

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 534-14;534.2;535.421

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЖИЖЕННОГО ЭЛЕГАЗА¹

© 2021 г. А. К. Никитин^а, П. А. Никитин^а, *

^а Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
ул. Бутлерова 15, Москва, 117342 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 26.04.2021 г.

Принята к публикации 01.06.2021 г.

Разработана модель квазиортогонального акустооптического взаимодействия в сжиженном элегазе, учитывающая влияние температуры элегаза на параметры, определяющие акустооптическую дифракцию: плотность, скорость звука, показатель преломления, коэффициенты поглощения излучения и ультразвука. Установлено, что оптимальными условиями для максимальной глубины модуляции терагерцевого излучения с длиной волны 119 мкм являются температура 0°C и давление 17 бар.

DOI: 10.31857/S0033849421100119

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) устройства находят широкое применение в области информационных технологий [1, 2]. Эти устройства используются для управления параметрами излучения инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов. В последние годы возрос интерес к применению этих устройств для создания высокоскоростных линий связи, использующих излучение терагерцевого (ТГц) диапазона. К сожалению, при использовании материалов АО-ячейки, хорошо зарекомендовавших себя в ИК-диапазоне, глубина АО-модуляции ТГц-излучения составляет не более 0.01% на 1 Вт управляющей электрической мощности [3]. Этот факт обусловлен большим значением коэффициента поглощения α ТГц-излучения в материале АО-ячейки (для монокристаллического германия $\alpha \approx 1 \text{ см}^{-1}$ при длине волны $\lambda = 130 \text{ мкм}$) [4]. Недавние исследования показали, что в качестве среды АО-взаимодействия может быть использован элегаз (гексафторид серы, SF₆), поскольку это вещество прозрачно для ТГц-излучения и характеризуется высоким значением коэффициента АО-качества из-за низкой скорости звука (около 300 м/с) [5, 6]. Благодаря этому глубина АО-модуляции возрастает на несколько порядков и может достигать 80% при значительной акустической мощности. Эле-

газ является коммерчески доступным веществом и, кроме этого, поставляется в сжиженном виде в баллонах, что позволяет наполнять экспериментальную кювету без использования насоса. Таким образом, на сегодняшний день данное вещество является аналогом парателлуриата (TeO₂), который используется в качестве среды АО-взаимодействия в видимом диапазоне и также характеризуется рекордным значением коэффициента АО-качества [7].

Указанные выше экспериментальные исследования проводились при температурах, близких к комнатной. В работе [5] температура составляла 15°C, а в работе [6] – от 25 до 30°C. Авторами работы [6] установлено, что при температуре 24°C можно достичь примерно в два раза большей эффективности АО-дифракции, чем при 15°C, если использовать ту же акустическую мощность. Однако с повышением температуры среды и мощности ультразвука начинает сказываться эффект кавитации вблизи поверхности излучателя ультразвука, и эффективность дифракции резко падает. К сожалению, наша модель не учитывает эффекта кавитации и локального нагрева среды АО-взаимодействия вблизи излучателя ультразвука вследствие затухания ультразвукового пучка. Поэтому влияние мощности ультразвуковой волны на эффективность АО-дифракции можно определить только экспериментально, что было сделано, например, в [6].

Отметим, что экспериментальные результаты работ [5, 6] противоречат использованной в них

¹ Работа доложена на Четвертой Международной молодежной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения” (Астрахань, 5–8 октября 2020 г.).

модели, согласно которой эффективность дифракции слабо зависит от температуры. Поэтому нами предлагается усовершенствованная модель, учитывающая дополнительный фактор, а именно: зависимость прозрачности среды АО-взаимодействия от температуры. Расчеты выполнены для трех различных температур сжиженного элегаза (20, 0 и -40°C), для которых известны спектры пропускания элегаза.

1. МОДЕЛЬ АО-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Как известно, благодаря фотоупругому эффекту акустическая волна формирует в среде фазовую дифракционную решетку, перемещающуюся со скоростью звука. Если эта решетка является достаточно толстой, то будет наблюдаться только нулевой и плюс (или минус) первый дифракционные максимумы, что соответствует брэгговскому режиму дифракции (рис. 1). В этом случае явление АО-дифракции наблюдается только при выполнении условия фазового синхронизма для волновых векторов падающего \vec{k}_0 и дифрагированного $\vec{k}_{\pm 1}$ излучения, а также волнового вектора звука \vec{K} : $\vec{k}_0 \pm \vec{K} = \vec{k}_{\pm 1}$. В дальнейшем для определенности будем считать, что АО-дифракция излучения происходит в плюс первый порядок.

