

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ГИПЕРЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ МЕТОДОМ СВЕТОРАССЕЯНИЯ

И. М. Арефьев, В. А. Гладкий, В. А. Станков

Известно /1/, что Манделъштам-Бриллюэновская (МБ) спектроскопия позволяет измерять скорость и поглощение гиперзвука с частотой 3 - 7 Гц в жидкостях. При этом скорость гиперзвука v_h определяется из смещения компонент МБ $\Delta\nu$

$$\Delta\nu = (2\pi\nu v_h/c) \sin(\theta/2), \quad (1)$$

а амплитудный коэффициент поглощения гиперзвука α - из ширины компонент $\delta\nu$:

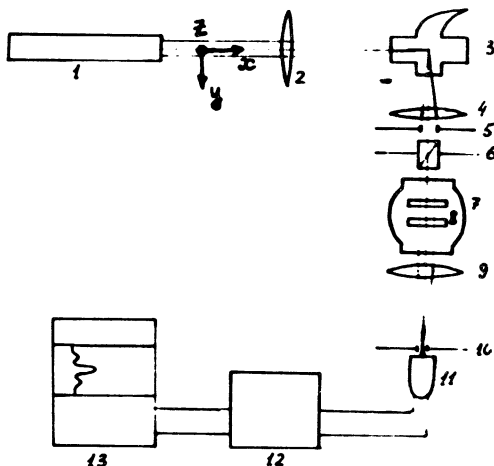
$$\delta\nu = \alpha v_h / \lambda c, \quad (\delta\nu \ll \Delta\nu). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) ν - частота возбуждающего света, n - показатель преломления жидкости, c - скорость света, θ - угол рассеяния.

Измерения ширины компонент МБ в жидкостях были выполнены впервые в 1964 году /2/ и затем проводились неоднократно с использованием фотографической /1-4/ и фотоэлектрической /5-8/ регистрации спектров. В настоящее время прямые акустические методы позволяют измерить поглощение звука в жидкостях на частотах f вплоть до 3 Гц /9,10/. Сравнение результатов, полученных оптическим и акустическим методами, показывает, что в некоторых случаях есть существенные расхождения. Наблюдаемые расхождения мы склонны отнести за счет методических погрешностей экспериментов по светорассеянию, состоящих, главным образом, в неточном измерении и исключении аппаратной функции. Возникает вопрос, какая действительная точность измерения поглощения звука методом светорассеяния может быть в настоящее время достигнута, и может ли метод светорассеяния конкурировать с акустическим методом? На

Этот вопрос мы попытались ответить, выполнив измерения ширины компонент МБ в десяти жидкостях.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Использовалась фотоэлектрическая запись спектров. Сканирование спек-



Р и с. 1. Схема установки. 1 - многомодовый неон-гелиевый лазер ЛП-36А ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$); 2 - фокусирующий объектив с фокусным расстоянием $F = 180 \text{ мм}$; 3 - кювета с исследуемой жидкостью; 4 - коллимирующий объектив, $F = 180 \text{ мм}$; 5 - апертурная диафрагма, $\varnothing 6 \text{ мм}$; 6 - призма Николя; 7 - вакуумная камера; 8 - интерферометр Фабри-Перо; коэффициент отражения зеркал $R \approx 98\%$; область дисперсии $0,5 \text{ см}^{-1}$; 9 - камерный объектив, $F = 270 \text{ мм}$; 10 - диафрагма, $\varnothing 0,48 \text{ мм}$; 11 - фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79; 12 - линейный интенсивметр ПИ-4-1; 13 - самописец ЭПИ-09-М1.

тров осуществлялось изменением давления в камере 7, при этом в откачанную камеру через узкий капилляр натекал газообразный азот. Давление азота на выходе капилляра - $8 + 9 \text{ атм}$. Скорость натекания была такой, что время записи ширины аппаратной функции примерно в 30 раз превышало постоянную времени регистрирующей системы. В таких условиях искажение вследствие инерционности регистрирующей системы пренебрежимо мало [11]. Интерференционные порядки в спектре на ленте самописца были эквидистантными с по-

грешностью $0,5 + 1,5\%$ в интервале давлений в интерферометре от нескольких мм рт. столба до ~ 1 атм.

