

01.1;09.2;10.1

## Термофизические и механические свойства активных мембран фотоакустических генераторов вынужденных акустических колебаний

© Е.П. Микитчук<sup>1</sup>, Е.И. Гиршова<sup>2,3</sup>, М.М. Кугейко<sup>1</sup><sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: m.helenay@yandex.by

Поступило в Редакцию 22 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 26 декабря 2021 г.

Принято к публикации 1 февраля 2022 г.

Представлены результаты исследования термофизических и механических свойств активных мембран фотоакустических генераторов на вынужденных акустических колебаниях. Установлены взаимосвязи входных параметров активных мембран (радиус и толщина) фотоакустических генераторов с их выходными характеристиками (ширина полосы рабочих частот и амплитуда смещения мембраны) для различных мощностей тепловыделения в структуре.

**Ключевые слова:** фотоакустический генератор, вынужденные акустические колебания, линейные колебания, ширина полосы рабочих частот, активная мембрана.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52357.19089

В системах технической и биомедицинской ультразвуковой диагностики требуется построение изображений (например, акустических [1,2] или терагерцевых [3,4]) с высоким пространственным разрешением, поэтому существует тенденция использования широкополосных и сверхширокополосных зондирующих акустических сигналов. При использовании таких сигналов пространственное разрешение увеличивается в число раз, равное произведению длительности зондирующего сигнала на его полосу частот [5]. Также важными требованиями к источникам ультразвука для построения изображений являются компактность и гибкость (возможность перестройки типа сигнала) [6].

Весьма перспективными источниками ультразвука для целей построения акустических изображений являются фотоакустические генераторы [7–9]. Волоконно-оптические излучатели ультразвуковых сигналов обладают целым рядом достоинств: широкая полоса рабочих частот, диэлектрическое исполнение, малые массогабаритные характеристики [2,10].

При воздействии модулированного по интенсивности лазерного излучения на поглощающую структуру, когда характерное время поглощения оказывается значительно меньше периода модуляции, изменение ее размеров порождает вынужденные акустические колебания, частота которых определяется частотой модуляции лазерного излучения [9,10]. Для построения изображений предлагается использовать фотоакустические генераторы на вынужденных колебаниях, для которых ширина полосы генерируемого сигнала полностью определяется модуляцией лазерного излучения [8,10,11].

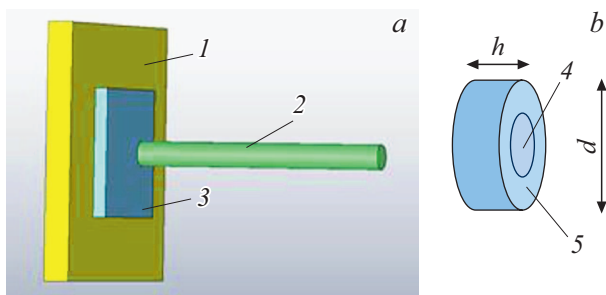
Актуальным является исследование термофизических и механических свойств активных мембран (другими словами, поглощающих структур) фотоакустических генераторов на вынужденных акустических колебаниях. Поэтому цель настоящей работы состоит в установлении взаимосвязи входных параметров активных мембран (радиус и толщина) с амплитудой их смещения и шириной полосы частот акустических колебаний на выходе.

В работе предлагается конструкция, в которой лазерное излучение подводится бесконтактно к активной мембране (в этом случае активную мембрану возможно изготавливать отдельно от оптических волокон с помощью любой подходящей и доступной технологии). Фотоакустический генератор реализуется следующим способом: на первом этапе поглощающие структуры, например активные мембраны на основе взвешенных в полимерной матрице поглощающих частиц или таммовских структур, крепятся к плате с отверстием из термостабильной низкотемпературной совместно обжигаемой керамики с металлизацией с помощью технологии специализированных компаундов, которая позволит генератору работать в сложных условиях эксплуатации (высокой температуры, радиации, мощного СВЧ-излучения) [12]. Затем осуществляется юстировка поглощающей структуры с оптическим волокном, что позволяет вводить свыше 80–90% излучения. Схематическое изображение такого генератора представлено на рис. 1, а.