Если частота ультразвуковой волны невелика и $|\vec{K}| \ll |\vec{k}_0|$, то можно считать, что амплитуда дифрагированного излучения зависит только от одной координаты x . В общем случае интенсивность I_1 дифрагированного излучения нелинейно зависит от акустической мощности P_a , что усложняет анализ. Поэтому для исключения этого параметра мы ограничились рассмотрением режима малой эффективности дифракции ($I_1 \ll I_0$), когда интенсивность I_1 дифрагированного излучения линейно связана с мощностью ультразвука [6]:

$$I_1 = [I_0 \exp(-\alpha L)] \frac{\pi^2}{2\lambda^2} M_2 \frac{L}{d} [P_a \exp(-\alpha_s l)], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения, d и L – ширина и длина излучателя ультразвука соответственно, l – расстояние, на котором ТГц-пучок проходит от излучателя ультразвука, α_s – коэффициент затухания мощности ультразвуковой волны, α – коэффициент поглощения излучения, M_2 – коэффициент АО-качества среды.

Коэффициент АО-качества M_2 не зависит от мощности ультразвука P_a , интенсивности излучения I_0 и размеров излучателя ультразвука (d и L) и определяется лишь оптическими и акустическими свойствами среды. Поэтому коэффициент M_2 характеризует пригодность использования среды для реализации АО-взаимодействия. Для жидких

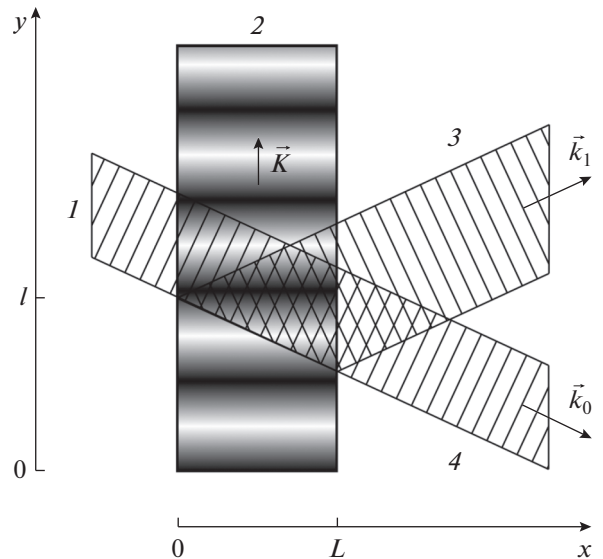


Рис. 1. Схема взаимодействия ТГц-излучения с ультразвуковым пучком, реализуемая в АО-модуляторах: 1 – пучок падающего излучения, 2 – ультразвуковой пучок, 3 – пучок дифрагированного излучения, 4 – пучок прошедшего излучения.

сред и газов коэффициент АО-качества M_2 и показатель преломления n можно рассчитать, используя модель Лоренц–Лорентца [5]:

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

где ρ – плотность среды, A – коэффициент пропорциональности, пропорциональный средней поляризуемости молекулы, V – скорость звука.

Таким образом, для расчета интенсивности I_1 дифрагированного излучения достаточно задать длину волны излучения λ , размеры d и L излучателя ультразвука, а также мощность ультразвука P_a и расстояние l . Значения же плотности ρ , скорости звука V , коэффициента поглощения излучения α и коэффициента затухания мощности ультразвуковой волны α_s зависят от температуры и давления сжиженного газа. Указанные зависимости достаточно сложные, и поэтому необходимо использовать большие объемы опубликованных данных и аппроксимировать их с помощью дробно-рациональных функций.

2. ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Несмотря на то, что свойства сжиженного элегаза достаточно хорошо изучены, данные по его прозрачности в ТГц-диапазоне ($\lambda = 119$ мкм) из-

вестны лишь при следующих температурах и давлениях:

$$1) t = -40^\circ\text{C}, p = 11 \text{ бар}, \alpha = 0.036 \text{ см}^{-1} [8];$$

$$2) t = 0^\circ\text{C}, p = 17 \text{ бар}, \alpha = 0.027 \text{ см}^{-1} [8];$$

$$3) t = 20^\circ\text{C}, p = 26 \text{ бар}, \alpha = 0.17 \text{ см}^{-1} [5].$$

Поэтому остальные физические характеристики элегаза рассчитывали именно для этих трех пар давления и температуры, предполагая, что давление измеряется в барах, а температура – в градусах Цельсия.

Как показано в работе [9], при фиксированном давлении зависимость плотности ρ сжиженного элегаза от температуры t можно представить в виде дроби с коэффициентами a_n , являющимися функциями от давления p :

$$\rho = \frac{a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3}{1 + a_5 t} \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

Аппроксимируя методом наименьших квадратов (МНК) экспериментальные данные работы [9] для диапазона температур $0...50^\circ\text{C}$, были получены следующие выражения для коэффициентов a_n из (3) для диапазона давлений $12.5...20.0$ бар:

$$a_1 = 1.38p + 1.54 \times 10^3, \quad (4)$$

$$a_2 = 12.2 \times 10^{-3} p^2 - 0.101p - 28.5, \quad (5)$$

$$a_3 = 0, \quad a_4 = 0, \quad (6)$$

$$a_5 = 10.3 \times 10^{-6} p^2 - 194 \times 10^{-6} p - 12.1 \times 10^{-3}, \quad (7)$$

и для диапазона $26...35$ бар:

$$a_1 = 1.32p + 1.54 \times 10^3, \quad (8)$$

$$a_2 = 22.0 \times 10^{-3} p^3 - 2.21p^2 + 74.2p - 880, \quad (9)$$

$$a_3 = -0.126 \times 10^{-3} p^3 + 12.2 \times 10^{-3} p^2 - 0.391p + 4.27, \quad (10)$$

$$a_4 = -1.11 \times 10^{-6} p^3 + 12.2 \times 10^{-3} p^2 - 4.51 \times 10^{-3} p + 56.8 \times 10^{-3}, \quad (11)$$

$$a_5 = -13.6 \times 10^{-6} p^3 - 1.36 \times 10^{-3} p^2 + 46.0 \times 10^{-3} p - 0.543. \quad (12)$$

При вычислении показателя преломления с помощью (1) можно считать, что коэффициент A , пропорциональный средней поляризуемости молекулы, не зависит от температуры и давления.

Это косвенно подтверждается данными работы [10] для другой неполярной жидкости (гексан, C_6H_{14}), согласно которой при изменении температуры в диапазоне $-25...100^\circ\text{C}$ поляризуемость молекулы изменялась не более, чем на 1%, а при изменении давления в диапазоне $0...1900$ бар – не более чем на 10%. В ТГц-диапазоне показатель преломления $n = 1.241$ сжиженного элегаза измерен лишь для длины волны $\lambda = 119$ мкм при давлении $p_0 = 26$ бар и температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$ [5]. Решая уравнение (2) относительно коэффициента A и подставляя значения n и ρ при p_0 и t_0 , было получено следующее значение A :

$$A = \frac{3n^2 - 1}{2\rho n^2 + 2} \Big|_{(t_0, p_0)} = 1.64 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (13)$$

Зависимость затухания ультразвука в сжиженном элегазе от температуры была измерена в работе [5] для частоты ультразвука $F_0 = 300$ кГц. Как известно, для жидкостей коэффициент затухания ультразвука квадратично возрастает с частотой: $\alpha_s \propto F^2$ [11]. Учитывая этот факт, а также используя МНК, было получено следующее соотношение для коэффициента затухания ультразвука:

$$\alpha_s = (F/F_0)^2 \times [0.1061 \exp(0.04527t) + 0.1167] \text{ см}^{-1}. \quad (14)$$

Данные по скорости звука в сжиженном элегазе для широкого диапазона температур ($-40...60^\circ\text{C}$) и давлений ($20...600$ бар) приведены в работе [12]. Авторы использовали следующую дробную функцию для аппроксимации результатов:

$$V^2 = \frac{\sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^2 a_{jk} (p - p_0)^j (t - t_0)^k}{\sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^2 b_{lm} (p - p_0)^l (t - t_0)^m} \left[\text{м}^2/\text{с}^2 \right], \quad (15)$$

