

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-04-78-91

УДК 535.21

Гибридная лазерная субтрактивная технология формирования оптофлюидных элементов в нанопористой силикатной матрице

АЛЕНА СЕРГЕЕВНА ШИШКИНА¹✉, ЯЗАН АЛСАИФ², ВЕРОНИКА АНДРЕЕВНА ЯКИМУК³,
ЧУНЬЮЙ ЛИ⁴, ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА АНДРЕЕВА⁵, РОМАН АЛЕКСЕЕВИЧ ЗАКОЛДАЕВ⁶

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹shishka2001.shishkina@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6628-1234>

²yazan.alsaif97@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0160-0828>

³yakimuk2001@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1810-847X>

⁴ccharmylee@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1401-0918>

⁵olga_andreeva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>

⁶zakoldaev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6212-0532>

Аннотация

Предмет исследования. Исследование влияния щелочного травления на три типа модификации нанопористой силикатной матрицы: двулучепреломляющие структуры, уплотнение и разуплотнение материала, сформированные ультракороткими лазерными импульсами в объёме материала. **Цель работы.** Проводится исследование влияния щелочного травления на оптические и морфологические свойства трёх типов лазерно-индуцированной модификации нанопористой силикатной матрицы: двулучепреломляющие структуры, уплотнение и разуплотнение материала, сформированные ультракороткими лазерными импульсами. **Методология.** Технология реализуется за три этапа: (i) прямая лазерная запись в пластине нанопористой силикатной матрицы с применением остросфокусированных (20X, NA = 0,4) фемтосекундных лазерных импульсов ($\nu = 25\text{--}50$ кГц, $v = 1, 5, 45$ мм/с, $P = 15\text{--}60$ мВт, $\tau = 500$ и 2000 фс, $\lambda = 515$ нм); (ii) щелочное травление в гидроксиде калия, которое способствует очищению сформированных треков. Кроме того, на этом этапе происходит увеличение среднего размера пор до 17 нм; (iii) очистка образца в дистиллированной воде с последующей сушкой в печи. **Основные результаты.** Определены условия формирования полых микроканалов с длиной 5 мм и шириной $5\text{--}7$ мкм, микроканалов с уплотнённой оболочкой вокруг, а также микроканалов с селективным отражением в узком видимом спектральном диапазоне. Каналы также были заполнены жидкостью с объёмом 3 мкл, где спустя $10\text{--}12$ с произошло полное испарение жидкости из канала. **Практическая значимость.** Продемонстрированы ключевые этапы гибридной лазерной субтрактивной технологии создания микрофлюидных и оптофлюидных элементов внутри нанопористой силикатной матрицы. Проведённое исследование открывает новые возможности при разработке объёмных микрофлюидных систем, что востребовано для исследования биохимических реакций или диагностики изменений окружающей среды. В перспективе созданные оптофлюидные элементы могут быть востребованы при создании диагностических устройств – лабораторий на чипе (lab on a chip).

Ключевые слова: микроканалы, пористое стекло, нанопористая матрица, фемтосекундные лазерные импульсы, субтрактивная технология

Благодарность: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103). Исследование по вводу лазерного излучения в оптофлюидный микроканал было

выполнено в рамках финансовой поддержки гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО «Канальные оптические микроволноводы в нанопористых оптических материалах для задач диагностики окружающей среды» Якимук Вероники.

Ссылка для цитирования: Шишкина А.С., Язан Алсаиф, Якимук В.А., Ли Чуньюй, Андреева О.В., Заколдаев Р.А. Гибридная лазерная субтрактивная технология формирования оптофлюидных элементов в нанопористой силикатной матрице // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 4. С. 78–91. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-78-91>

Коды OCIS: 140.3390, 160.2750.

Hybrid laser subtractive technology for the fabrication optofluidic elements in a nanoporous silicate matrix

ALENA SHISHKINA¹✉, YAZAN ALSAIF², VERONIKA YAKIMUK³,
CHUNYU LI⁴, OLGA ANDREEVA⁵, ROMAN ZAKOLDAEV⁶

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹shishka2001.shishkina@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6628-1234>

²yazan.alsaif97@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0160-0828>

³yakimuk2001@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1810-847X>

⁴ccharmylee@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1401-0918>

⁵olga_andreeva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>

⁶zakoldaev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6212-0532>

Abstract

Subject of study. Investigation of the effect of alkaline etching on three types of laser-induced modification initiated inside of nanoporous silicate matrix: birefringent structures, densification and decompaction of the material. **The purpose.** The influence of alkaline etching on the optical and morphological properties of three types of laser-induced modification of porous glass is being studied: birefringent structures, densification and decompaction of the material formed by ultrashort laser pulses. **Methodology.** The technology is implemented in three stages: (i) direct laser writing in the nanoporous silicate matrix using focused (20X, NA = 0.4) femtosecond laser pulses ($\nu = 25\text{--}50\text{ kHz}$, $v = 1\text{--}45\text{ mm/s}$, $P = 15\text{--}60\text{ mW}$, $\tau = 500\text{ and }2000\text{ fs}$, $\lambda = 515\text{ nm}$); (ii) alkaline etching in potassium hydroxide, which helps to clean up the fabricated tracks, in addition, at this stage, the average pore size increases to 17 nm; (iii) purification of the sample in distilled water followed by drying in a furnace. **Main results.** The conditions for fabrication of hollow microchannels with a length of 5 mm and a width of 5–7 μm . The microchannels were also filled with liquid (volume of 3 μl), where after 10–12 s the liquid completely evaporated. The microchannels possess a selective reflection in a narrow visible spectral range. **Practical significance.** A novel methodology of microchannel fabrication in nanoporous silicate matrix plates is demonstrated. The channel is surrounded by waveguiding layers that expand possible applications in optofluidics. The study opens up new possibilities in the development of volumetric microfluidic systems, which is in demand for the study of biochemical reactions or the diagnosis of environmental changes. In the future, such optofluidic elements in nanoporous silicate matrix can be in demand for novel chip-scale sensor devices or laboratories on a chip (lab on a chip).