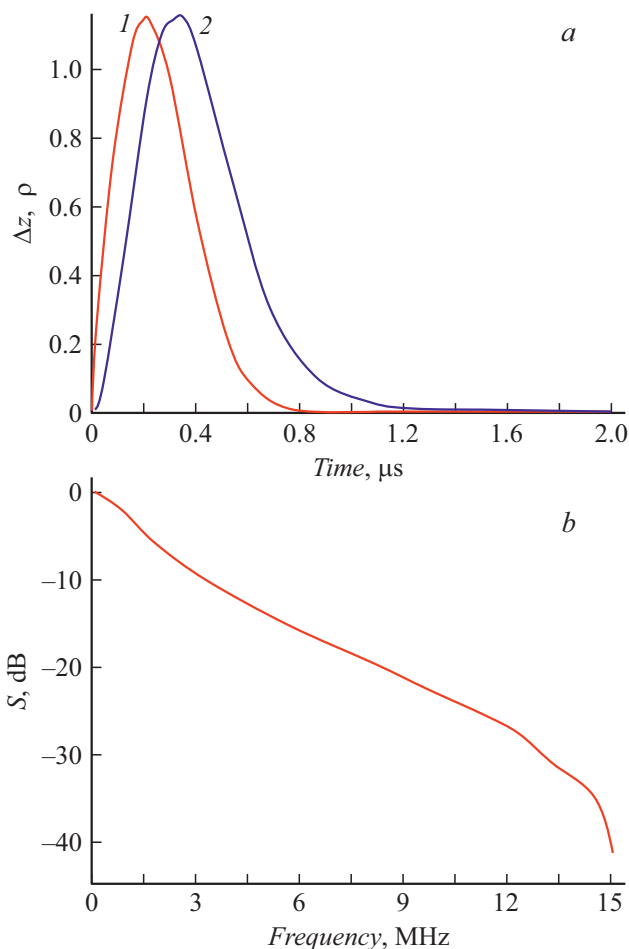
Наиболее быстродействующие и эффективные фотоакустические генераторы построены на основе наноструктур. При одинаковой толщине поглощающего слоя наноструктуры позволяют добиться большего (вплоть

до порядка) коэффициента поглощения по сравнению с объемными оптическими поглотителями. Из-за предельно малых размеров наноструктур по сравнению с полимерной матрицей тепловые и механические свойства активного слоя почти полностью определяются параметрами полимера. Поскольку длина волны возбуждаемых акустических колебаний значительно превышает размеры наноструктур, при теоретических исследованиях оказывается правомерно применять приближение изотропной мембраны и однородного тепловыделения [13]. В качестве матрицы активной мембраны, в которой взвешены частицы, используются полимеры, которые могут быстро и сильно нагреваться и охлаждаться. Перспективной матрицей является полидиметилсилоксан [14], такая матрица позволяет получить высокий коэффициент температурного расширения и увеличить эффективность фотоакустического преобразования на четыре порядка [13,14].

На первом этапе моделирования создается дисковая структура с теплофизическими и механическими параметрами, соответствующими полидиметилсилоксану. На рис. 1, *b* приведена модель исследуемой активной мембраны фотоакустического генератора. При моделировании во временной области в качестве зондирующего сигнала используется короткий широкополосный оптический импульс большой амплитуды, задается мощность тепловыделения во времени. На рис. 2, *a* показаны объемная плотность тепловыделения, а также смещение центра активной мембраны фотоакустического генератора, нормированные на максимальные величины, в зависимости от реального времени. Видно, что если задать объемную плотность тепловыделения [ $\text{W}/\text{m}^3$ ] в виде гауссовского импульса, то смещение мембраны относительно положения равновесия запаздывает [m], медленным оказывается процесс остывания.

