

УДК 53.06

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ БАРЬЕРОВ В СИЛИКАТНЫХ ПОРИСТЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Я.М. Андреева<sup>a</sup>, М.М. Сергеев<sup>a</sup>, У.Е. Габышева<sup>a</sup>, И.В. Шишковский<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, 443011, Российская Федерация

Адрес для переписки: [andreeva.ym@gmail.com](mailto:andreeva.ym@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 09.06.18, принята к печати 18.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-744-750

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Андреева Я.М., Сергеев М.М., Габышева У.Е., Шишковский И.В. Формирование изолирующих барьеров в силикатных пористых пленках при CO<sub>2</sub>-лазерной обработке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 744–750. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-744-750

### Аннотация

Предложен способ интегрирования силикатных пористых пленок, используемых в качестве твердотельных носителей для различных индикаторов, путем CO<sub>2</sub>-лазерной записи ячеек, изолированных друг от друга барьерами. Рассмотрен механизм лазерной модификации структуры в виде тонкой силикатной пленки толщиной 170±10 нм, нанесенной на предметное стекло. Определены условия лазерного воздействия (плотность мощности  $q = 8,7–11,3$  кВт/см<sup>2</sup>, скорость сканирования  $V_{ск} = 0,1–0,7$  мм/с), обеспечивающие запись треков определенной формы с шириной 60 мкм, глубиной лунки 1,5±0,5 мкм и высотой валиков 2,5±0,5 мкм. При помощи оптической микроскопии и профилометрии была исследована зависимость геометрических параметров трека от скорости сканирования и плотности мощности падающего излучения. Для проверки эффективности барьеров изготовленные ячейки пропитывались водными растворами Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и родамином. В перспективе такой метод может быть использован для создания интегральных сенсорных устройств на основе тонких пленок, импрегнированных наночастицами различных металлов.

### Ключевые слова

силикатные золь-гель пленки, изолированные ячейки, CO<sub>2</sub>-лазер, наночастицы металлов, интегральная пропитка

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-50133 мол\_нр.

## FORMATION OF INSULATING BARRIERS IN SILICA POROUS FILMS BY CO<sub>2</sub> LASER WRITING

Ya.M.Andreeva<sup>a</sup>, M.M.Sergeev<sup>a</sup>, U.E.Gabysheva<sup>a</sup>, I.V.Shishkovsky<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, 443011, Russian Federation

Corresponding author: [andreeva.ym@gmail.com](mailto:andreeva.ym@gmail.com)

### Article info

Received 09.06.18, accepted 18.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-744-750

Article in Russian

**For citation:** Andreeva Ya.M., Sergeev M.M., Gabysheva U.E., Shishkovsky I.V. Formation of insulating barriers in silica porous films by CO<sub>2</sub> laser writing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 744–750 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-744-750

### Abstract

The paper proposes the method of integral architecture formation for silica porous films used as solid-state media for different indicators. The formation of cells insulated from each other by barriers in the porous media is performed by direct laser writing using CO<sub>2</sub> laser source. We study the mechanism of laser induced modification of silica porous film with the thickness of 170±10 nm on glass substrate. We also estimate the laser processing parameters for the formation of barriers with the determined crater depth of 1.5±0.5 μm and beads height of 2.5±0.5 μm, the laser intensities in the range of  $q = 8.7–11.3$  kW/cm<sup>2</sup> and scanning speed of  $v = 0.1–0.7$  mm/s. The dependence of the laser track geometry on scanning speed and laser intensity is analyzed by optical microscopy and contact profilometry. The produced cells were impregnated with aqueous solution of copper (II) nitrate and rhodamine to demonstrate the efficiency of the insulating barriers. Looking ahead

this technique can be applied for fabrication of thin film sensing devices containing different metal nanoparticles with unique optical properties.

#### Keywords

silica sol-gel films, insulating barriers, CO<sub>2</sub> laser, thermal densification, metal nanoparticles

#### Acknowledgements

The reported study was funded by the RFBR according to the research project No. 17-32-50133 mol\_nr

### Введение

В настоящее время существует большой интерес к сенсорным устройствам, таким как «лаборатории на чипе» и системы микроаналитики. При создании подобных устройств часто прибегают к интегрированию различных узлов и элементов в составе системы, расположенной на единой базе. Для достижения многофункциональности и универсальности систем создаются массивы ячеек, в каждой из которых в процессе использования происходят те или иные реакции. Такие устройства находят широкое применение в медицине, биоинженерии, экологических и лабораторных анализах. Одним из перспективных материалов, выполняющих функцию твердотельных носителей для различных индикаторов и сенсоров, становятся различные пористые среды. Так, например, многослойные структуры на основе бумаги хорошо подходят для пропитки различными веществами и применяются для анализа воды [1]. Для анализа биологических объектов могут применяться пористые среды на основе полимеров [2], стекла и стеклокерамик [3, 4], а интегральные структуры металл–оксид–полупроводник могут быть использованы в качестве биосенсоров [5].