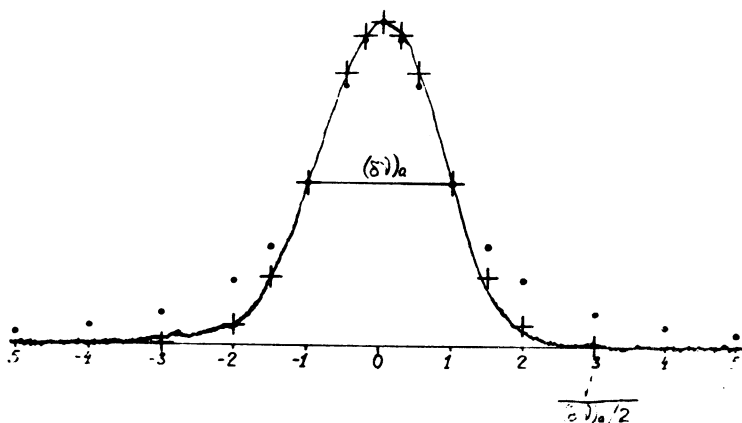
Аппаратная функция установки определялась спектром излучения лазера, апертурой возбуждающего ($2\delta_1$) и рассеянного ($2\delta_2$) света, аппаратной функцией интерферометра и диафрагмой IO, расположенной в центре интерференционной картины.

Строгий расчет влияния апертуры рассеянного и (или) возбуждающего света на спектр МБ рассеяния при монохроматической возбуждающей линии и $\delta\nu \approx 0,01 \text{ см}^{-1}$ при $\theta = 90^\circ$ сделан в [12]. Согласно этому расчету влияние апертуры несущественно при $(\delta_1 + \delta_2)\theta < < 0,02$. В нашем эксперименте было $(\delta_1 + \delta_2)/\theta = 0,02$; $\theta = 90^\circ \pm 0,5^\circ$. Запись спектров тонкой структуры линии Релея в бензоле при различных апертурах рассеянного света показала, что с увеличением δ_2 наблюдаемая ширина МБ компонент возрастает за счет увеличения ширины аппаратной функции интерферометра, а апертура δ_2 не влияет заметно на наблюдаемую ширину компонент МБ вплоть до $\delta_2/\theta = 0,08$. Этот результат объясняется тем, что преимущественный вклад в ширину аппаратной функции установки дает линия возбуждения.

При мощности лазерного излучения $P = 22$ мвт аппаратная функция установки была гауссовой с шириной $(\delta\nu)_a = 0,031 \text{ см}^{-1} + 4\%$ (рис. 2). При уменьшении P , вызываемом уменьшением диафрагмы внутри лазерного резонатора, до $P = 11$ мвт ширина и форма аппаратной функции не менялась. При дальнейшем уменьшении P $(\delta\nu)_a$ уменьшалась, а сама аппаратная функция имела вид функции Фойгта (свертки гауссовой и лоренцевой функций), но с малым вкладом лоренцевой функции. При $P < 0,5$ мвт $(\delta\nu)_a = 0,018 \text{ см}^{-1}$ и $p/q = 0,2$; $p = 0,0035 \text{ см}^{-1}$ и $q = 0,017 \text{ см}^{-1}$ — соответственно ширины лоренцова и гауссова распределений, входящих в свертку. В последнем случае лазер генерировал только продольные моды, расстояние между которыми по спектру при длине резонатора 150 см составляет $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Эту величину плюс ширину лоренцевой функции $p = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ следует сопоставить с рассчитанной спектральной шириной диафрагмы IO, равной $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, и шириной аппаратной функции интерферометра $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$.

Спектры регистрировались при максимальной мощности лазерного излучения. Вид спектра и его обработка иллюстрируется рис. 3.

Во всех исследованных жидкостях, за исключением четыреххлористого углерода, ширина центральной компоненты релеевского триплета в пределах ошибки измерения равнялась ширине аппаратной функции $(\delta\nu)_a$. Это показывало, что вклад в I_{zz} других видов рассеяния (поляризованная часть анизотропного рассеяния, крыло сжатия и