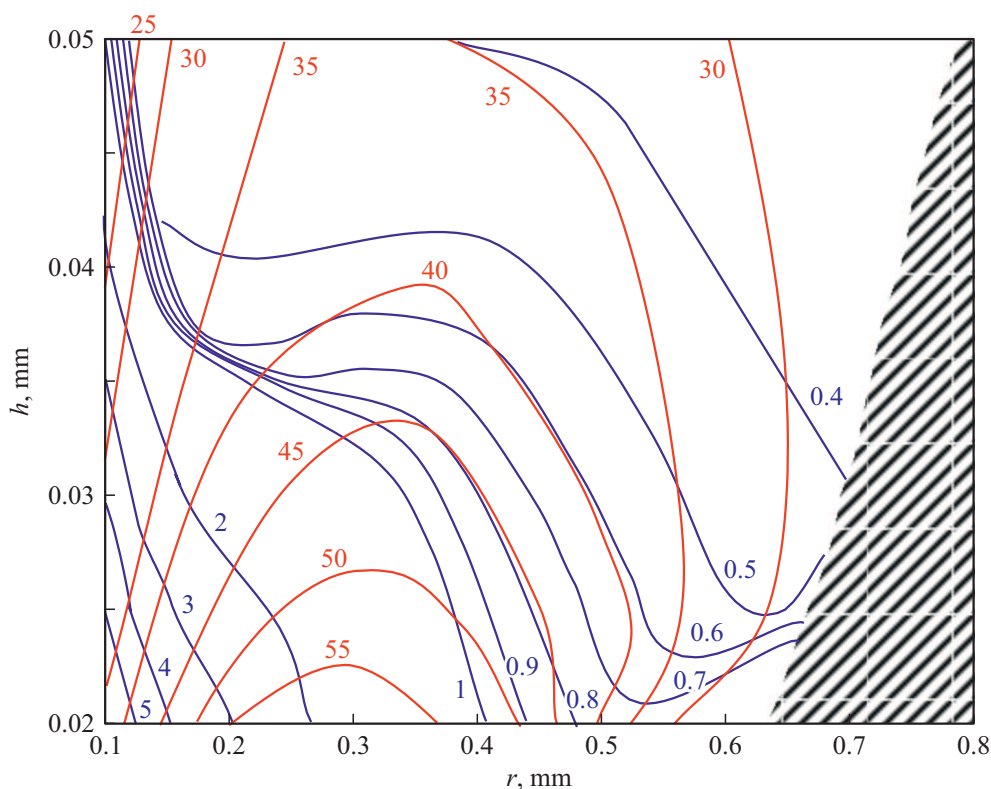


**Рис. 1.** Схематическое изображение фотоакустического генератора (*a*) и модель исследуемой активной мембраны фотоакустического генератора (*b*). 1 — плата, 2 — оптическое волокно, 3 — поглощающий слой, 4 — подвижная часть мембраны, в которой выделяется тепло, 5 — закрепленный пояс (поверхность закрепленного пояса в плоскости платы — поверхность теплообмена — занимает 10% от текущего радиуса структуры).  $h$  — толщина мембраны,  $d$  — диаметр мембраны.



**Рис. 2.** *a* — объемная плотность мощности тепловыделения  $\rho$  (1) и смещение центра активной мембраны  $\Delta z$  (2) в зависимости от времени для толщины активной мембраны 0.021 mm, ее радиуса 0.3 mm в случае, когда максимальная выделяющаяся мощность составляет 10 mW. *b* — частотная характеристика мембраны фотоакустического преобразователя  $S$ , рассчитанная на основе данных моделирования с помощью формулы (1) (толщина мембраны 0.021 mm, радиус мембраны 0.3 mm, максимальная выделяющаяся мощность 10 mW).

