

10

## Акустооптическая модуляция и отклонение электромагнитного излучения терагерцевого диапазона в неполярных жидкостях

© П.А. Никитин<sup>1</sup>, В.Б. Волошинов<sup>1</sup>, В.В. Герасимов<sup>2</sup>  
Б.А. Князев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет

E-mail: nikitin.pavel.a@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 июля 2016 г.

Приведены результаты цикла экспериментов по управляемому отклонению электромагнитного излучения лазера на свободных электронах при дифракции на акустической волне в неполярных жидкостях. Приводятся сведения об акустических и оптических свойствах жидкостей, прозрачных в терагерцевом диапазоне. Показано, что неполярные жидкости могут оказаться более эффективной средой акустооптического взаимодействия, чем диэлектрические кристаллы или полупроводники.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.13.44816.16428

В связи с освоением терагерцевого (THz) диапазона электромагнитных волн в последнее время становится особенно актуальной задача оперативного управления параметрами пучков THz-излучения [1]. Известно, что в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах нашли широкое применение акустооптические (АО) устройства, обладающие хорошим быстродействием и позволяющие контролировать интенсивность, частоту и направление поляризации излучения. Потребности практики требуют создания в ближайшем будущем АО-устройств, эффективно работающих и в THz-диапазоне. Основным параметром, характеризующим эффективность АО-взаимодействия, является АО-качество среды  $M_2 = p^2 n^6 / \rho V^3$ , где  $p$  — фотоупругая постоянная,  $n$  — показатель преломления,  $\rho$  — плотность среды, а  $V$  — скорость звука.

Таким образом, в ТГц-диапазоне необходимо использовать прозрачные среды с малой скоростью звука и с большим показателем преломления. Оказалось, что материалы с указанным сочетанием физических свойств неизвестны. Поэтому еще не созданы АО-устройства, эффективно работающие в ТГц-диапазоне.

На сегодняшний день опубликована лишь одна работа, посвященная АО-взаимодействию в жидкостях в ТГц-диапазоне [2]. В ней исследовалась дифракция излучения с длиной волны  $\lambda = 119 \mu\text{m}$ . Эксперимент показал, что АО-качество циклогексана составляет  $M_2 = 600 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ , а в тетрахлорметане эта величина несколько больше.

Поскольку значения фотоупругих постоянных  $\rho$  жидкостей в ТГц-диапазоне априори неизвестны, величина АО-качества  $M_2$  оценивалась с использованием значения уругооптической постоянной  $\rho(\partial n/\partial \rho)$  [3]:

$$M_2 = \left( \rho \frac{\partial n}{\partial \rho} \right)^2 \frac{4}{\rho V^3} = \left[ \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n} \right]^2 \frac{4}{\rho V^3}. \quad (1)$$

Впервые проведенная систематизация ряда свойств жидкостей позволила собрать в таблице данные по АО-характеристикам жидких сред на длине волны  $\lambda = 130 \mu\text{m}$ , а также коэффициентам поглощения мощности  $\alpha$  электромагнитного излучения и коэффициентам затухания амплитуды  $\alpha_s$  акустической волны, нормированным на квадрат частоты  $F$  ультразвука [3–11]. Значения плотности  $\rho$  можно найти в тех же работах, в которых приведены значения скорости звука  $V$ . Анализ показал, что наибольшая интенсивность дифрагированного излучения  $I_1$  достигается при использовании пьезопреобразователя прямоугольной формы с площадью  $S = Ld$  и оптимальной длиной  $L^{opt} = 1/\alpha$  [12]:

$$I_0(L) = I_0 \exp(-\alpha L), \quad I_1(L) = I_0 \frac{\pi^2}{2\lambda^2} \frac{M_2 P_a}{S} L^2 \exp(-\alpha L), \quad (2)$$

где  $I_0$  и  $I_0(L)$  — интенсивности падающего на звуковой столб и прошедшего излучения,  $d$  — поперечный размер пьезопреобразователя,  $P_a$  — мощность акустической волны. Поэтому максимально достижимая эффективность АО-взаимодействия  $\xi = I_1(L)/I_0(L)$  при  $L = L^{opt}$  зависит от величины  $M_2/\alpha$ , которая может быть рассчитана на основе данных таблицы.

