

10

Акустооптическая модуляция и отклонение электромагнитного излучения терагерцевого диапазона в неполярных жидкостях

© П.А. Никитин¹, В.Б. Волошинов¹, В.В. Герасимов²
Б.А. Князев^{2,3}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

³ 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, ρ — 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 ρ 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 α электромагнитного излучения и коэффициентам затухания амплитуды α_s акустической волны, нормированным на квадрат частоты F ультразвука [3–11]. Значения плотности ρ 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/α , 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

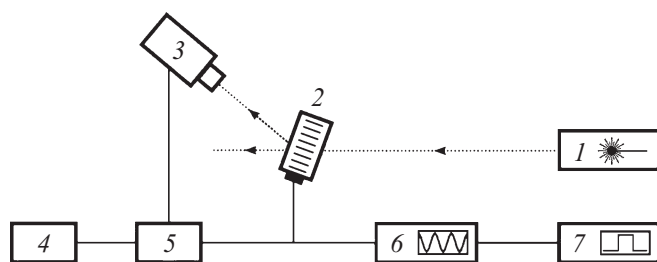
Акустические, оптические и акустооптические характеристики неполярных жидкостей в ТГц-диапазоне

Жидкость	V , m/s	n	α , cm^{-1}	$(\alpha_s/F^2) \cdot 10^{17}$, s^2/cm	$M_2 \cdot 10^{15}$, s^3/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 ξ 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 λ сильно сказываются дифракционные эффекты, апертура пучка ТГц-излучения была выбрана равной 6 mm, при этом дифракционная расходимость пучка не превышала 1.5° . 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° .

При анализе эффективности АО-взаимодействия ξ 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° , 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.