Зависимость объемной мощности тепловыделения дискретизируется на  $N$  шагов (типично  $N > 2^8$ ), на каждом полученном шаге по времени для всей структуры решается задача теплопереноса. При этом после расчета каждого из  $N$  трехмерных распределений температуры решается задача структурного анализа для получения трехмерного распределения напряжений, давления в структуре, т.е. формируется модель структуры для следующего шага по времени. Моделирование проводится во временной области, а анализ результатов интерпретируется во временной и частотной областях [6]. Частотная характеристика фотоакустического преобразователя может быть оценена как отношение спектральных плотностей мощности тепловыделения и смещения центра мембраны, так как последняя величина оказывается пропорциональна спектральной плотности



**Рис. 3.** Зависимости ширины полосы частот по уровню  $-6$  dB [MHz] (синие линии) и амплитуды смещения центра мембраны [ $\mu\text{m}$ ] (красные линии) от радиуса и толщины мембраны фотоакустического генератора, представленные в виде линий уровня для мощности тепловыделения  $40$  mW. Штриховкой выделена область нелинейных колебаний. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

мощности акустического давления:

$$S(f) = \left| F \left\{ \frac{P(t)}{P_{\max}} \right\} \right|^2 \left| F \left\{ \frac{\Delta z(t)}{h} \right\} \right|^{-2}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  — временная зависимость мощности тепловыделения, достигающая максимума  $P_{\max}$ ;  $\Delta z(t)$  — временная зависимость смещения центра мембраны, рассчитанная в результате решения ряда задач структурного анализа для активной мембраны фотоакустического генератора;  $F$  — оператор преобразования Фурье;  $h$  — толщина активной мембраны.

Для каждого набора геометрических размеров активной мембраны из  $N$  трехмерных распределений механических смещений определяется зависимость величины смещения центра мембраны от времени (необходима для расчета с помощью формулы (1) частотной характеристики, пример которой приведен на рис. 2, *b*), а также ее максимальная величина (амплитуда смещения). Таким образом, для каждого набора геометрических размеров активной мембраны формируются одно значение амплитуды смещения центра мембраны и  $N$  значений отсчетов частотной характеристики, при этом на основе частотной характеристики мембраны рассчитывается ширина полосы рабочих частот по уровню  $-6$  dB.

На рис. 3 приведены трехмерные зависимости амплитуды смещения центра мембраны  $\Delta z(r, h)$  и ширины полосы частот по уровню  $-6$  dB  $\Delta f(r, h)$  от радиуса и толщины мембраны, представленные в виде линий уровня. Видно, что с увеличением толщины мембраны происходит уменьшение ширины полосы частот по уровню  $-6$  dB. Однако при увеличении мощности тепловыделения для малых радиусов мембраны наблюдается „вытягивание“ линий уровня постоянной ширины полосы частот вдоль оси толщины мембраны, т.е. при малых радиусах мембраны зависимость ширины полосы частот от ее толщины ослабевает при увеличении мощности тепловыделения и наблюдается линеаризация решения в общем случае нелинейной задачи нестационарного тепловыделения. С увеличением радиуса мембраны происходит сначала увеличение, а затем уменьшение амплитуды смещения центра мембраны: максимальное значение амплитуды смещения достигается при радиусах мембраны в диапазоне от  $0.2$  до  $0.4$  mm при толщине мембраны  $\sim 0.02$  mm, при этом с увеличением толщины данная область сужается. При мощности тепловыделения  $40$  mW не достигается однозначность по двум критериям: не удастся достичь оптимальных значений ширины полосы рабочих частот и амплитуды смещения центра мембраны одновременно.

Наибольшее быстродействие структуры достигается при радиусах мембраны 0.1–0.15 mm, в то время как наибольшая величина отклонения достигается при радиусах от 0.2 до 0.4 mm и толщине вблизи 0.02 mm. Ширина полосы частот свыше 5 MHz достигается в исследуемом случае при амплитуде смещения свыше 35–40  $\mu\text{m}$ . Для мощности тепловыделения 40 mW в исследуемой структуре характерно, что максимальное увеличение температуры не превышает 100 K, что из-за свойств использованного материала обеспечивает долговременное функционирование [9,15]. В области нелинейных колебаний в мембране возникают механические возвращающие силы, под действием которых она выгибается в обратную сторону от направления первоначальной деформации.