Существуют различные способы формирования подобных массивов, одним из которых является создание гексагональных структур в полимере методом формирования водных шаблонов [2]. С помощью данной технологии может быть создана пористая пленка, пригодная для выращивания клеток в полученных сотовых структурах. Несмотря на регулярность массивов, они не являются достаточно точными, поэтому объем каждой ячейки различен. Также среды, содержащие наноразмерные структуры, могут использоваться для устройств типа микротитровального планшета или гидрогелевых биочипов, в которых содержатся жидкие вещества [6].

Особый интерес представляют пористые золь-гель пленки, и многослойные покрытия на их основе могут быть использованы в качестве солнечных элементов и ячеек [7], оптических [8] и оптико-химических [9, 10], биологических [11, 12] сенсоров. Такие среды обладают рядом преимуществ, среди которых основными являются высокая химическая устойчивость вещества, возможность управлять размерами и объемом пор, пористостью. Кроме того, высокая оптическая прозрачность пленок в широком диапазоне длин волн позволяет определить характеристики изучаемых объектов, которые связаны с пропускающей способностью [13]. Для создания различных сенсорных устройств такие пленки могут быть импрегнированы наночастицами различных металлов, которые благодаря размерным эффектам могут обладать сильными резонансными, каталитическими и электромагнитными свойствами [14–16]. В свою очередь, разделение пористой пленки на ячейки открывает возможности для интегрального импрегнирования каждой ячейки в отдельности различными веществами.

Для одноэтапного создания изолированных друг от друга ячеек могут быть использованы два основных принципа: частичное удаление пленки с подложки или локальная модификация структуры пористой среды, сопровождающаяся смыканием пор до формирования барьеров. В работе был использован второй способ, наиболее предпочтительный для последующей работы с жидкими растворами, поскольку модифицированные области предотвращают попадание жидкости индикатора в образованные каналы, что могло бы привести к неравномерной пропитке по всей площади ячейки.

Смыкание пор и локальное уплотнение стеклообразных пористых сред может быть осуществлено излучением CO<sub>2</sub>-лазера, которое интенсивно поглощается материалом и нагревает его до температуры активации вязкого течения [17, 18]. В работе [19] приведено сравнение результата спекания тонких силикатных пленок, допированных ионами Er<sup>3+</sup>, в печи и излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Результаты исследований показали, что образцы, спекание которых производилось в печи при температуре 1100°C, после остывания имели значительно большие значения внутренних напряжений, и, как следствие, были склонны к растрескиванию и появлению микроразрушений, в отличие от образцов, подвергнутых лазерному облучению. Это связано с тем, что при лазерном воздействии одновременно с быстрым изменением структуры стекла происходил отжиг внутренних напряжений с последующей их релаксацией, значение которых меньше критического. Однако для создания барьера в пленке существенное значение также имеет управление геометрическими размерами модифицированной области. В работе [17] были проведены исследования процесса уплотнения керамических покрытий непрерывным излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Показано, что на глубину уплотненной области влияют не только параметры лазерного излучения, такие как мощность лазера, радиус пятна в перетяжке и скорость сканирования, но и структура самого покрытия.

В данной работе была исследована возможность CO<sub>2</sub>-лазерной модификации структуры силикатных мезопористых пленок, полученных методом золь-гель синтеза, разделениз их на изолированные друг от друга ячейки и последующей импрегнирования каждой ячейки различными индикаторами. Лазерная

обработка обеспечила высокую локальность воздействия, а также позволила записывать ячейки различной формы с размерами, лимитированными только величиной прогретого слоя. Также были изучены особенности механизма лазерного формирования барьеров в тонких силикатных пористых пленках, а также определены оптимальные условия  $\text{CO}_2$ -лазерного облучения.

### Материалы и оборудование

Образцы представляли собой натриево-кальциевые силикатные пластины предметного стекла с нанесенной на них тонкой силикатной пленкой. Пленка создавалась методом золь-гель синтеза и наносилась на подложку методом окунания с постоянной скоростью 0,5 мм/с. Толщина полученной таким образом пленки  $h = 170 \pm 10$  нм, а средний размер пор – порядка 7–10 нм.