Keywords: microchannels, porous glass, nanoporous matrix, femtosecond laser pulses, subtractive technology

Acknowledgment: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project № 20-71-10103). The study on the input of laser radiation into an optofluidic microchannel was carried out as part of the financial support of the NIRMA FT MF grant of ITMO University “Channel optical waveguides in nanoporous optical materials for environmental diagnostics” by Yakimuk Veronika.

For citation: Shishkina A.S., Yazan AlSaif, Yakimuk V.A., Li Chunyu, Andreeva O.V., Zakoldaev R.A. Hybrid laser subtractive technology for the fabrication of optofluidic elements in a nanoporous silicate matrix [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 4. P. 78–91. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-78-91>

OCIS codes: 140.3390, 160.2750.

ВВЕДЕНИЕ

Микрофлюидика является междисциплинарным научным направлением и с каждым годом всё чаще взаимодействует с лазерными технологиями для решения задач реализации объёмных микрофлюидных элементов и систем в стеклянных материалах. В частности, такие системы состоят из ряда функциональных элементов — микроканалов, разветвителей, микромиксеров и резервуаров, осуществляющих манипуляции с малыми объёмами исследуемых веществ и аналитов [1]. Объёмные микрофлюидные системы позволяют проводить реакции в замкнутом пространстве, избегая нежелательные процессы окисления или осуществляя прокачку исследуемых жидкостей с постоянным давлением [2]. Создание каждого элемента представляет собой целостное научное исследование [3], и на данный момент продемонстрированные лазерные технологии находятся на этапе разработки и задействованы для выпуска единичных, модельных экземпляров микрофлюидных систем [4, 5]. Разработка более универсальных и доступных широкому кругу пользователей методов изготовления объёмной микрофлюидики в силикатных материалах является актуальной задачей в настоящее время.

Прямая лазерная запись (ПЛЗ) с применением ультракоротких лазерных импульсов зарекомендовала себя как эффективный инструмент интеграции элементов фотоники [6], микро- [7] и нанофлюидики [8] в стекле. Изменяя параметры записи — длину волны, длительность импульсов и частоту их повторения, плотность энергии — можно обеспечить формирование различных типов модификации стекла в виде изменения показателя преломления [9], создания областей с контролируемым двулучепреломлением [10] или образование микропустот [11]. Фактически, режимы, при которых возникают периодические нанорешётки [12] или микропустоты [13], считают подходящими для формирования объёмных микрофлюидных элементов

в сплошных силикатных средах. ПЛЗ в таких режимах с максимальным перекрытием лазерных импульсов приводит к формированию прообраза микроканала, где на следующем этапе производят его очищение в щелочном растворе. Такие этапы относятся к субтрактивным лазерным технологиям формирования микрофлюидных элементов в стекле.

Среди лазерных методов записи микрофлюидных систем появилась новая тенденция интеграции сразу нескольких функциональных элементов на едином силикатном чипе, например, оптического волновода и микроканала [14]. Прямая лазерная запись таких элементов в сплошных средах становится трудно реализуемой, так как неотъемлемый этап химической обработки разделяет процесс создания прообраза канала и записи волноводного элемента, что затрудняет их согласованное функционирование. Поэтому одновременная запись оптофлюидных элементов является перспективной задачей среди исследователей.

Применению новых материалов для ПЛЗ оптофлюидных элементов уделяется особое внимание в последнее время. В частности, нанопористые силикатные матрицы (НПСМ) нашли своё применение при лазерной интеграции оптических сенсорных элементов [15] и микрофлюидных систем [16, 17]. Проведённые нами исследования по структурной модификации НПСМ показали возможность создания трёх основных типов модификации — увеличение контраста показателя преломления [18], формирование двулучепреломляющих областей [19] и микропустот [20]. Однако в известной нам литературе не проводились исследования влияния химического щелочного травления на свойства структурной модификации НПСМ. Подобное исследование позволит выявить подходящий тип структурной лазерной модификации для создания микроканалов в НПСМ. Кроме того, химическое травление областей с чередующейся плотностью позволит реализовать новый тип оптофлюидного элемента, который в сечении представляет собой

полый микроканал, окруженный более плотной областью, обладающей волноводными свойствами.

Целью работы является формирование объёмных микроканалов в пластине пористой матрицы стекла с помощью гибридной технологии лазерной записи трёх видов структур и дальнейшего химического травления в растворе гидроксида калия. Исследование полученных структур проводилось с применением оптической микроскопии и спектроскопии, что позволило определить режимы записи полых микроканалов и сформулировать условия реализации оптофлюидных элементов. В частности, микроканалы, сформированные в режиме лазерной записи двулучепреломляющих структур, были протестированы при заполнении их жидкостью. Кроме того, продемонстрирован уникальный оптофлюидный элемент, который одновременно выполняет волноводную функцию и пропускает жидкость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе рассматривается гибридная субтрактивная технология создания микроканалов и оптофлюидных элементов в объёме НПСМ, которая содержит следующие ключевые этапы (рис. 1): (а) ПЛЗ трёх типов структурной модификации протяжённой формы внутри пла-

стин НПСМ-7; (б) этап химического травления НПСМ с записанными структурами в растворе гидроксида калия, где происходит увеличение свободного объёма пор и очистка записанных структур; (в) очистка и сушка пластины НПСМ-17.

