

УДК 535.015

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОПТОАКУСТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРАХ УЛЬТРАЗВУКА

© 2022 г. Е. И. Гиршова^{1, 2, *}, Е. П. Микитчук³, А. В. Белоновский^{1, 2},
К. М. Морозов^{1, 2}, М. А. Калитеевский^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
“Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет ИТМО”, Санкт-Петербург, Россия

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

*E-mail: ilinishna@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Теоретически показано, что внедрение в конструкцию оптоакустического генератора на основе структур с таммовским плазмоном дополнительного органического слоя с интегрированными в него металлическими наночастицами позволяет увеличить его эффективность энергопреобразования на частотах до 100 МГц. Подобраны оптимальные материалы для прибора предложенной конструкции.

DOI: 10.31857/S0367676522070146

ВВЕДЕНИЕ

Оптоакустическая генерация ультразвука может стать достойной альтернативой использованию пьезоэлектрических приборов в ситуациях, когда основные минусы господствующего на данный момент подхода (нетерпимость к вибрациям, перепадам температур, высокое запрашиваемое напряжение, узкая полоса рабочих частот) становятся критичными. Фазированная решетка из оптоакустических преобразователей может найти применение в медицине и позволить проводить неинвазивные безопасные диагностические исследования внутренних органов и тканей с высоким разрешением получаемого изображения. Ультразвуковые волны широко используются для неразрушающего контроля конструкций, мониторинга состояния паяных узлов, определения характеристик материалов [1], акустической микроскопии [2–4] и оптоакустической томографии [5]. Сложившийся традиционный подход к генерации ультразвуковых волн использует пьезоэлектрические преобразователи, которые имеют некоторые недостатки, уже перечисленные выше [1, 6]. Оптоакустические преобразователи являются очень привлекательной альтернативой для генерации ультразвука, принцип их работы основан на эффекте расширения оптического поглощающего слоя, нагреваемого лазерными импуль-

сами [7, 8]. В оптоакустических преобразователях поглощающий слой нагревается и охлаждается, что приводит к механическим деформациям, которые вызывают циклы расширения-сжатия, или, другими словами, акустические (ультразвуковые) волны в окружающей среде [9]. Подобный принцип работы обеспечивает ряд преимуществ: надежность, компактность, полную гальваническую развязку и возможность реализации преобразователя на краю оптического волокна [10], а также широкую полосу рабочих частот [11]. Этим обусловлен интерес к разработкам оптоакустических преобразователей и постоянный поиск новых вариантов активной поглощающей среды, которая позволит получить конкурентоспособный эргономичный энергоэффективный прибор. Такие цели могут быть достигнуты за счет применения плазмонных структур, особенно структур с таммовским плазмоном.

Таммовский плазмон – это состояние электромагнитного поля, локализованного на границе раздела металла и диэлектрического брэгговского отражателя. Структуры с таммовским плазмоном представляют широкий спектр возможностей для разработки различных фотонных устройств и, в частности, для управления поглощением света [12, 13]. В оптоэлектронных устройствах поглощение света металлами, как правило, стараются ми-

нимизировать, потому что оно ведет к нагреву структуры и связанным с этим проблемам, но для оптоакустических генераторов высокая производительность устройства основана на контролируемом поглощении света.

В существующих оптоакустических системах длина волны лазера обычно соответствует зелено-синей части видимого спектра, что ограничивает диапазон возможных лазерных систем. Использование структур с таммовским плазмоном дает возможность обеспечить полное поглощение в инфракрасном диапазоне [14]. В этом случае могут быть использованы полупроводниковые лазеры на основе GaAs, излучающие на длине волны 980 нм. Такие лазеры сочетают в себе доступность, высокую мощность, масштабируемость и возможность прямой временной модуляции интенсивности для частот до нескольких ГГц. Полупроводниковые лазеры, работающие на длине волны 980 нм, могут генерировать среднюю мощность 1 Вт, сфокусированную на пятне размером 10×10 мкм, обеспечивая плотность потока до 10^6 Вт · см⁻², что делает возможность их использования отличной перспективой для развития оптоакустических устройств.