Для создания изолирующих барьеров использовалась установка на базе  $\text{CO}_2$ -лазера (Synrad, США) с длительностью импульсов  $\tau = 200$  мкс, частотой их следования  $f = 5$  кГц, с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм, профилем пучка  $\text{TEM}_{00}$  и его качеством  $M^2 < 1,2$ , и линейной поляризацией (рис. 1). Излучение в импульсно-периодическом режиме генерации фокусировалось на поверхность образца при помощи германиевого (Ge) объектива с фокусным расстоянием  $F = 25$  мм в пятно с диаметром  $d_0 = 53$  мкм (по уровню интенсивности  $1/e^2$ ). Мощность излучения ( $P$ ) варьировалась в пределах от 100 до 450 мВт. Перемещение образца со скоростями  $V_{\text{ск}} = 100\text{--}700$  мкм/с осуществлялось при помощи двухкоординатного стола (Thorlabs, США). При помощи ПЗС-камеры (камера на основе прибора с зарядовой связью) происходило наблюдение за динамикой процесса в режиме реального времени. Синхронизация и управление всеми устройствами схемы осуществлялось через специализированное программное обеспечение на персональном компьютере (ПК).

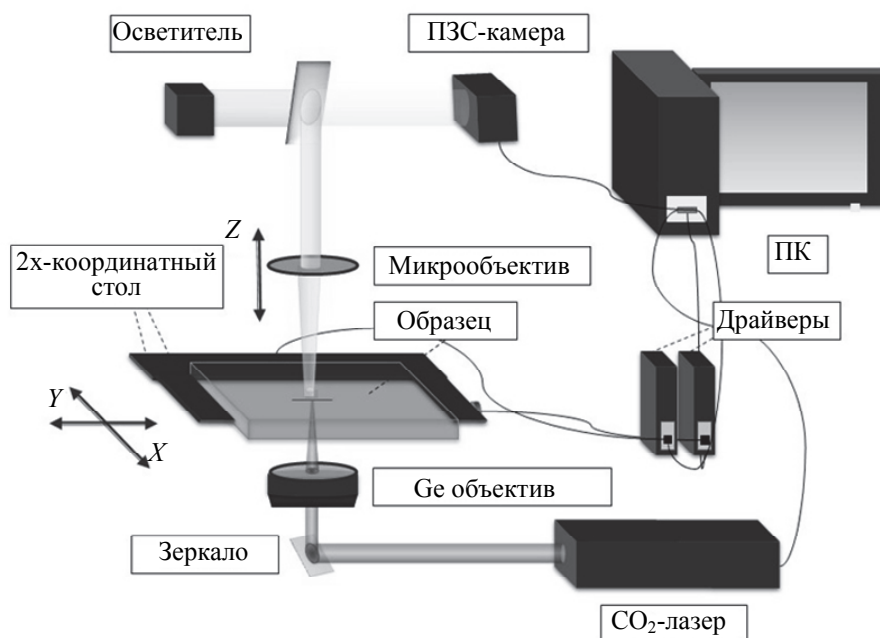


Рис. 1. Схема установки на базе  $\text{CO}_2$ -лазера

Для исследования геометрических характеристик рельефа поверхности пленки в пределах записанных барьеров был использован контактный профилометр Hommel Tester T8000 (Hommel, Германия) с точностью позиционирования по глубине рельефа порядка 30 нм. Оптическая микроскопия полученных структур в отраженном и проходящем свете была произведена с помощью микроскопа Axio Imager A1M (Carl Zeiss, Германия) с увеличением  $100\text{--}1200\times$ .

### Экспериментальная часть и результаты исследования

Для определения условий формирования изолирующих барьеров в пористых  $\text{SiO}_2$  пленках при воздействии  $\text{CO}_2$ -лазерного излучения были записаны серии лазерных треков со скоростями сканирования  $V_{\text{ск}} = 100\text{--}700$  мкм/с при мощности падающего лазерного излучения от 100 до 405 мВт. Экспериментально было выявлено, что при плотности мощности  $4,5$  кВт/см<sup>2</sup> начиналась модификация поверхности пленки с подложкой и формирование трека с глубиной до 1 мкм и шириной около 25 мкм (рис. 2). Повышение плотности мощности до  $8,7\text{--}11,3$  кВт/см<sup>2</sup> обеспечивало формирование треков с глубиной лунки от 0,5 до 2,5 мкм и отчетливыми краями в виде валиков высотой до 3,5 мкм. Дальнейшее повышение плот-

ности мощности до  $12,6\text{--}16,5\text{ кВт/см}^2$  приводило к разрушению пленки и подложки, что сопровождалось формированием трещин в процессе лазерной обработки, либо спустя некоторое время после облучения.