В качестве материала используются пластины НПСМ-7 со средним диаметром пор 7 нм, пористостью 25% и показателем преломления в воздушно-сухом состоянии 1,34. Описание процесса изготовления приведено в работе [21].

Лазерная обработка НПСМ-7 производилась на схеме, представленной на рис. 2. В качестве источника лазерного излучения используется волоконный фемтосекундный лазер (АНТАУС-20W-20u/1M, АВЕСТА-ПРОЕКТ, Москва, Россия) с регулируемой длительностью импульсов τ от 250 фс до 6 пс, длиной волны $\lambda = 1030$ нм, максимальной средней мощностью излучения $P = 20$ Вт, с частотой генерации $\nu = 1$ МГц. Фокусировка лазерного излучения осуществлялась с помощью объектива с увеличением 20X и числовой апертурой 0,4. Схема для реализации ПЛЗ функционирует следующим образом: ультракороткие импульсы от лазера 1 проходят через систему зеркал и направляются в генератор второй гармоники Avesta ATsG-O-1030 2 для удвоения оптической частоты ($\lambda = 515$ нм). Далее лазерный пучок фокусируется с помощью объектива 4.

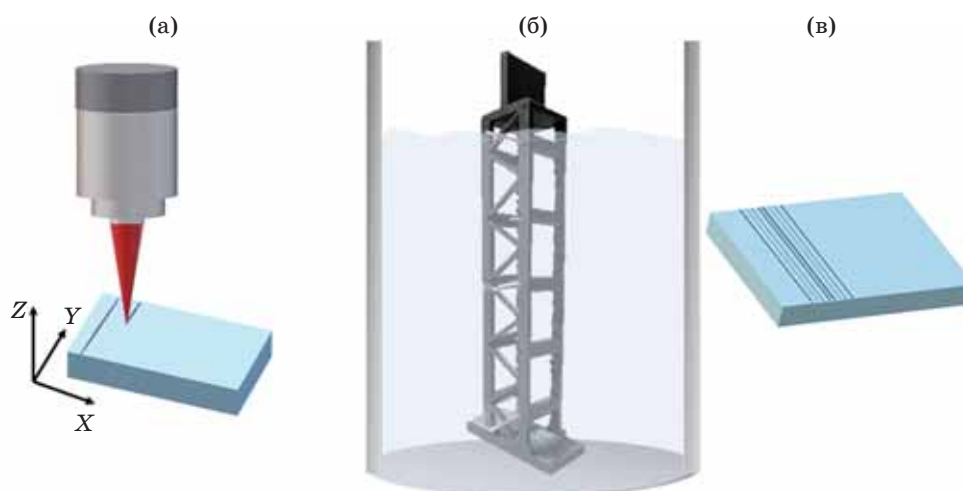


Рис. 1. Схематическое изображение этапов субтрактивной технологии создания оптофлюидных элементов в объёме НПСМ. Прямая лазерная запись (а), щелочное травление пластины НПСМ-7 (б), очистка и сушка пластины НПСМ-17 (в)

Fig. 1. Schematic image of the stages of the subtractive technology for fabrication optofluidic elements in the volume of NPSM. (a) Direct laser writing, (б) alkaline etching of the NPSM-7, (в) cleaning and drying of the NPSM-17

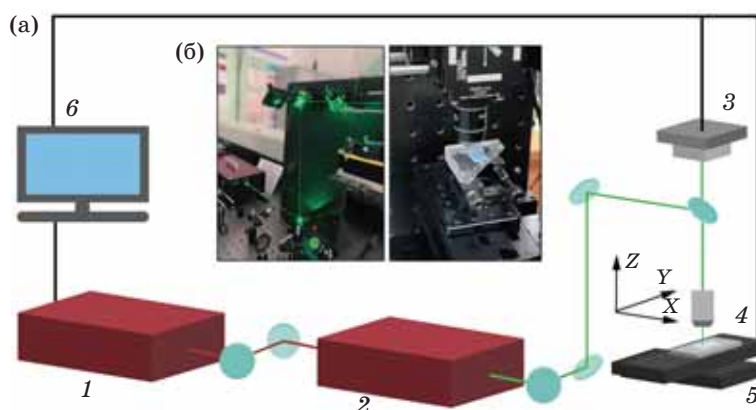


Рис. 2. Схематическое изображение (а) и фотографии (б) фемтосекундного лазерного комплекса для ПЛЗ внутри оптических материалов, где 1 — волоконный фемтосекундный лазер (Avesta ANTAUS-20W-20u/1M), 2 — генератор второй гармоники Avesta ATsG-O-1030, 3 — камера, 4 — фокусирующий объектив, 5 — трёхкоординатный стол, 6 — ПК

Fig. 2. Schematic image (a) and photos (b) of a femtosecond laser complex for DLW inside optical materials, where 1 — fiber femtosecond laser (Avesta ANTAUS-20W-20u/1M), 2 — Avesta ATsG-O-1030 second harmonic generator, 3 — camera, 4 — focusing objective, 5 — three-coordinate table, 6 — PC

Камера 3 используется для визуализации результата лазерной обработки материала. Фокусировка лазерного излучения осуществляется внутри пластины НПСМ-7 на глубине 400 мкм. Перемещение пластины НПСМ-7 относительно сфокусированного лазерного пучка происходит с помощью трёхкоординатного стола (Thorlabs DDSM50/M). На фотографии (рис. 2б) показан процесс лазерной обработки НПСМ-7.