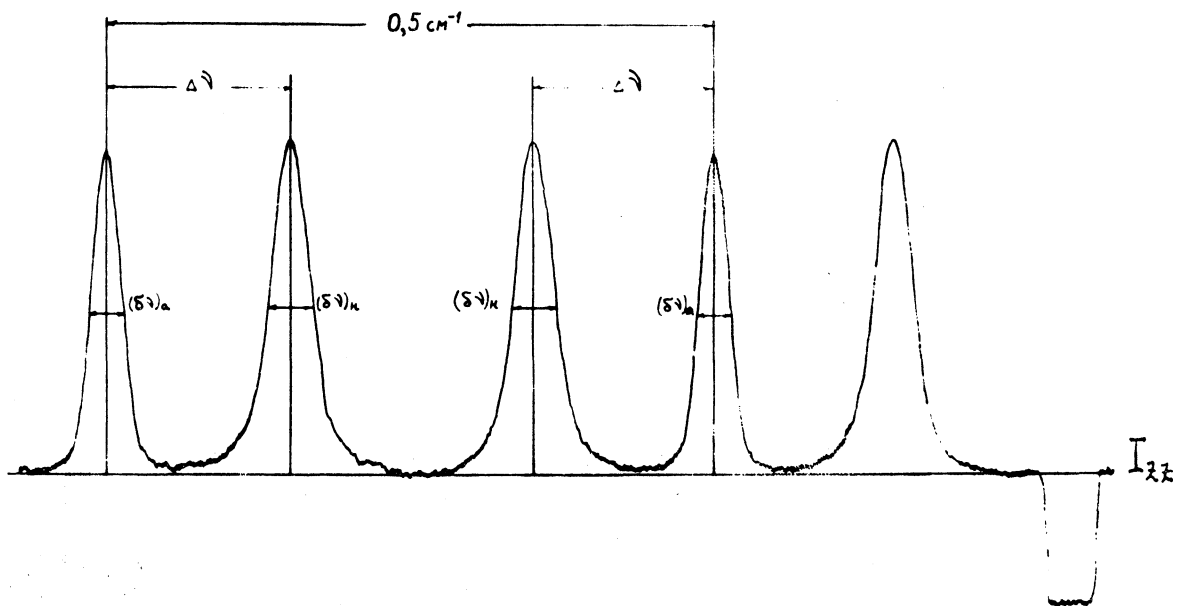


Р и с. 2. Аппаратная функция установки при мощности излучения лазера $P = 22$ мвт. Крестами отмечен гауссов контур, точками - лоренцев.

т.п.) либо мал, либо его можно рассматривать как фон. В случае четыреххлористого углерода ширина центральной компоненты равнялась $0,035 \text{ см}^{-1}$. Этот результат можно объяснить заметным вкладом в I_{zz} крыла сжатия /8/.

Контур МБ компонент имели вид функций Фойгта. Исключение гауссовой аппаратной функции ширины $(\delta\nu)_a$ из наблюдаемой фойгтовой функции ширины $(\delta\nu)_H$ и нахождение истинной ширины лоренцева БМ спектра проводились по графику, приведенному в работе /13/.

Результаты измерений приведены в таблице I. Ошибка измерения поглощения определялась случайной ошибкой записи спектров и случайной ошибкой округления при измерении ширины линии линейкой. Измеренное поглощение α/τ^2 обнаруживает хорошее соответствие акустическим данным для α/τ_u^2 и в тех случаях, когда ранее такого соответствия не наблюдалось (толуол, анилин). В случае



Р и с. 3. Запись спектра МБ р-бензина в пара-ксилоле.

Результаты измерения погло

Жидкости	t, °C	f, Гц	v _h , мсек-1	$\frac{v_h - v_u}{v_u}, \%$
Бензол	22,5	5,00 ± 0,3%	1490 ± 0,4%	13,5 ± 0,6
Четырех- хлористый углерод	21,6	3,32 ± 0,5%	1018 ± 0,6%	9,1 ± 0,7
Хлороформ	22,7	3,41 ± 0,5%	1056 ± 0,6%	6,1 ± 0,7
Толуол	22,3	4,47 ± 0,5%	1341 ± 0,6%	1,7 ± 0,7
АНИЛИН	21,6	5,99 ± 0,3%	1695 ± 0,4%	2,8 ± 0,5
ЦИКЛОГЕКСАН	22,5	4,21 ± 0,3%	1350 ± 0,4%	6,0 ± 0,5
Н-гексан	20,8	3,38 ± 0,5%	1098 ± 0,5%	1,7 ± 0,6
П-КСИЛОЛ	22,0	4,48 ± 0,6%	1341 ± 0,6%	1,6 ± 0,7
О-КСИЛОЛ	22,6	4,64 ± 0,4%	1380 ± 0,4%	2,3 ± 0,5
М-КСИЛОЛ	22,0	4,53 ± 0,7%	1354 ± 0,7%	1,6 ± 0,7