Так как длина волны излучения много больше толщины пористой пленки, перенос тепловой энергии осуществлялся непосредственно в стеклянную подложку за счет превышения температуры вязкого течения вещества при воздействии в выбранных режимах на поверхности и определенного рельефа. Характер рельефа в таком случае определялся глубиной прогретого слоя и градиентами температур в зоне обработки. Скорости сканирования были подобраны таким образом, чтобы достичь стационарного температурного режима, при котором ширина барьера остается постоянной.

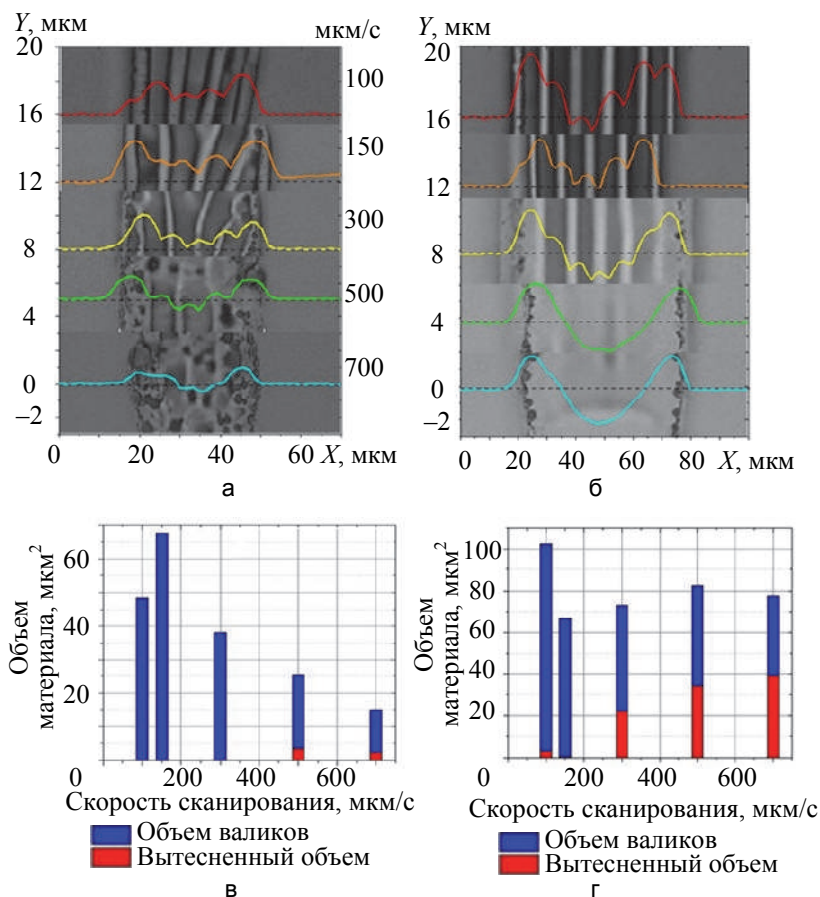


Рис. 2. Зависимость рельефа, возникающего на поверхности образцов при  $\text{CO}_2$ -лазерной обработке, от скорости сканирования в диапазоне  $100\text{--}700\text{ мкм/с}$  при  $q = 4,5\text{ кВт/см}^2$  (а), при  $q = 8,7\text{ кВт/см}^2$  (б). Соотношение объема вытесненного вещества и объема валиков при  $q = 4,5\text{ кВт/см}^2$  (в), при  $q = 8,7\text{ кВт/см}^2$  (г)