КОНСТРУКЦИЯ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Базовая конструкция оптоакустического генератора на базе структуры с таммовским плазмоном состоит из брэгговского отражателя, покрытого слоем металла, и освещается со стороны диэлектрического отражателя лазерным лучом, периодически модулируемым во времени. Конструкция такой структуры обеспечивает близкое к полному поглощение лазерного излучения на желаемой длине волны, что приводит к периодическому по времени нагреву и охлаждению металлического слоя, что становится причиной испускания ультразвука в окружающую среду.

Структура активной среды генератора и подбор входящих в нее материалов должны одновременно обеспечивать поглощение лазерного излучения на желаемой длине волны; эффективный нагрев активного слоя лазерными импульсами; эффективный отвод тепла активного слоя во избежание перегрева; максимальную амплитуду колебаний поверхности структуры.

Было показано [14], что такого типа структура может обеспечивать эффективность оптоакустического преобразования порядка 10^{-8} , и эту эффективность можно вычислить по формуле:

$$\eta = 2\pi^2 \rho_m v \left(\frac{\epsilon}{c\rho} \right)^2 Gf, \quad (1)$$

где η — эффективность преобразования оптической энергии в механическую, ρ_m — плотность

среды, в которой распространяется ультразвук, v — скорость звука в этой среде, ϵ , c и ρ — коэффициент температурного расширения, удельная теплоемкость и плотность материала активной среды оптоакустического генератора, которая порождает колебания.

Интенсивность полученного ультразвука J может быть выражена через амплитуду механических колебаний поверхности B :

$$J = \frac{\rho_m v}{2} (2\pi f B)^2. \quad (2)$$

С целью повышения эффективности энергопреобразования в конструкцию могут быть интегрированы слои материалов с высоким коэффициентом температурного расширения, например, полимерных и металлополимерных материалов.

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Для адекватной работы прибора необходимо обеспечить не только нагрев активного слоя, но и его своевременную температурную релаксацию перед поглощением следующего лазерного импульса. Способность структуры отводить тепло от активного слоя определяет максимальную частоту модуляции. Особенно это актуально для структур с интегрированными органическими материалами, поскольку они, как правило, являются теплоизоляторами. Так как, с одной стороны, тепло из активного слоя уходит в распределенный брэгговский отражатель, необходимо подобрать отражатель с максимальной эффективной теплопроводностью.

В брэгговском отражателе толщины слоев образующих его материалов зависят от длины волны, на которую настроен отражатель и их показателей преломления на этой длине волны. Таким образом, зная показатели преломления, мы можем найти объемные доли обоих компонентов отражателя.

При прохождении потока тепла перпендикулярно плоскости слоев двухкомпонентной слоистой структуры, ее эффективную теплопроводность k можно выразить через теплопроводности материалов слоев (k_1 и k_2) и их объемные доли (v_1 и v_2):

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 v_1 + k_2 v_2}. \quad (3)$$

Для брэгговского отражателя объемные доли обратно пропорциональны показателям преломления на заданной длине волны (n_1 и n_2). Для комбинации двух материалов можно найти эффективные плотность и теплоемкость, если известны объемные доли, плотности (ρ_1 и ρ_2) и теплоемкости (c_1 и c_2).

Таблица 1. Оптические и термодинамические характеристики материалов, которые могут использоваться в распределенном брэгговском отражателе: показатель преломления на длине волны 980 нм (n), теплопроводность (k), плотность (ρ) и удельная теплоемкость (c)

Материал	n (980 нм)	k , Вт · (м · К) ⁻¹	ρ , кг · м ⁻³	c , Дж · (кг · м ³) ⁻¹
SiO ₂	1.45	1.38	2200	772
TiO ₂	2.49	12.6	4260	850
Al ₂ O ₃	1.76	30	3990	850
Si ₃ N ₄	2.0	26.5	2810	886
InP	3.46	68	4810	310
GaAs	3.67	55	5320	826
Si	3.59	149	2330	800

Таблица 2. Эффективные теплопроводность (k), плотность (ρ), удельная теплоемкость (c) и температуропроводность (D) для разных распределенных брэгговских отражателей, которые могут быть использованы в конструкции оптоакустического генератора