где значения $p_0 = 100$ бар, $t_0 = -23^\circ\text{C}$ выбраны для минимизации коэффициентов a_{jk} и b_{lm} . Нами установлено, что в значениях этих коэффициентов допущена опечатка, так как расчетные данные отличались от измеренных более чем на 10%, в то время как согласно авторам отличие должно быть менее 1%. Проведенная нами аппроксимация с помощью МНК дала следующие значения для a_{jk} и b_{lm} (коэффициент b_{11} нормирован на единицу):

$$a_{jk} = \begin{pmatrix} 258 \times 10^3 & 40.6 \times 10^3 & 1.83 \times 10^3 & 20.9 \\ -4.29 \times 10^3 & -382 & 8.58 & 0.549 \\ 20.1 & 0.715 & -0.104 & 1.53 \times 10^{-3} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$b_{lm} = \begin{pmatrix} 1 & 0.130 & 3.73 \times 10^{-3} & -0.513 \times 10^{-6} \\ -2.07 \times 10^{-3} & 401 \times 10^{-6} & 73.5 \times 10^{-6} & 0.476 \times 10^{-6} \\ -14.2 \times 10^{-6} & 1.17 \times 10^{-6} & 0.415 \times 10^{-6} & 44.0 \times 10^{-12} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Приведенные в данном разделе соотношения позволяют рассчитать зависимость таких параметров сжиженного элегаза, как коэффициент АО-качества, а также коэффициент затухания ультразвука и коэффициент поглощения излучения, от температуры и давления. Таким образом, становится возможным оценить оптимальные условия эксперимента для достижения максимальной интенсивности дифрагированного излучения.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для удобства мы использовали безразмерный параметр $\xi = I_1/I_0$, пропорциональный интенсивности дифрагированного излучения, и его значение ξ_0 при $F_0 = 300$ кГц, $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и $p_0 = 26$ бар. Поэтому значение отношения ξ/ξ_0 показывает, во сколько раз изменяется интенсивность дифрагированного излучения при изменении условий проведения эксперимента:

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \frac{[M_2 \exp(-\alpha L) \exp(-\alpha_s I)]|_{(p,t)}}{[M_2 \exp(-\alpha L) \exp(-\alpha_s I)]|_{(p_0,t_0)}}. \quad (18)$$

Параметр ξ/ξ_0 не зависит от мощности ультразвука P_a , длины волны излучения λ и размеров излучателя ультразвука (d и L) и учитывает только влияние температуры t и давления p сжиженного элегаза. Результаты расчета приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при понижении температуры от 20 до 0°C интенсивность дифрагированного излучения возрастает примерно в пять раз при использовании ультразвука с частотой $F = 300$ кГц. Казалось бы, это противоречит тому, что коэффициент АО-качества M_2 убывает с понижением температуры, причем примерно в два раза в указанном интервале температур. Однако при понижении температуры от 20 до 0°C существенно уменьшаются коэффициент α_s затухания ультразвука (примерно в два раза) и коэффициент α поглощения излучения (примерно в шесть раз). Именно это и обуславливает возрастание интенсивности дифрагированного излучения с понижением температуры.

Для обоснования немонотонности зависимости $I_1(t)$ мы сравнили параметры M_2 , α_s и α для этой температуры (-40°C) и для температуры 0°C : коэффициент АО-качества уменьшился в три раза, а коэффициент затухания ультразвука — в два раза. Поэтому ожидалось, что интенсивность I_1 будет больше при -40°C , чем при 0°C . Но

согласно данным работы [8] прозрачность сжиженного элегаза для ТГц-излучения с длиной волны $\lambda = 119$ мкм резко падает при понижении температуры до столь низких значений: коэффициент поглощения излучения α увеличивается примерно в 1.5 раза по сравнению с температурой 0°C . Поэтому интенсивность I_1 дифрагированного излучения при -40°C меньше, чем при 0°C . Таким образом, условия $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 17$ бар являются оптимальными для получения наибольшей глубины АО-модуляции. Например, глубина АО-модуляции при частоте ультразвука $F = 200$ кГц и температуре $t = 0^\circ\text{C}$ ожидается на порядок больше, чем при $F = 300$ кГц и $t = 20^\circ\text{C}$.