Для определения зависимости геометрических параметров барьера от режимов воздействия были записаны массивы линий с изменением скорости сканирования и плотности мощности падающего излучения. На рис. 2, а, б, представлен внешний вид и профилограммы полученных структур. Наблюдается обратная зависимость между диаметром трека и скоростью сканирования. Для каждого трека пунктиром показано положение нуля. Видно, что для большинства режимов образуются достаточно высокие валики, которые могут выступать в роли изолирующих барьеров, при этом объем вытесненной области для многих режимов незначителен. Эта аномалия, по-видимому, связана с изменением плотности стекла вследствие лазерного нагрева. В частности, тепловое расширение натриево-кальциевого силикатного стекла значительно больше (практически в 20 раз) теплового расширения плавленого кварца, а температура размягчения существенно ниже. Такие особенности структуры подложки и условия лазерной обработки обеспечивали в стационарном режиме облучения формирование ванны размягченного стекла глубиной около  $11,4\text{ мкм}$  и шириной  $d_{ih}$  порядка  $2\omega_0 + 2(\alpha\tau)^{0,5} = 73\text{ мкм}$ , что больше размера треков с шириной  $d$ , равной  $2\omega_0 = 50\text{--}55\text{ мкм}$ . Тепловое расширение стекла приводило к подъему подложки с пленкой, которая к этому моменту должна была нагреваться до температуры размягчения и усадки, что предотвращало бы ее разрушение от возникающих напряжений. Высокий градиент температуры и напряжений соответственно приводил к перераспределению размягченного стекла, и выталкиванию его из центра зоны облучения, где формировалась лунка при максимально возможной температуре, на периферию трека, где образовывались валики при существенно меньшей температуре.

Для разных режимов воздействия было определено соотношение объема вытесненного вещества и объема валиков (рис. 2, в, г). Подавляющее большинство режимов воздействия приводило к росту валика без образования лунки. Такая форма рельефа наиболее предпочтительна для изоляции ячеек, так как она предотвращала растекание жидкости через барьер.

Выводы о зависимости высоты и ширины образовавшегося рельефа от режимов воздействия позволили сделать графики, представленные на рис. 3. Высота валиков увеличивалась при снижении скорости сканирования для всего диапазона мощностей и достигала 3,5 мкм для отдельных режимов, тогда как на ширину барьера влияла в основном только мощность излучения. Возможной причиной стал диапазон скоростей сканирования, обеспечивающий стационарный режим нагрева, при котором распределение теплового фронта по периферии зоны было практически одинаковым, а распространение тепла происходило в основном вглубь образца.

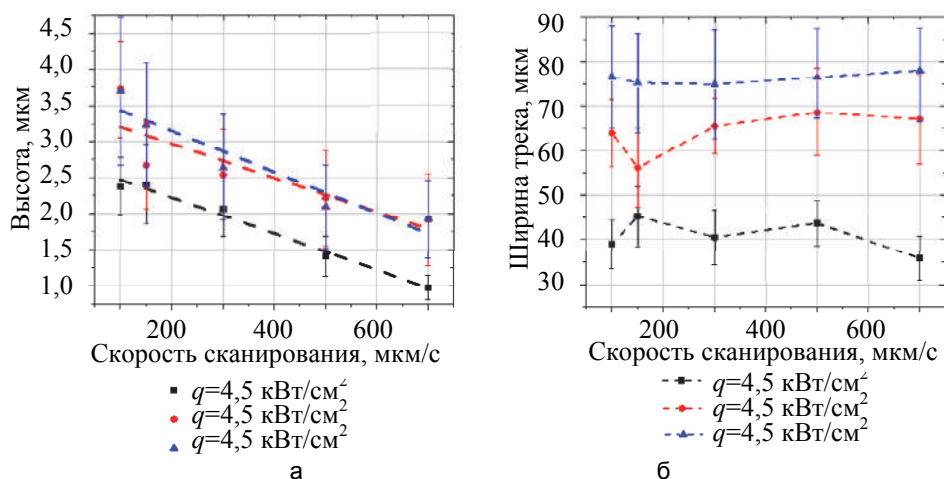


Рис. 3. Зависимость высоты и ширины образованного рельефа от режимов воздействия: высота валиков (а), ширина валиков (б)

На основании полученных данных был выявлен наиболее предпочтительный режим образования изолирующих барьеров ( $P = 190$  мВт,  $q = 8,7$  кВт/см<sup>2</sup>, 300 – 100 мкм/с,  $V_{ск} = 150$  мкм/с), при котором происходило минимальное вытеснение объема вещества, а высота изолирующих барьеров составила порядка 3 мкм. В данном режиме был записан массив изолированных ячеек площадью 1 мм<sup>2</sup>. На рис. 4 наглядно представлена эффективность полученных барьеров на примере интегральной пропитки ячеек силикатной пористой пленки раствором родамина и раствором  $Cu(NO_3)_2$ . В ячейках удерживаются даже крупные капли; барьеры удерживают каплю, не позволяя ей растекаться.