РБО	k , Вт · (м · К) ⁻¹	ρ , кг · м ⁻³	c , Дж · (кг · м ³) ⁻¹	D , 10 ⁻⁶ · м ² · с ⁻¹
Si ₃ N ₄ /SiO ₂	3.06	2460	826.8	1.5
SiO ₂ /TiO ₂	3.15	2306	803	1.7
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	16.58	4102	850	4.8
Si ₃ N ₄ /Si	56.14	2638	859	24.8
GaAs/Al ₂ O ₃	43.3	4421	830	4.8

Зная плотность, теплоемкость и теплопроводность, можно получить конечное выражение для температуропроводности распределенного брэгговского отражателя D_b :

$$D_b = \frac{k_1 k_2 (n_1 + n_2)^2}{(k_1 n_2 + k_2 n_1)(\rho_1 c_1 n_2 + \rho_2 c_2 n_1)}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены оптические и термодинамические характеристики соединений, которые используются в распределенных брэгговских отражателях. Видно, что наиболее высокой температуропроводностью обладает нитрид кремния, что позволяет отметить его как наиболее перспективный материал. Были отобраны пары материалов, которые могут составить брэгговский отражатель, а для них были рассчитаны эффективные термодинамические характеристики. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Видно, что оптимальными характеристиками обладает пара материалов нитрид кремния/кремний. Стоит отметить, что эта пара материалов обладает на длине волны инфракрасного полупроводникового лазера (980 нм) достаточно высоким оптическим контрастом (табл. 1). Чем выше оптический контраст, тем меньше пар слоев необходимо для до-

стижения нужного коэффициента отражения, то есть из этой пары материалов можно сделать относительно тонкий отражатель. Чем меньше толщина отражателя, тем проще отводится тепло от активного слоя, тем быстрее и дешевле можно создать такой отражатель.

По указанным выше причинам в этой статье в качестве брэгговской части структуры с таммовским плазмоном будет рассматриваться отражатель из пар слоев Si₃N₄/Si, настроенный на длину волны 980 нм.

ПОЛИМЕРНЫЕ И ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИИ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Из формулы (1) видно, что эффективность преобразования оптической энергии в механическую зависит от коэффициента температурного расширения материала. В свете этого логично попытаться интегрировать в структуру прибора дополнительные слои органических соединений, у которых этот показатель достигает высоких значений. На примере полидиметилсилоксана было теоретически показано [15], что подобное усовер-

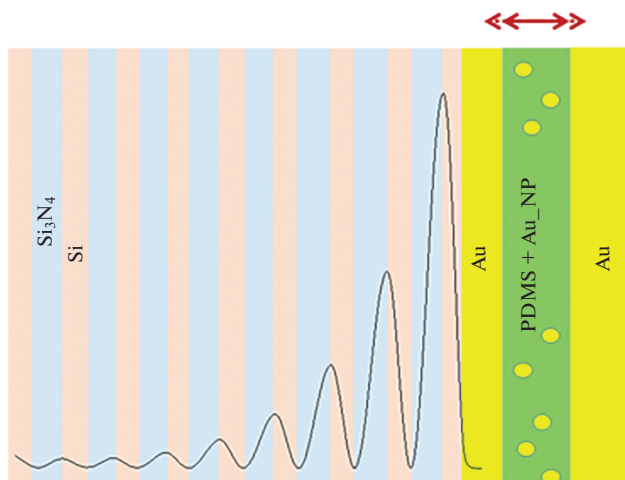


Рис. 1. Дизайн многослойной структуры с тапповским плазмозном: распределенный брэгговский отражатель, настроенный на длину волны 980 нм, слой золота толщиной 100 нм, далее слой полидиметилсилоксана с золотыми наночастицами (300 нм), и снова слой золота для отвода тепла от активной среды (500 нм).