Расчет по формуле (2) при характерных значениях  $\lambda = 100 \mu\text{m}$ ,  $M_2 = 500 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ,  $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$ ,  $S = 1 \text{ cm}^2$  и  $P_a = 1 \text{ W}$  показал, что

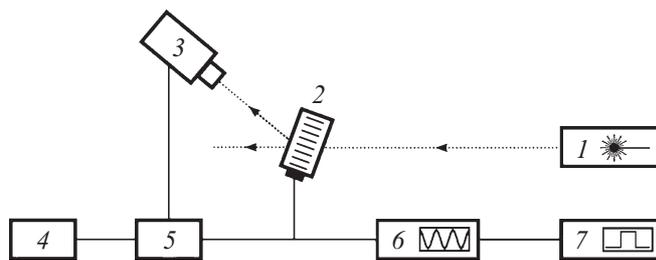
Акустические, оптические и акустооптические характеристики неполярных жидкостей в ТГц-диапазоне

Жидкость	$V$ , m/s	$n$	$\alpha$ , $\text{cm}^{-1}$	$(\alpha_s/F^2) \cdot 10^{17}$ , $\text{s}^2/\text{cm}$	$M_2 \cdot 10^{15}$ , $\text{s}^3/\text{kg}$
Циклогексан	1255 [4]	1.421 [8]	0.37 [8]	180 [7]	600
Гексан	1077 [5]	1.372 [9]	0.69 [9]	60 [3,7]	770
Гексадекан	1338 [5]	1.428 [9]	0.69 [9]	100 [5]	520
Керосин	1320 [6]	1.437 [10]	1.3 [10]	—	540
Бензол	1298 [6]	1.496 [8]	5.5 [8]	755 [7]	700
1-Этанол	1155 [7]	1.498 [11]	130 [11]	54 [7]	1200
Тетрахлорметан	922 [3]	1.487 [8]	1.4 [8]	540 [3]	1100

$\xi \approx 0.01\%$ . При столь малых значениях  $\xi$  регистрация дифрагированного излучения возможна лишь при больших мощностях падающего электромагнитного излучения. Кроме этого, максимальная эффективность АО-взаимодействия достигается при высокой степени монохроматичности излучения. Поэтому данное экспериментальное исследование было выполнено с использованием излучения новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с длиной волны  $\lambda = 130 \mu\text{m}$  [13].

Как видно из таблицы, спирты и производные бензола непригодны для исследования АО-взаимодействия в ТГц-диапазоне. Поэтому в работе были исследованы такие жидкости, как циклогексан, гексан, гексадекан, тетрахлорметан, а также керосин и уайт-спирит (нефрас-С4-155/200). Так как в ТГц-диапазоне из-за больших значений  $\lambda$  сильно сказываются дифракционные эффекты, апертура пучка ТГц-излучения была выбрана равной 6 mm, при этом дифракционная расходимость пучка не превышала  $1.5^\circ$ . Детектирование дифрагированного излучения осуществлялось оптоакустическим приемником Голея при амплитудной модуляции пучка акустической волной, модулированной с частотой 10–15 Hz [14]. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке.

В эксперименте использовался пьезопреобразователь круглой формы диаметром  $D = 10 \text{ mm}$ , изготовленный из пьезокерамики ЦТС-19 и работающий на первой гармонике при частоте ультразвука  $F = 3 \text{ MHz}$ . На выходе АО-ячейки расчетный угол  $\Delta\theta$  между дифрагированным и прошедшим пучками излучения составил для циклогексана и уайт-



Блок-схема экспериментальной установки: 1 — ЛСЭ; 2 — АО-ячейка; 3 — ячейка Голея; 4 — персональный компьютер; 5 — синхронный детектор; 6 — высокочастотный генератор; 7 — генератор импульсов.

спирита величину  $\Delta\theta = 19^\circ$ , а для гексана —  $\Delta\theta = 22^\circ$ . Однако в эксперименте этого различия в углах  $\Delta\theta$  выявить не удалось. Это связано с дифракционной расходимостью звукового и ТГц-пучков, из-за которой АО-взаимодействие наблюдалось в широком диапазоне углов Брэгга. Эксперимент показал, что интенсивность дифрагированного излучения уменьшалась в 2 раза при изменении внешнего угла Брэгга на  $2^\circ$ .