Щелочное травление производится согласно ранее опубликованной методике [21] в растворе гидроксида калия (КОН) 0,5М при температуре $0,0 \pm 0,1$ °С. Целью травления является извлечение аморфного кремнезема из ликвационных каналов и формирование силикатного каркаса со сквозными порами. В результате увеличивается средний размер нанопор до 17 нм и пористость до 50%, а показатель преломления снижается до 1,22 (НПСМ-17).

Ожидается, что щелочное травление окажет действие на созданные протяжённые области модификации в стекле. Среди возможных вариантов структурной модификации после этого этапа можно рассмотреть следующее — очистка и формирование полых микроканалов, изменение их оптических свойств или создание комбинированных в сечении структур, состоящих из чередующихся микропустот и слоёв с повышенной плотностью.

Образцы после травления промывают в дистиллированной воде и сушат в печи.

Микрофотографии сформированных структур были выполнены с помощью оптического микроскопа Axio Imager A1m (Carl Zeiss) в светлом поле в проходящем и отражённом свете. Регистрация спектров отражения проводилась на микроскопе-спектрофотометре (МСФУ-К, ЛОМО) с осветительной лампой накаливания КГМ9-70 в диапазоне длин волн 400–800 нм с шагом $\Delta\lambda = 2$ нм с размером фотометрируемого участка $0,005 \times 0,25$ мм при использовании объектива с увеличением 10X и числовой апертурой 0,25.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В этом разделе мы последовательно обсудим результаты лазерной записи различных типов структурной модификации НПСМ-7 и их щелочного травления. Отметим, что для ПЛЗ рассматриваемая марка стекла является новой, так как ранее в работе использовались другие матрицы с меньшим размером пор. В результате этапа ПЛЗ были записаны три типа структурной модификации — (i) уплотнение материала ($\nu = 25$ кГц, $\tau = 500$ фс, $\nu = 45$ мм/с, $P = 54$ – 58 мВт) с образованием более плотной сердцевины материала, что согласуется с ранее полученными результатами в НПСМ с другим размером пор и составом [18];

(ii) двулучепреломляющие структуры, которые формируются в результате действия лазерных импульсов ($\nu = 25$ кГц, $\tau = 500$ фс, $v = 5$ мм/с, $P = 15$ –50 мВт); (iii) увеличение мощности лазерного излучения ($\nu = 50$ кГц, $\tau = 2$ пс, $v = 1$ мм/с, $P = 48$ –60 мВт) привело к образованию микропустот [22].

УПЛОТНЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Формирование однородных структур происходило при плотности энергии $17,5$ Дж/см². Как было показано нами ранее [18], подобные структуры обладают волноводными свойствами и относительно низким значением контраста показателя преломления, поэтому исследования проводились в светлом поле при скрещенных поляризаторе и анализаторе (рис. 3). До щелочного травления заметны протяжённые области уплотнения в виде треков с диаметром 5 ± 1 мкм и поперечным сечением 75 ± 1 мкм (рис. 3а). На снимках также заметно наличие тёмных областей в центральной части каждого трека. После щелочного травления стали заметны микрополости на протяжении трека, диаметр треков не изменился (рис. 3б). Вероятно, раствор проникал через центральную часть каждого канала. Кроме того, согласно ранее проведённым исследованиям подобной модификации стекла [23], авторами было описано образование нанотрещин вдоль всего трека. Наличие такой сложной структуры в сечении предполагает очищение данного типа модификации в центральной части за счёт распространения раствора по нано-

и микрополостям. Применение данных треков для прокачки жидкости не представляется возможным, так как микрополости после травления неоднородны.

ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Современные исследования продемонстрировали, что применение областей двулучепреломления при создании микроканалов является перспективным и обеспечивает повышенную скорость очистки каналов при условии, что периодические нанополости формируются вдоль траектории лазерной записи [12]. В настоящей работе мы заметили, что сформированные треки (рис. 4а) с плотностью энергии $1,66$ Дж/см² с выраженным двулучепреломлением обладают уникальными спектральными свойствами. Так, при наблюдении единичного трека с помощью микроскопа в режиме на отражение каждому треку свойственно яркое свечение в зелёной области спектра (рис. 4б). Изменения спектральных свойств вызваны образованием нанопериодической структуры в сечении трека, что происходит в рамках интерференционно-плазмонного механизма формирования иерархических структур из двумерных слоёв двулучепреломляющих нанорешёток, что было продемонстрировано ранее в случае ПЛЗ в флюорите [24]. В данном эксперименте показатель преломления НПСМ-7 оказался меньше используемых ранее оптических материалов, что могло привести к увеличению периода нанорешётки в процессе ла-

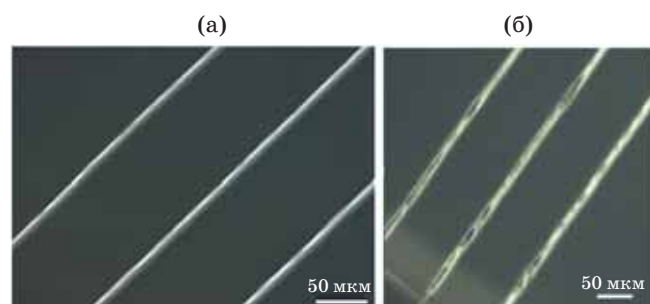


Рис. 3. Микрофотография треков, записанных при $P = 54$ –58 мВт, с шагом в 2 мВт в поляризационной микроскопии до (а) и после (б) щелочного травления

Fig. 3. Microphoto of tracks formed at $P = 54$ –58 mW, with a step of 2 mW in polarization microscopy before (a) and after (b) alkaline etching