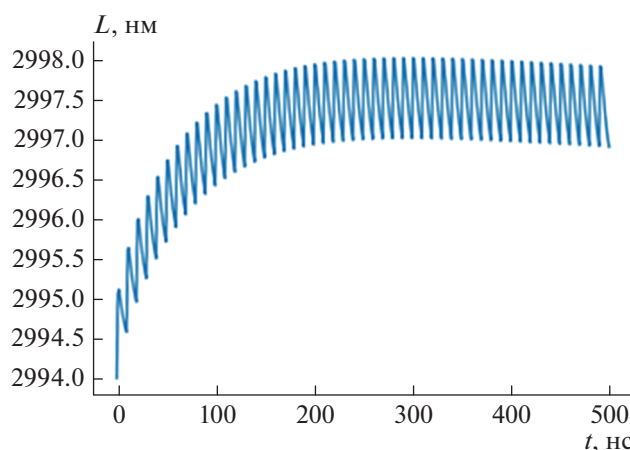


Рис. 2. Колебания поверхности структуры при облучении синусоидальными импульсами продолжительностью 5 нс с энергией $0.1 \text{ МДж} \cdot \text{см}^{-2}$ с частотой 50 МГц.

шенствование конструкции может увеличить эффективность энергопреобразования на 4 порядка на частотах порядка 1 МГц, но с ростом частоты эффект увеличения КПД уменьшается, на 20 МГц никакого преимущества уже нет, а после 50 МГц структура теряет способность релаксировать между импульсами.

Для решения проблемы с охлаждением полидиметилсилоксана на высоких частотах, можно применить в качестве активной среды полимерный материал, состоящий из органического слоя с интегрированными наночастицами металла. Поглощение излучения и нагрев частиц позволят прогреть полидиметилсилоксан не с одной стороны слоя, а по всему его объему, в результате че-

го ускорится распределение температуры, а введение металлических частиц увеличит эффективную теплопроводность.

Для материала, представляющего из себя полидиметилсилоксановую матрицу с интегрированными наночастицами золота, путем моделирования в среде Comsol Multiphysics были получены значения эффективной теплопроводности и температуропроводности. Радиус наночастиц был принят за 50 нм, их объемная плотность за 30%. По формуле Максвелла–Гарнетта были рассчитаны эффективные оптические характеристики материала (вещественная и мнимая части показателя преломления). Далее был создан дизайн многослойной структуры с тапповским плазмозном.

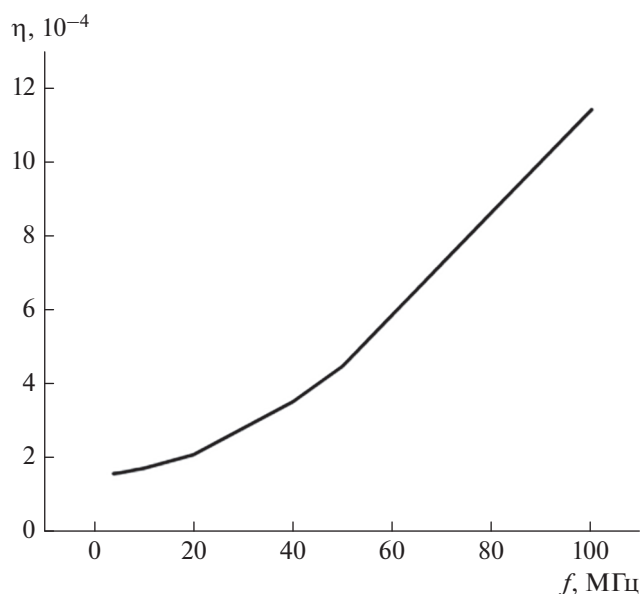


Рис. 3. График зависимости эффективности энергопреобразования от частоты в структуре оптоакустического генератора со слоем металлополимера при облучении синусоидальными импульсами продолжительностью 5 нс с энергией $0.1 \text{ МДж} \cdot \text{см}^{-2}$.

ном: распределенный брэгговский отражатель $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, настроенный на длину волны 980 нм, слой золота толщиной 100 нм, далее слой полидиметилсилоксана с золотыми наночастицами (300 нм), и снова слой золота для отвода тепла от активной среды (500 нм). Данная структура и распределение поля при облучении со стороны отражателя изображены на рис. 1.