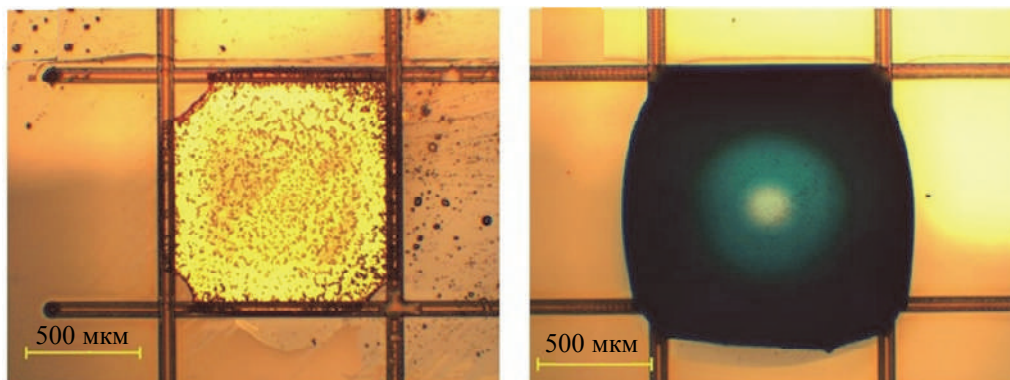


Рис. 4. Эффективность сформированных барьеров: пропитка раствором родамина (а); пропитка раствором  $Cu(NO_3)_2$  (б)

### Заключение

Показана возможность создания массива изолированных ячеек на силикатных пленках с помощью воздействия  $CO_2$ -лазерного излучения. Экспериментальная проверка различных режимов и анализ особенностей рельефа полученных треков-барьеров позволили определить наиболее удачный режим излучения для создания тестового массива ячеек, отличающийся минимальным объемом вытесненного вещества. Результаты исследования позволили доказать, что ячейки, разделенные лазерно-индуцированными барьерами, подходят для интегральной пропитки различными растворами.



Тем не менее, ширина модифицированной области значительно превышает толщину пленки, поэтому дальнейшие исследования в данном направлении предполагают применение других источников воздействия, которые позволяют уменьшить размер модифицированной области и тем самым повысить компактность самих ячеек.

### Литература

1. Carrilho E., Martinez A.W., Mirica K.A., Phillips S.T., Siegel A.C., Wiley B., Whitesides G.M. Three-Dimensional Microfluidic Devices. Patent US20110123398A1, 2014.
2. Stenzel M.H., Barner-Kowollik C., Davis T.P. Formation of honeycomb-structured, porous films via breath figures with different polymer architectures // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 2006. V. 44. N 8. P. 2363–2375. doi: 10.1002/pola.21334
3. Kandimalla V.B., Tripathi V.S., Ju H. Immobilization of biomolecules in sol–gels: biological and analytical applications // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2006. V. 36. N 2. P. 73–106. doi: 10.1080/10408340600713652
4. Evstrapov A., Esikova N., Rudnitskaya G., Antropova T.V. Porous glasses as a substrate for sensor elements // *Optica Applicata*. 2010. V. 40. N 2. P. 333–340.
5. Ghallab Y.H., Ismail Y. CMOS circuits and systems for Lab-on-a-Chip applications / In: *Lab-on-a-Chip Fabrication and Application*. InTech, 2016. doi: 10.5772/63303
6. Грядунов Д., Зименков Д., Михайлович В., Наседкина Т., Деметьева Е., Рубина А., Паньков С., Барский В., Заседателев А. Технология гидрогелевых биочипов и ее применение в медицинской лабораторной диагностике // *Лаборатория*. 2009. Т. 3. № 11. С. 10–14.
7. Pettit R., Brinker C., Ashley C. Sol-gel double-layer antireflection coatings for silicon solar cells // *Solar Cells*. 1985. V. 15. N 3. P. 267–278. doi: 10.1016/0379-6787(85)90083-3
8. Podbielska H., Ulatowska-Jarza A., Muller G., Eichler H.J. Sol-gels for optical sensors // *Optical Chemical Sensors*. Springer, 2006. V. 224. P. 353–385. doi: 10.1007/1-4020-4611-1\_17
9. Mac Craith B.D., Donagh C.M., McEvoy A., Butler T., O'Keefe G., Murphy V. Optical chemical sensors based on sol-gel materials: recent advances and critical issues // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 1997. V. 8. N 1-3. P. 1053–1061.
10. Mujahid A., Lieberzeit P.A., Dickert F.L. Chemical sensors based on molecularly imprinted sol-gel materials // *Materials*. 2010. V. 3. N 4. P. 2196–2217. doi: 10.3390/ma3042196
11. Jeronimo P.C., Araujo A.N., Montenegro M.C.B. Optical sensors and biosensors based on sol–gel films // *Talanta*. 2007. V. 72. N 1. P. 13–27. doi: 10.1016/j.talanta.2006.09.029
12. Noura W., Maaref A., Elaissari H., Vocanson F., Siadat M., Jaffrezic-Renault N. Comparative study of conductometric glucose biosensor based on gold and on magnetic nanoparticles // *Materials Science and Engineering C*. 2013. V. 33. N 1. P. 298–303. doi: 10.1016/j.msec.2012.08.043
13. Antypas H., Garcia M.V., Weibull E., Svahn H.A., Richter-Dahlfors A. A universal platform for selection and high-resolution phenotypic screening of bacterial mutants using the nanowell slide // *Lab on a Chip*. 2018. V. 19. N 12. P. 1767–1777. doi: 10.1039/c8lc00190a
14. Pan L., Chortos A., Yu G., Wang Y., Isaacson S., Allen R., Shi Y., Dauskardt R., Bao Z. An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film // *Nature Communications*. 2014. V. 5. Art. 3002. doi: 10.1038/ncomms4002
15. Bashouti M.Y., Manshina A., Povolotckaia A., Povolotskiy A., Kireev A., Petrov Y., Mackovic M., Spiecker E., Koshevoy I., Tunik S., Christiansen S. Direct laser writing of mu-chips based on hybrid C–Au–Ag nano-particles for express analysis of hazardous and biological substances // *Lab on a Chip*. 2015. V. 15. N 7. P. 1742–1747. doi: 10.1039/c4lc01376j
16. Battie Y., Destouches N., Chassagneux F., Jamon D., Bois L., Moncoffre N., Toulhoat N. Optical properties of silver nanoparticles thermally grown in a mesostructured hybrid silica film // *Optical Materials Express*. 2011. V. 1. N 5. P. 1019–1033. doi: 10.1364/OME.1.001019
17. Cheng J., Kar A. Mathematical model for laser densification of ceramic coating // *Journal of Materials Science*. 1997. V. 32.