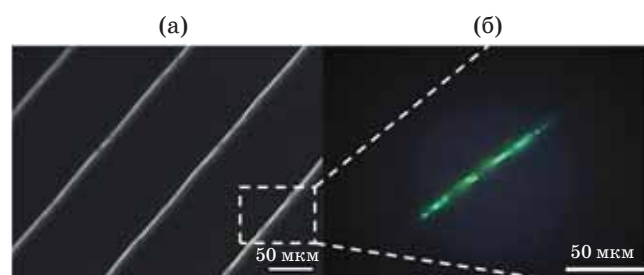


Рис. 4. Микрофотография двулучепреломляющих структур до травления в скрещенных поляризаторах ($P = 15$ –30 мВт) (а) и в отражённом свете ($P = 30$ мВт) (б)

Fig. 4. Microphoto of birefringent structures before etching in crossed polarizer and analyzer ($P = 15$ –30 mW) (a) and in reflected light ($P = 30$ mW) (b)

зерной записи. В результате созданный трек проявляет себя в оптическом видимом диапазоне как отражающая решётка Брэгга.

После травления в центральной части трека сформировалась полость, т.е. образовался протяжённый полый канал внутри НПСМ-17 (рис. 5а). Также было замечено, что вдоль треков, которые были сформированы при значениях мощности более 30 мВт, имелись напряжения, которые после травления стали причиной образования микротрещин. Остальные треки представляют собой полый канал, окружённый оболочкой с повышенной плотностью, которая также заметна на изображении в виде яркого свечения (рис. 5а). Такой сформированный элемент мы потенциально относим к оптофлюидному, где сердцевина выполняет функцию микрофлюидного канала, а оболочка — функцию волновода за счёт разницы показателя преломления. Кроме того, исследования треков в отражённом освещении выявили наличие яркого свечения каналов в синей части спектрального диапазона (рис. 5б). Вопрос изменения спектральных свойств каналов после травления пока остаётся открытым. Можно лишь сделать предположение о влиянии показателя преломления окружающей среды (НПСМ) на спектральные свойства элемента.

Также были исследованы спектральные свойства созданных треков в НПСМ-17. Интерес вызывает то, что ранее о таких особенностях двулучепреломляющих структур не было известно, что связано с небольшим пери-

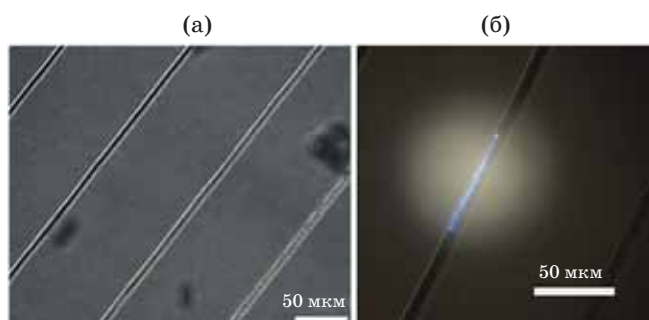


Рис. 5. Микрофотография двулучепреломляющих структур после травления в поляризованном свете ($P = 15\text{--}30$ мВт) (а) и в отражённом свете ($P = 20$ мВт) (б)

Fig. 5. Microphoto of birefringent structures after etching in polarized light ($P = 15\text{--}30$ mW) (a) and in reflected light ($P = 20$ mW) (b)

одом нанорешёток. Кроме того, наличие оптической связи по всей длине канала вызывает интерес при разработке новых принципов диагностики расположенной в канале жидкости.

Для упрощения обсуждения результатов мы обозначим созданные элементы, как «зелёный» (рис. 4б) и «синий» (рис. 5б). До и после химического травления были зарегистрированы спектры отражения исходных пластин НПСМ-7/17, «зелёного» и «синего» треков относительно кварцевого стекла. Можно заметить пики интенсивности отражённого света у «зелёного» трека на длине волны 535 нм и у «синего» на 480 нм (рис. 6). Большее значение отражения наблюдается у пластины НПСМ-7 и у «зелёного» трека, по сравнению с НПСМ-17 и «синим» треком. Этот эффект связан с меньшим значением свободного объёма пор у пластины до травления. Мы предполагаем, что смещение пика отражения в синюю область связано с уменьшением показателя преломления среды, то есть матрицы НПСМ.

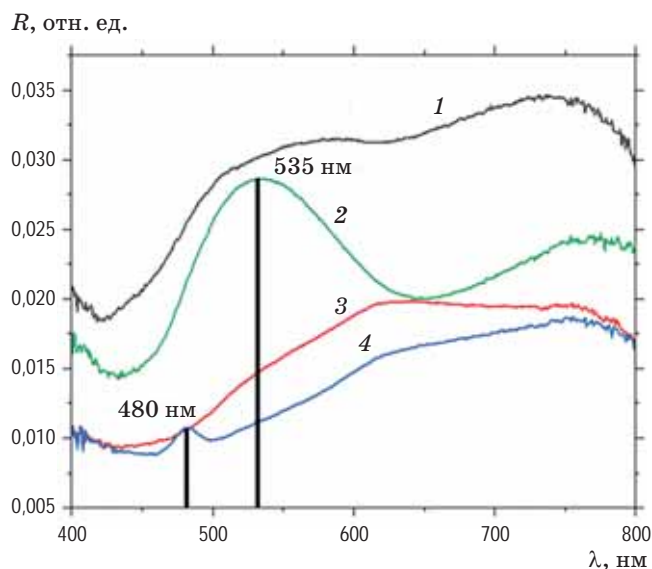


Рис. 6. Спектры отражения: кривые 1 и 3 — НПСМ-7 и НПСМ-17 соответственно, кривые 2 и 4 — «зелёного» и «синего» треков соответственно, относительно кварцевой пластины в диапазоне длин волн 400–800 нм. Размер фотометрического участка $0,005 \times 0,25$ мм

