо пропорциональна амплитуде давления на кварце

$$V' = V_0 \frac{1 - \gamma^2 t^{-4\alpha r} - i2\gamma t^{-2\alpha r} \sin 2\omega r / c}{1 - 2\gamma t^{-2\alpha r} \cos 2\omega r / c + \gamma^2 t^{-4\alpha r}}, \quad (1)$$

где P_0 и V_0 — амплитудные значения давления и соответствующего ему напряжения на излучателе при $r \rightarrow \infty$.

Напряжение на кварце можно представить в виде суммы $V = V' + V''$, причем V'' остается постоянным при перемещении отражателя и не зависит от поглощения в среде, а V' определяется выражением [1].

К такому же результату можно прийти, пользуясь эквивалентной схемой [4, 5], если полагать, что $R_1 \gg (R_2 + Z)$ и $\rho \gg (R_2 + Z)$, где R_1 — выходное сопротивление генератора, ρ — эквивалентное сопротивление контура, параллельно которому присоединен кварц, R_2 — сопротивление, обусловленное потерями в кристалле, Z — импеданс кварца. При работе с газами приведенные выше неравенства легко выполняются.

Очевидно, что при $r = n\lambda/4$, V' принимает действительные значения. Обозначив $\gamma = e^{-2\beta}$, где β — экспоненциальный коэффициент отражения и $\varphi = \alpha r + \beta$, из уравнения (1) легко получить

$$V'_{\max} = V_0 \operatorname{cth} \varphi \quad \text{и} \quad V'_{\min} = V_0 \operatorname{th} \varphi. \quad (2)$$

Для измерения поглощения в зависимости от величины αr можно использовать несколько методов:

1) αr — мало ($\alpha r < 0,3$): используя формулы (2) и полагая $\alpha\lambda/4 \ll \alpha r$, легко найти

$$N = \frac{V_{2\min} - V_{1\min}}{V_{1\max} - V_{2\max}} = \operatorname{th} \varphi_1 \cdot \operatorname{th} \varphi_2 \approx \varphi_1 \cdot \varphi_2 = \alpha^2 r_1 \cdot r_2 + \alpha\beta (r_1 + r_2) + \beta^2,$$

где r_1 и r_2 — расстояния между кварцем и отражателем, соответствующие двум максимумам напряжения. Обозначив $\beta = t\alpha$, получим

$$\alpha = \sqrt{\frac{N}{r_1 \cdot r_2 + t(r_1 + r_2) + t^2}}. \quad (3)$$

Чтобы определить α надо найти $t = \beta/\alpha$. Для этого воспользуемся приближенным соотношением $V_{\max} - V_{\min} \approx V_0 \operatorname{cth} \varphi$. Тогда

$$R = \frac{V_{1\max} - V_{1\min}}{V_{2\max} - V_{2\min}} = \frac{\operatorname{th} \varphi_2}{\operatorname{th} \varphi_1} \approx \frac{\alpha r_2 + \beta}{\alpha r_1 + \beta}.$$

Отсюда $t = \frac{r_2 - Rr_1}{R - 1}.$

2) Случай большого поглощения $\alpha r > 2,5$. В этом случае $e^{-2(\alpha r + \beta)} \ll 1$, и из уравнений (2) нетрудно получить

$$\alpha = \frac{1}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{V_{1\max} - V_{1\min}}{V_{2\max} - V_{2\min}} \quad \text{или} \quad \alpha \lambda = \frac{2,303}{\Delta n} \lg \frac{V_{1\max} - V_{1\min}}{V_{2\max} - V_{2\min}}, \quad (4)$$

где λ — длина волны, а Δn — число полуволи, расположенных между двумя максимумами на кривой реакции.

3) Пусть расстояние между излучателем и отражателем велико ($r \rightarrow \infty$). Тогда из уравнений (2) следует, что

$$V_{\max} - V_{\infty} = V_0 (\operatorname{cth} \varphi - 1) \quad \text{и} \quad V_{\infty} - V_{\min} = V_0 (1 - \operatorname{th} \varphi).$$

Отсюда

$$\frac{V_{\infty} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\infty}} = \operatorname{th} \varphi \quad \text{или} \quad \operatorname{arth} \left(\frac{V_{\infty} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\infty}} \right) = \alpha r + \beta. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) получаются как частный случай из (2) и аналогичны формулам Пильмайера и Белявской [6] для токов.

Таблица 1

Аргон $\nu = 896$ кгц
 $T = 300^\circ \text{К}$, $\left(\frac{\alpha P}{\nu^2}\right)_{\text{класс}} = 1,9 \times$
 $\times 10^{-13} \text{ см}^{-1} \text{ сек}^2 \text{ атм}$

$P_{\text{атм}}$	$\frac{\nu \text{ кгц}}{P_{\text{атм}}}$	$\frac{\alpha P}{\nu^2} 10^{13} \text{ см}^{-1} \text{ сек}^2 \text{ атм}$
0,498	1,80	1,89
0,402	2,23	1,90
0,295	3,04	1,99
0,200	4,48	1,91
0,100	8,96	1,92
0,067	13,77	1,90
0,05	17,90	1,91

Таблица 2

Гелий $\nu = 896$ кгц
 $T = 300^\circ \text{К}$, $\left(\frac{\alpha P}{\nu^2}\right)_{\text{класс}} = 0,53 \times$
 $\times 10^{-13} \text{ см}^{-1} \text{ сек}^2 \text{ атм}$

$P_{\text{атм}}$	$\frac{\nu \text{ кгц}}{P_{\text{атм}}}$	$\frac{\alpha P}{\nu^2} 10^{13} \text{ см}^{-1} \text{ сек}^2 \text{ атм}$
0,49	1,80	0,55
0,40	2,25	0,53
0,29	3,05	0,53
0,25	3,55	0,51
0,15	5,92	0,53
0,10	8,96	0,54
0,05	18,30	0,54

Для проверки метода были проведены измерения поглощения ультразвука в гелии и аргоне на частоте $\nu = 896$ кгц. Для расчетов большей частью использовалось выражение (3), а при большом поглощении формулы (4) и (5). Иногда оказывалось возможным рассчитывать коэффициент поглощения тремя предложенными методами. Расхождение в этом случае не превышает ошибок эксперимента. Относительная погрешность измерений была порядка 8%. Результаты измерений, обработанные с учетом теории Краснушкина [7], представлены в виде таблиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. Hubbard. The Acoustic resonator interferometer I. Phys. Rev., 1931, 38, 5, 1011—1019.
2. J. C. Hubbard. The acoustic resonator interferometer. Phys. Rev., 1932, 41, 4, 523—535.
3. J. C. Hubbard. Errata. Phys. Rev., 1934, 46, 6, 525.
4. У. Мэзон. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке, М., ИЛ, 1952.
5. В. А. Соловьев. К теории ультразвукового интерферометра. Акуст. ж., 1956, 2, 3, 285—290.
6. Л. Белявская. Новый метод измерения коэффициента поглощения ультразвука в газах. Изв. АН СССР, 1935, 7, N 6—7, 917—925.
7. П. Е. Краснушкин. Расчет интерферометра Пирса. Уч. записки МГУ, 1944, 74, 73—86.

Московский областной педагогический институт им. Н. К. Крупской

Поступила в редакцию
25 мая 1960 г.