Зная распределение поля, можно определить распределение плотности тепловыделения в структуре и, решив неоднородное уравнение теплопроводности, найти временное и пространственное распределение температуры в структуре. По этому распределению можно оценить смещение поверхности структуры и интенсивность полученного ультразвука по формуле (2). На рис. 2 изображены колебания поверхности структуры при облучении синусоидальными импульсами продолжительностью 5 нс с энергией $0.1 \text{ МДж} \cdot \text{см}^{-2}$ с частотой 50 МГц. Видно, что со временем устанавливается стационарный режим колебаний, по которым можно рассчитывать параметры генерируемой акустической волны. Зная мощность лазерного излучения и интенсивность ультразвука можно определить эффективность преобразования из оптической энергии в механическую. График зависимости эффективности энергопреобразования в полученной структуре при облучении синусоидальными импульсами продолжительностью 5 нс с энергией $0.1 \text{ МДж} \cdot \text{см}^{-2}$. Видно, что эффект снижения эффективности за счет не-

достаточной релаксации между импульсами не успевает проявиться до частоты 100 МГц, следовательно, предложенная конструкция генератора энергоэффективна на всем спектре частот, который используется в дефектоскопии и медицине (0.5–30 МГц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были выбраны оптимальные материалы для оптоакустического преобразователя на основе структур с таммовским плазмоном и дополнительным слоем металлополимера, теоретически показано, что добавочный слой полидиметилсилоксана может позволить добиться эффективности энергопреобразования порядка 10^{-4} на всем диапазоне частот, применимом на практике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-32-90188).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hu C., Yu Z., Wang A.* // Opt. Express. 2016. V. 24. No. 18. Art. No. 20287.
2. *Sharples S.D., Clark M., Somekh M.G.* // Opt. Express. 2006. V. 14. No. 22. Art. No. 10435.
3. *Buma T., Spisar M., O'Donnell M.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003. V. 50. No. 9. P. 1161.
4. *Baerwald A., Dauk S., Kanthan R., Singh J.* // Ultrasound Obstet. Gynecol. 2009. V. 34. No. 2. P. 201.
5. *Kozhushko V.V., Hess P.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. No. 2. Art. No. 224107.
6. *Hou Y., Kim J.-S., Ashkenazi S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. No. 9. Art. No. 093901.
7. *Wu N., Tian Y., Zou X. et al.* // J. Opt. Soc. Amer. B. 2012. V. 29. No. 8. P. 2016.
8. *Zou X., Wu N., Tian Y., Wang X.* // Opt. Express. 2014. V. 22. No. 15. Art. No. 18119.
9. *Hou Y., Kim J.S., Huang S.W. et al.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2008. V. 55. No. 8. P. 1867.
10. *Микитчук Е.П., Козадаев К.В.* // Квант. электрон. 2018. Т. 48. № 7. С. 630; *Mikitchuk A.P., Kozadaev K.V.* // Quantum Electron. 2018. V. 48. No. 7. P. 630.
11. *Ma X., Liu B., Cai Y. et al.* // Opt. Lett. 2020. V. 45. No. 9. P. 2526.
12. *Symonds C., Lheureux G., Hugonin J.P. et al.* // Nano Lett. 2013. V. 13. No. 7. P. 3179.
13. *Kaliteevski M.A., Lazarenko A.A., Il'inskaya N.D. et al.* // Plasmonics. 2015. V. 10. No. 2. P. 281.
14. *Girshova E.I., Mikitchuk A.P., Belonovski A.V. et al.* // Opt. Express. 2020. V. 28. No. 18. Art. No. 26161.
15. *Гуршова Е.И., Микитчук Е.П., Белоновский А.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 7. С. 17.

Application of organic and metal-polymer materials in opto-acoustic ultrasonic generators

E. I. Girshova^{a, b, *}, A. P. Mikitchuk^c, A. V. Belonovski^{a, b}, K. M. Morozov^{a, b}, M. A. Kaliteevski^{a, b}

^a Alferov University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

^c Belarusian State University, Minsk, 220030 Belarus

**e-mail: ilinishna@gmail.com*

It is shown theoretically that the introduction of an additional organic layer with integrated metal nanoparticles into the design of an optoacoustic generator based on structures with Tamm plasmon makes it possible to increase its energy conversion efficiency at frequencies up to 100 MHz. The optimal materials for the device of the proposed design have been selected.