Fig. 6. Reflection spectra: curves 1 and 3 — NPSM-7 and NPSM-17, respectively, curves 2 and 4 — “green” and “blue” tracks, respectively, relative to the quartz plate in the wavelength range of 400–800 nm. The size of the photometric section is 0.005×0.25 mm

МИКРОПУСТОТЫ

В результате изменения плотности энергии лазерного излучения до $1,53 \text{ Дж/см}^2$ произошло формирование массива из микропустот с диаметром $(5 \pm 1) \text{ мкм}$ и высотой $(25 \pm 1) \text{ мкм}$ (рис. 7а). Каждая тёмная сферическая область состоит из вспененного материала с микроразмерными пустотами. Наличие разрушенных участков стекла вдоль трека привело к яркому свечению каждой области при исследовании в поляризованном свете. При этом, вне зависимости от угла поворота образца интенсивность свечения трека не менялась. После этапа щелочного травления все частицы стекла в объёме микроканала были протравлены, а тёмные области перестали проявлять двулучепреломление в поляризованном свете (рис. 7б). Мы решили также повернуть образец относительно двух скрещенных поляризатора и анализатора на 0° , 45° , 90° для демонстрации отсутствия двулучепреломления в сечении созданного канала после травления (рис. 7в). Наличие скругленных краёв привело к появлению неоднородностей и перемычек на протяжении всего трека, что не позволит пропитать канал жидкостью.

ЭТАП ПРОПИТКИ

Исследование пропускной способности жидкости через микроразмерные каналы, записанные в стекле, всегда вызывает ряд технических сложностей в силу несопоставимости созданных «входов» и «выходов» каналов с коннекторами коммерческих инфузионных насосов. На этапе проектирования микрофлюидной системы, создаваемой ПЛЗ, обычно формируют коннекторы, которые позволят состыковаться с различными системами подачи жидкости [25]. В нашем случае были реализованы только прямолинейные каналы с сечением до 7 мкм , которые тестировались посредством осаждения капли (раствор родамина с объёмом 3 мкл) на торец пластины стекла. Тестированию подвергались все три типа созданных каналов, однако, видимый результат был замечен только для каналов, созданных на базе двулучепреломляющих структур (рис. 8а). По понятным причинам первый тип, в виде уплотнения, не проявил себя в силу неоднородности созданного канала. Третий тип, созданный из микропустот, тоже не пропустил жидкость по каналу, что связано с наличием разрывов или перемычек в каналах.

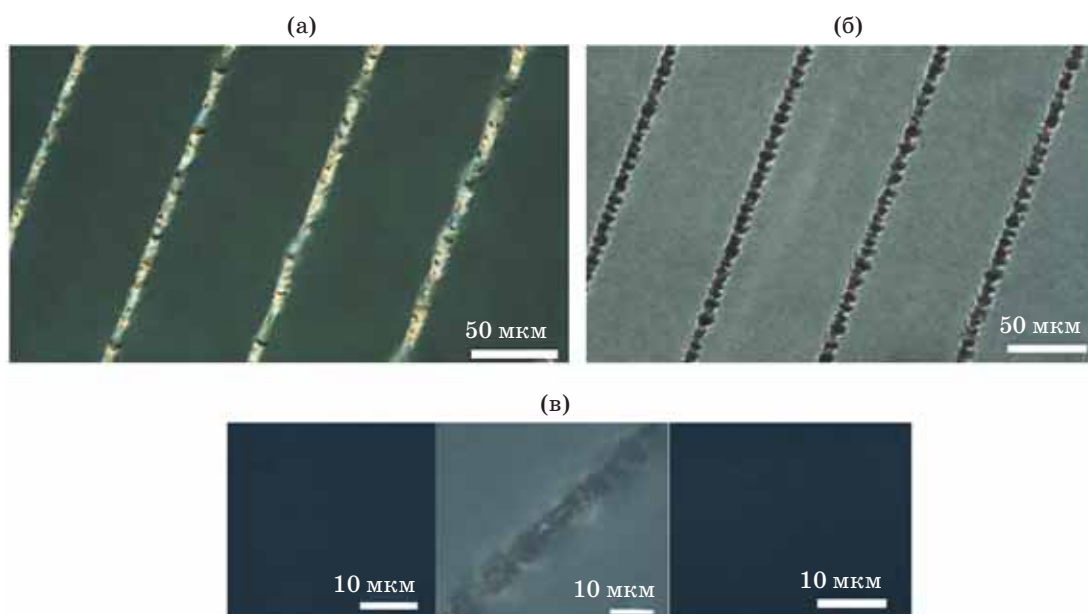


Рис. 7. Микрофотографии, выполненные при скрещенных поляризаторе и анализаторе микроскопа: треки из микропустот после ПЛЗ ($P = 48\text{--}54 \text{ мВт}$) (а) и после травления (б); трек разуплотнения (54 мВт) в поляризованном свете при углах поворота образца 0° , 45° , 90° (в)

Fig. 7. Microphotos in crossed polarizer and analyzer: tracks from microvoids after DLW ($P = 48\text{--}54 \text{ mW}$) (а) and after etching (б); decompression track (54 mW) in polarized light at sample rotation angles of 0° , 45° , 90° (в)