а - ссылка /3/; в - ссылка /5/, указанная ошибка измерений ~ 10%,
/10/; е - ссылка /8/; г - ссылка /7/; з - ссылка /6/, резуль
поправкой на температуру

Таблица I

ценения гиперзвука в жидкостях

$\delta \nu \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$		$\alpha \cdot 10^{-3},$ см^{-1}	$\frac{\alpha}{r^2} \cdot 10^{17},$ $\text{ см}^{-1} \cdot \text{сек}^2$	$\frac{\alpha}{r_u^2} \cdot 10^{17},$ $\text{ см}^{-1} \cdot \text{сек}^2$ $r_u = 2,91 \text{ Гц}$
Данные авторов	Литературные данные			
6,2 ± 19%	7±2 ^a 5,8 ^b	3,9 ± 19%	15,6 ± 20%	53 ± 5
14,5 ± 9%	17±3 ^a 16,1±1,3 ^e 10,4 ^b	13,4 ± 9%	122 ± 10%	152 ± 16
10,1 ± 11%	11±2 ^a	9,0 ± 11%	77,6 ± 12%	78 ± 8
17,5 ± 5%	13,2±0,5 ^b 11,6 ^b 10±2 ^{a,c} 9±1 ^f	12,3 ± 5%	61,5 ± 6%	62 ± 6
26,8 ± 5%	16±2 ^c	14,9 ± 5%	41,5 ± 6%	39 ± 4
21,8 ± 5%	15,5 ^b	15,2 ± 5%	86,4 ± 6%	—
7,0 ± 13%	—	6,0 ± 13%	52,7 ± 14%	—
14,4 ± 8%	15±1,7 ^f	10,1 ± 9%	56,4 ± 10%	—
15,5 ± 7%	19,3±1,7 ^f	10,5 ± 7%	48,8 ± 8%	—
16,3 ± 6%	—	11,3 ± 7%	55,0 ± 8%	—

результаты пересчитаны для $\theta = 90^\circ$; с - ссылка /4/; d - ссылка
таты пересчитаны для $\theta = 90^\circ$. Скорости ультразвука v_u с
взяты из книги /15/.

толуола полученное значение α/r^2 близко ложится на рассчитанную по теплоемкости /10/ кривую релаксации объемной вязкости с одним временем релаксации.

Как видно из таблицы, ошибка высокочастотных ($f_u \approx 3$ ГГц) акустических измерений составляет $\sim 10\%$. (Более обширные измерения поглощения ультразвука с частотой 1,5 ГГц в жидкостях выполнены с ошибкой 5-6% /9,10,14/. Для половины из исследованных нами жидкостей ошибка измерения поглощения меньше ошибки акустических измерений, причем для трех жидкостей - почти в два раза. При этом частота звука в оптических измерениях выше. Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время измерения поглощения гиперзвука методом светорассеяния не только дополняют акустические измерения, но и могут иметь преимущество по точности получаемого результата.

В заключение выражаем благодарность И. Л. Фабелинскому за внимание к этой работе и обсуждение.

Поступила в редакцию
2 марта 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. И. Л. Фабелинский. Молекулярное рассеяние света. Изд-во "Наука", М., 1965 г.
2. Д. И. Маш, В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский. ЖЭТФ, 47, 783 (1964).
3. В. С. Старунов. Труды ФИАН, 39, 151 (1967).
4. Е. В. Тиганов. Автореферат диссертации, М., 1968 г.
5. P. A. Fleury, R. Y. Chiao. Physics of Quantum Electronics, McGraw-Hill, New York, 1966, p.241.
6. G. Benedek, T. Greytak. Proc. I.E.E.E., 53, 1623 (1965).
7. D. A. Jackson, R. Johns, E. R. Pike. Phys. Letts., 28A, 272 (1968).
8. G. I. A. Stegeman, W. S. Gornall, V. Volterra, B. P. Stoicheff. Journ. Acoust. Soc. Amer., 49, 979 (1971).
9. A. A. Berdyev, N. B. Lezhnev. Seventh International Congress on Acoustics, Budapest, 1971, 19M2, p.5.

10. В. В. Лапкин. Автореферат диссертации, М., 1970 г.
11. Г. Г. Петраш. Труды ФИАН, 27, 3 (1964).
12. Y. Yeh. Appl. Optics, 8, 1254 (1969).
13. С. Г. Раутиан. УФН, 66, 475 (1958).
14. К. G. Plass. Acustica, 19, 236 (1967/68).
15. Л. Бергман. Ультразвук, ИИЛ, М., 1956 г.