При анализе эффективности АО-взаимодействия  $\xi$  с использованием соотношения (2) при площади пьезопреобразователя  $S = \pi D^2/4$  и длине АО-взаимодействия, равной диаметру пьезопреобразователя  $L = D$ , было получено следующее соотношение:

$$\xi = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} \frac{M_2 P_a}{S} L^2 = \frac{2\pi}{\lambda^2} M_2 P_a. \quad (3)$$

В пределах ошибки измерений эффективность АО-взаимодействия в циклогексане, гексане, гексадекане и уайт-спирите оказалась приблизительно одинаковой и составила величину  $\xi = 0.02\%$  при подводимой электрической мощности около 3 W. Используя соотношение (3) и предполагая коэффициент преобразования подводимой электрической мощности в акустическую равным единице, было вычислено АО-качество данных четырех жидкостей. В среднем оно было равно  $M_2 = (170 \pm 30) \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ , что существенно меньше предсказанной величины. Данный факт можно объяснить следующим образом. В первых, упруго-оптическая постоянная рассчитывалась по упрощенной

формуле (1), что могло привести к относительной погрешности при вычислении АО-качества до 20% [3]. Во-вторых, предполагалось, что вся подводимая к пьезопреобразователю электрическая мощность преобразуется в акустическую, что не соответствовало действительности.

Определенное из эксперимента АО-качество тетрахлорметана  $M_2 = (270 \pm 20) \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$  было также меньше предсказанного значения (см. таблицу). Однако полученный результат оказался в 1.5 раза выше, чем в первых четырех жидкостях, что качественно было предсказано теорией. В то же время АО-качество керосина  $M_2 = (5.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$  оказалось на два порядка меньше ожидаемой величины. Причина подобного эффекта остается невыясненной.

Таким образом, рассчитанные из экспериментальных данных значения АО-качества качественно совпали с предсказаниями теории. Реализованное управляемое отклонение ТГц-излучения в жидкостях на углы порядка  $20^\circ$ , а также модуляция с глубиной 0.02% при подводимой электрической мощности около 3 W по эффективности дифракции и углу отклонения оказались не хуже, чем в кристалле германия. Проведенное экспериментальное и теоретическое исследование доказывает перспективность использования неполярных жидкостей для реализации АО-взаимодействия в ТГц-диапазоне электромагнитного спектра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-22-00042.

## Список литературы

- [1] *Neu J., Beigang R., Rahm M.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103 (4). P. 041109 (4).
- [2] *Vogel T., Dodel G.* // Infrared Phys. 1985. V. 25 (1/2). P. 315–318.
- [3] *Uchida N.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1968. V. 7 (10). P. 1259–1266.
- [4] *Gonzales B. et al.* // J. Chem. Eng. Data. 2010. V. 55 (6). P. 2294–2305.
- [5] *Djerdjev A.M., Beattie J.K.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2008. V. 10 (32). P. 4843–4852.
- [6] *Abulencia J.P., Theodore L.* Fluid Flow for the Practicing Chemical Engineer. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. 600 p.
- [7] *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [8] *Pedersen J.E., Keiding S.R.* // IEEE J. Quant. Electron. 1992. V. 28 (10). P. 2518–2522.
- [9] *Laib J.P., Mittleman D.M.* // J. Infrared Milli. Terahz Waves. 2010. V. 31 (9). P. 1015–1021.

- [10] *Jin Y.S., Kim G.J., Shon C.H.* et al. // J. Korean Phys. Soc. 2008. V. 53 (4). P. 1879–1885.
- [11] *Chamberlain J.E.* et al. // Nature. 1975. V. 255 (5506). P. 319–321.
- [12] *Nikitin P., Voloshinov V., Gerasimov V.* et al. // Acta Phys. Pol. 2015. V. 127 (1). P. 49–51.
- [13] *Kulipanov G.N., Bagryanskaya E.G., Chesnokov E.N.* et al. // IEEE Trans. Terahz Sci. Technol. 2015. V. 5 (5). P. 798–809.
- [14] *Voloshinov V.B., Nikitin P.A., Gerasimov V.V.* et al. // Quant. Electron. 2013. V. 43 (12). P. 1139–1142.