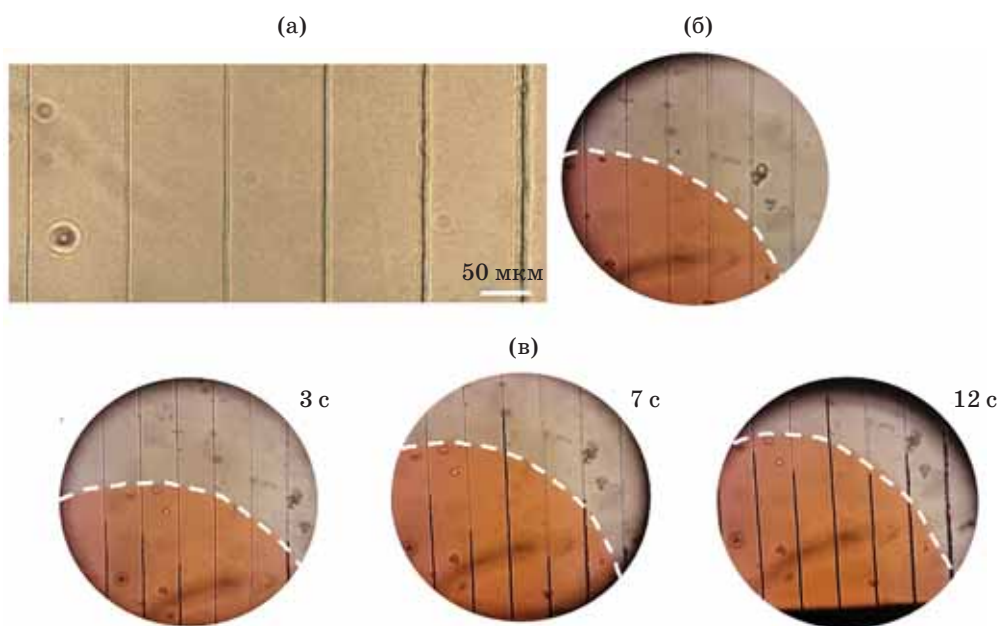


Рис. 8. Изображения массива микроканалов, полученных из двулучепреломляющих структур, в светлом поле: до пропитки каналов жидкостью (а); после осаждения капли раствора родамина 6Ж (3 мкл) на торец образца НПСМ-17 (пунктиром отмечена зона распространения жидкости) (б); процесс испарения жидкости из микроканалов в течение 12 секунд (в), где потемнение канала свидетельствует об испарении жидкости из него

Fig. 8. Images of an array of microchannels obtained from birefringent structures in transmission light: before the channels are impregnated with liquid (a); after precipitation of a drop of rhodamine solution 6J (3 μ l) on the cross-section of the NPSM-17 (the dotted line marks the liquid zone) (б); the process of evaporation of liquid from microchannels for 12 seconds (в), where the darkening of the channel indicates the evaporation of liquid from it

Потенциально третий тип каналов имеет перспективы для решения задач микрофлюидики, например, в качестве микрорезервуаров повышенного объема [26].

В силу наличия нанопористого каркаса вокруг созданного канала раствор родамина 6Ж распространялся по пластине НПСМ-17, создавая окружность, которую мы отметили пунктиром на рис. 8б. Заснять процесс пропитки оказалось невозможным в данных условиях, и на рис. 8б показан результат после осаждения капли, где заметно полное заполнение всех созданных каналов жидкостью за пределами фронта распространения осаждённого раствора. Заполненный водой канал стал однородным на микрофотографии (рис. 8б). Затем мы решили продолжить наблюдение за каналами, так как столь малый объем жидкости должен в скором времени испариться из канала, освободив его. Постепенно, начиная с 3 с, становится заметно испарение воды из микроканалов (потемнение микроканала на

фотографиях рис. 8в). Различие в скорости высыхания можно связать с качеством шлифовки торцов стекла, так как наличие микрон неоднородностей или загрязнений торцов может приводить к затруднению прокачки жидкости.

ЭТАП ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

После этапа пропитки было проведено исследование волноводных свойств сформированных двулучепреломляющих структур. Однако процесс полировки торцов образца не был осуществлён в данном исследовании. В этом не было необходимости, так как главной задачей было проверить предположение о том, что многослойная структура — это полый канал с уплотнённой оболочкой работает как светопроводящий элемент. Для этого был произведён ввод лазерного излучения ($\lambda = 535$ нм,

$P = 25$ мВт) в микроканалы (рис. 9б) по методике, описанной ранее [18], с использованием объективов с увеличением 20X и числовой апертурой 0,4 для ввода излучения в канал и регистрации ближнепольного распределения интенсивности на выходе из оптофлюидного элемента.

Для проведения эксперимента были выбраны треки двулучепреломляющих структур после этапа травления (рис. 9а). На рис. 9б показано поперечное сечение сформированных оптофлюидных элементов, а также их схематичное изображение (рис. 9в). Сечение элемента вытянуто вдоль оптической оси, но мы также заметили наличие уплотнённых слоёв, окружающих микроканал. Центральная

часть трека имеет меньший показатель преломления, по сравнению со сформировавшейся оболочкой слева и справа от микроканала. Был произведён ввод лазерного излучения в оболочку трека (рис. 9г) и зарегистрировано ближнепольное распределение на выходе из микроканала (рис. 9д). В результате, ближнепольное распределение интенсивности на выходе из структуры имеет 2 максимума интенсивности. Было выдвинуто предположение, что излучение распространяется с двух сторон от сердцевины оптофлюидного элемента по уплотнённой оболочке. Торцы пластины НПСМ не были отполированы, что вызвало сильное рассеяние излучения вокруг основных мод.