### References

1. Carrilho E., Martinez A.W., Mirica K.A., Phillips S.T., Siegel A.C., Wiley B., Whitesides G.M. *Three-Dimensional Microfluidic Devices*. Patent US20110123398A1, 2014.
2. Stenzel M.H., Barner-Kowollik C., Davis T.P. Formation of honeycomb-structured, porous films via breath figures with different polymer architectures. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2006, vol. 44, no. 8, pp. 2363–2375. doi: 10.1002/pola.21334
3. Kandimalla V.B., Tripathi V.S., Ju H. Immobilization of biomolecules in sol–gels: biological and analytical applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2006, vol. 36, no. 2, pp. 73–106. doi: 10.1080/10408340600713652
4. Evstrapov A., Esikova N., Rudnitskaya G., Antropova T.V. Porous glasses as a substrate for sensor elements. *Optica Applicata*, 2010, vol. 40, no. 2, pp. 333–340.
5. Ghallab Y.H., Ismail Y. CMOS circuits and systems for Lab-on-a-Chip applications. In *Lab-on-a-Chip Fabrication and Application*. InTech, 2016. doi: 10.5772/63303
6. Gryadunov D., Zimenkov D., Mikhailovich V., Nasedkina T., Dement'eva E., Rubina A., Pan'kov S., Barskii V., Zasedatelev A. Technology of hydrogel biochips and its application in medical laboratory diagnostics. *Laboratoriya*, 2009, vol. 3, no. 11, pp. 10–14. (in Russian)
7. Pettit R., Brinker C., Ashley C. Sol-gel double-layer antireflection coatings for silicon solar cells. *Solar Cells*, 1985, vol. 15, no. 3, pp. 267–278. doi: 10.1016/0379-6787(85)90083-3
8. Podbielska H., Ulatowska-Jarza A., Muller G., Eichler H.J. Sol-gels for optical sensors. *Optical Chemical Sensors*. Springer, 2006, vol. 224, pp. 353–385. doi: 10.1007/1-4020-4611-1\_17
9. Mac Craith B.D., Donagh C.M., McEvoy A., Butler T., O'Keefe G., Murphy V. Optical chemical sensors based on sol-gel materials: recent advances and critical issues. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 1-3, pp. 1053–1061.
10. Mujahid A., Lieberzeit P.A., Dickert F.L. Chemical sensors based on molecularly imprinted sol-gel materials. *Materials*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 2196–2217. doi: 10.3390/ma3042196
11. Jeronimo P.C., Araujo A.N., Montenegro M.C.B. Optical sensors and biosensors based on sol–gel films. *Talanta*, 2007, vol. 72, no. 1, pp. 13–27. doi: 10.1016/j.talanta.2006.09.029
12. Noura W., Maaref A., Elaissari H., Vocanson F., Siadat M., Jaffrezic-Renault N. Comparative study of conductometric glucose biosensor based on gold and on magnetic nanoparticles. *Materials Science and Engineering C*, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 298–303. doi: 10.1016/j.msec.2012.08.043
13. Antypas H., Garcia M.V., Weibull E., Svahn H.A., Richter-Dahlfors A. A universal platform for selection and high-resolution phenotypic screening of bacterial mutants using the nanowell slide. *Lab on a Chip*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 1767–1777. doi: 10.1039/c8lc00190a
14. Pan L., Chortos A., Yu G., Wang Y., Isaacson S., Allen R., Shi Y., Dauskardt R., Bao Z. An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, art. 3002. doi: 10.1038/ncomms4002
15. Bashouti M.Y., Manshina A., Povolotckaia A., Povolotskiy A., Kireev A., Petrov Y., Mackovic M., Spiecker E., Koshevoy I., Tunik S., Christiansen S. Direct laser writing of mu-chips based on hybrid C–Au–Ag nano-particles for express analysis of hazardous and biological substances. *Lab on a Chip*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 1742–1747. doi: 10.1039/c4lc01376j
16. Battie Y., Destouches N., Chassagneux F., Jamon D., Bois L., Moncoffre N., Toulhoat N. Optical properties of silver nanoparticles thermally grown in a mesostructured hybrid