Зависимость интенсивности I_1 дифрагированного излучения от частоты F ультразвука для различных температур t имеет следующий вид: 1) интенсивность I_1 больше при использовании более низкой частоты F ультразвука; 2) чем выше температура t , тем более сильной является зависимость I_1 от F . Эту зависимость можно качественно

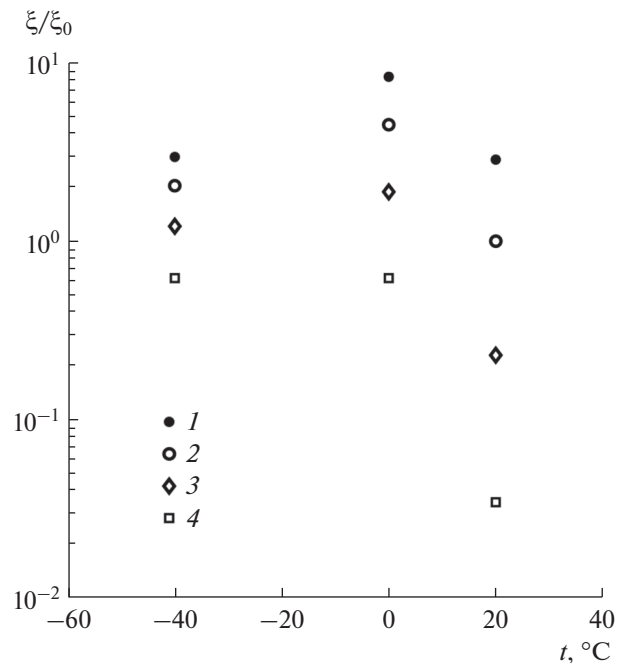


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности дифрагированного излучения от температуры при различных частотах ультразвука: $F = 200$ (1), 300 (2), 400 (3) и 500 КГц (4); каждому значению температуры соответствует определенное значение давления: $t = -40^\circ\text{C}$, $p = 11$ бар; $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 17$ бар; $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 26$ бар.

объяснить следующим образом. С одной стороны, коэффициент затухания ультразвука α_s возрастает с частотой F . Поэтому интенсивность I_1 должна убывать с ростом частоты F , что подтверждается приведенным графиком. С другой стороны, коэффициент затухания ультразвука α_s возрастает с температурой. Поэтому различие в интенсивностях I_1 для различных частот F (например, 200 и 300 кГц) должно возрастать с температурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что зависимость интенсивности дифрагированного терагерцевого излучения от температуры и давления является немонотонной: при понижении температуры от 20 до 0°C она возрастает, а при дальнейшем понижении температуры до -40°C она убывает. Таким образом, оптимальными условиями для модуляции терагерцевого излучения являются давление 17 бар и температура 0°C. Результаты работы можно использовать для проектирования энергоэффективных акустооптических модуляторов терагерцевого излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание № 0057-2019-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yavorsky M.A., Vikulin D.V., Barshak E.V. et al. // J. Physics: Conf. Ser. 2019. V. 1368. № 2. P. 022067.*
2. *Liu F., Gu L., Xie S., He X. et al. // J. Lightwave Technology. 2018. V. 36. № 16. P. 3465.*
3. *Vogel T., Dodel G. // Infrared Phys. 1985. V. 25. № 1/2. P. 315.*
4. *Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Kropotov G.I. et al. // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 126. № 3. P. 191.*
5. *Durr W. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1986. V. 7. № 10. P. 1537.*
6. *Nikitin P.A., Knyazev B.A., Voloshinov V.B. et al. // IEEE Trans. 2020. V. TST-10. № 1. P. 44.*
7. *Mantsevich S.N., Kupreychik M.I., Balakshy V.I. // Optics Express. 2020. V. 28. № 9. P. 13243.*
8. *Rosenberg A., Birnbaum G. // J. Chem. Phys. 1970. V. 52. № 2. P. 683.*
9. *Keramati B., Wolgemuth C.H. // J. Chem. and Engineering Data. 1976. V. 21. № 4. P. 423.*
10. *Scaife W.G., Lyons C.G. // Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie. 1990. V. 94. № 7. P. 758.*
11. *Claes L., Hülskämper L.M., Baumhögger E. et al. // Technisches Messen. 2019. V. 86. № S1. P. S2.*
12. *Vacek V., Zollweg J.A. // Fluid Phase Equilibria. 1993. V. 88. P. 219.*