Таким образом, в зависимости от геометрических размеров активной мембраны фотоакустического генератора имеются диапазоны значений параметров как для режима генерации вынужденных колебаний основной частоты, так и для режима нелинейной генерации набора гармоник основной частоты возбуждающего модулированного оптического сигнала, что значительно затрудняет использование таких мембран в реальных системах фотоакустики на вынужденных колебаниях. Для мембран из полидиметилсилоксана при мощности тепловыделения 40 mW ширина полосы частот колебаний основной частоты свыше 5 MHz достигается при радиусах мембраны 0.1–0.15 mm, при этом амплитуда смещения превышает 35–40  $\mu\text{m}$  и не наблюдается перегрева структуры, что обеспечивает долговременное функционирование.

## Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 21-12-00304).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] J. Zhou, J.V. Jokerst, *Photoacoustics*, **20**, 100211 (2020). DOI: 10.1016/j.pacs.2020.100211
- [2] I. Steinberg, D.M. Huland, O. Vermesh, H.E. Frostig, W.S. Tummers, S.S. Gambhir, *Photoacoustics*, **14**, 77 (2019). DOI: 10.1016/j.pacs.2019.05.001
- [3] G.P. Swift, A. Gallant, N. Kaliteevskaya, M. Kaliteevski, S. Brand, D. Dai, A. Baragwanath, I. Iorsh, R. Abram, J.M. Chamberlain, *Opt. Lett.*, **36**, 1641 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.001641
- [4] A.J. Gallant, M.A. Kaliteevski, S. Brand, D. Wood, M. Petty, R.A. Abram, J.M. Chamberlain, *J. Appl. Phys.*, **102**, 023102 (2007). DOI: 10.1063/1.2756072
- [5] G. Serafino, F. Scotti, L. Lembo, B. Hussain, C. Porzi, A. Malacarne, S. Maresca, D. Onori, P. Ghelfi, A. Bogoni, *J. Lightwave Technol.*, **37**, 643 (2019). DOI: 10.1109/JLT.2019.2894224
- [6] C. Özdemir, *Inverse synthetic aperture radar imaging with Matlab algorithms* (Wiley, Hoboken, 2021), p. 571–717. DOI: 10.1002/9781119521396
- [7] P.K. Krivoshein, D.S. Volkov, O.B. Rogova, M.A. Proskurnin, *Photoacoustics*, **18**, 100162 (2020). DOI: 10.1016/j.pacs.2020.100162
- [8] A. Mikitchuk, K. Kozadaev, *Przegląd Elektrotechniczny*, **96**, 129 (2020). DOI: 10.15199/48.2020.03.29
- [9] E.I. Girshova, A.P. Mikitchuk, A.V. Belonovski, K.M.G. Pozina, K.V. Kozadaev, A.Yu. Egorov, M.A. Kaliteevski, *Opt. Express*, **28**, 26161 (2020). DOI: 10.1364/OE.400639
- [10] N. Wu, X. Zou, J. Zhou, X. Wang, *Measurement*, **79**, 164 (2016). DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.002
- [11] Е.П. Микитчук, К.В. Козадаев, *Квантовая электроника*, **48** (7), 630 (2018). [A.P. Mikitchuk, K.V. Kozadaev, *Quantum Electronics*, **48** (7), 630 (2018). DOI: 10.1070/QEL16622].
- [12] А. Андриевский, В.Ф. Андриевский, *Фотоника*, № 3(63), 74 (2017). DOI: 10.22184/1993-7296.2017.63.3.74.79
- [13] F. Gao, R. Kishor, X. Feng, S. Liu, R. Ding, R. Zhang, Y. Zheng, *Photoacoustics*, **7**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.pacs.2017.05.001
- [14] Е.И. Гиршова, А.П. Микитчук, А.В. Белоновский, К.М. Морозов, К.А. Иванов, *Письма в ЖТФ*, **47** (7), 17 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50793.18635 [E.I. Girshova, E.P. Mikitchuk, A.V. Belonovskii, K.M. Morozov, K.A. Ivanov, *Tech. Phys. Lett.* (2021). DOI: 10.1134/S1063785021040076].
- [15] A.P. Mikitchuk, K.V. Kozadaev, *Semiconductors*, **54** (14), 1836 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620140195