- N 23. P. 6269–6278. doi: 10.1023/A:1018693212407
18. Araujo F., Chia T., Hench L. Laser densification of channel waveguides in gel-silica substrates // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 1994. V. 2. N 1-3. P. 729–735. doi: 10.1007/BF00486339
19. Lei J., Trofimov A.A., Chen J., Chen Z., Hong Y., Yuan L., Zhu W., Zhang Q., Jacobsohn L.G., Peng F., Bordia R.K., Xiao H. Thick Er-doped silica films sintered using CO<sub>2</sub> laser for scintillation applications // *Optical Materials*. 2017. V. 68. P. 63–69. doi: 10.1016/j.optmat.2017.03.035
- silica film. *Optical Materials Express*, 2011, vol. 1, no. 5, pp. 1019–1033. doi: 10.1364/OME.1.001019
17. Cheng J., Kar A. Mathematical model for laser densification of ceramic coating. *Journal of Materials Science*, 1997, vol. 32, no. 23, pp. 6269–6278. doi: 10.1023/A:1018693212407
18. Araujo F., Chia T., Hench L. Laser densification of channel waveguides in gel-silica substrates. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1994, vol. 2, no. 1-3, pp. 729–735. doi: 10.1007/BF00486339
19. Lei J., Trofimov A.A., Chen J., Chen Z., Hong Y., Yuan L., Zhu W., Zhang Q., Jacobsohn L.G., Peng F., Bordia R.K., Xiao H. Thick Er-doped silica films sintered using CO<sub>2</sub> laser for scintillation applications. *Optical Materials*, 2017, vol. 68, pp. 63–69. doi: 10.1016/j.optmat.2017.03.035

### Авторы

**Андреева Ярослава Михайловна** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56971143200, ORCID ID: 0000-0002-0582-3159, andreeva.y.m@gmail.com

**Сергеев Максим Михайлович** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55624732300, ORCID ID: 0000-0003-2854-9954, maxim.m.sergeev@gmail.com

**Габышева Ульяна Евгеньевна** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2997-7547, gabysheva.u.e@mail.ru

**Шишковский Игорь Владимирович** – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, 443011, Российская Федерация, Scopus ID: 57194690436, ORCID ID: 0000-0002-4404-9020, shiv@fian.smr.ru

### Authors

**Yaroslava M. Andreeva** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56971143200, ORCID ID: 0000-0002-0582-3159, andreeva.y.m@gmail.com

**Maxim M. Sergeev** – PhD, Scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55624732300, ORCID ID: 0000-0003-2854-9954, maxim.m.sergeev@gmail.com

**Ulyana E. Gabysheva** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2997-7547, gabysheva.u.e@mail.ru

**Igor V. Shishkovsky** – D.Sc., Associate Professor, Leading scientific researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, 443011, Russian Federation, Scopus ID: 57194690436, ORCID ID: 0000-0002-4404-9020, shiv@fian.smr.ru