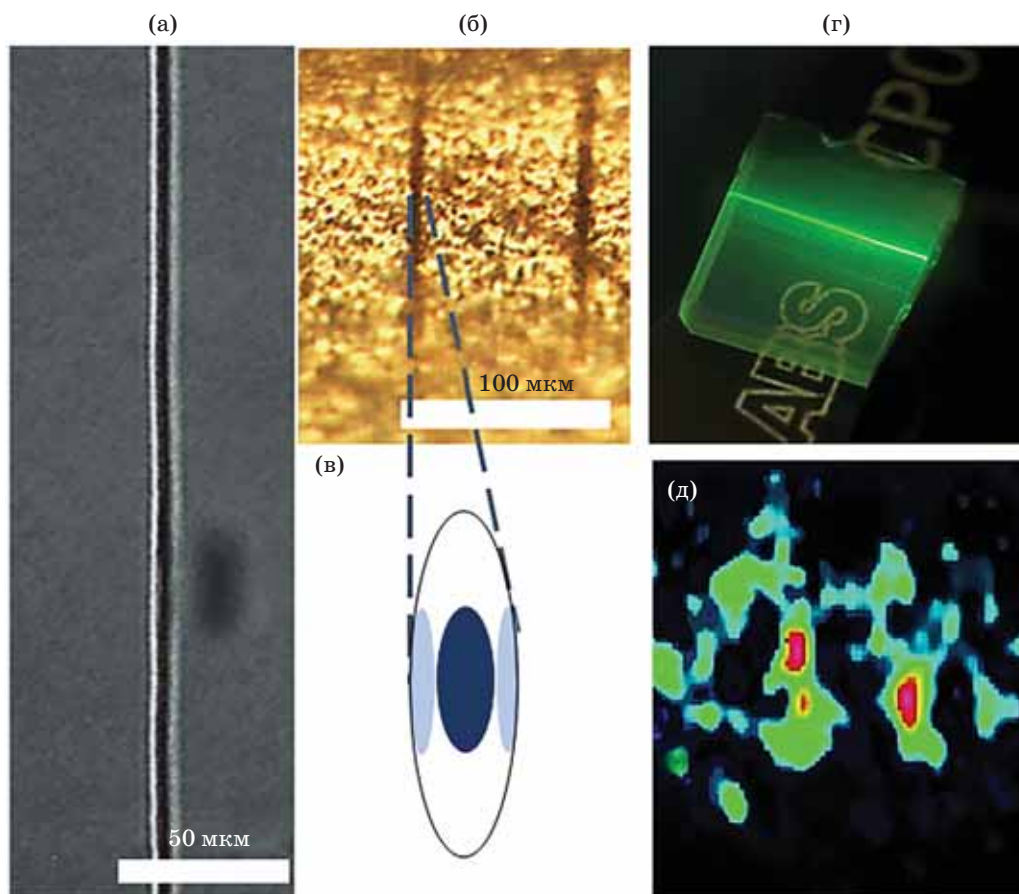


Рис. 9. Микрофотография в светлом поле при скрещенных поляризаторе и анализаторе оптофлюидного элемента, созданного на базе двулучепреломляющих структур после этапа травления (а), его поперечное сечение (б) и схематичное изображение (в). Фотография прохождения лазерного излучения ($\lambda = 535$ нм) через структуру (вид сверху) (г) и ближнепольное распределение интенсивности излучения после трека (д)

Fig. 9. Microphoto in transmission light with crossed polarizer and analyzer of an optofluidic element created on the basis of birefringent structures after the etching step (a), cross section (б) and schematic image (в). Photo of the distribution of laser radiation ($\lambda = 535$ nm) through the structure (top view) (г) and near-field distribution of radiation intensity after the track (д)

ВЫВОД

В работе продемонстрирована гибридная лазерная субтрактивная технология формирования оптофлюидных элементов в НПСМ. В процессе ПЛЗ сформированы три типа структурной модификации НПСМ-7 — уплотнение, двулучепреломление и микропустоты. Каждый тип структур подвергался щелочной обработке в растворе КОН с целью удаления продуктов разрушения в сечении записанного трека и формирования протяжённого микроканала. В результате, очищение было замечено для всех типов структурной модификации, но формирование однородного канала без прерывания удалось достичь для двулучепреломляющих треков. Отметим, что помимо образования полого канала в центральной области треков мы заметили перспективные оп-

тические свойства формируемых областей: (i) микроканал окружён более плотной оболочкой, что также позволило проверить его волноводные свойства; (ii) наличие узкополосного отражения микроканала до и после травления на длинах волн 535 и 480 нм соответственно. Пока что это явление позволяет сформулировать новые задачи для исследования механизма образования и изменения спектральных свойств и открывает новые задачи для исследования сенсорных свойств таких оптофлюидных элементов. Кроме того, каждый элемент подвергался пропитке раствором родамина 6Ж. Только каналы, созданные на базе двулучепреломляющих треков, продемонстрировали возможность полного заполнения жидкостью и её испарения из каналов с течением времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bruus H. Theoretical microfluidics. Chippenham: Oxford university press, 2007. 345 p.
2. Li W., Chu W., Yin D., Liang Y., Wang P., Qi J., Wang Z., Lin J., Wang M., Wang Z., Cheng Y. A three-dimensional microfluidic mixer of a homogeneous mixing efficiency fabricated by ultrafast laser internal processing of glass // *Applied Physics A*. 2020. V. 126. № 10. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04000-8>
3. Niculescu A.G., Chircov C., Bîrcă A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. V. 22. № 4. P. 2011. <https://doi.org/10.3390/ijms22042011>
4. Italia V., Giakoumaki A.N., Bonfadini S., Bharradwaj V., Le Phu T., Eaton S.M., Ramponi R., Bergamini G., Lanzani G., Criante L. Laser-inscribed glass microfluidic device for non-mixing flow of miscible solvents // *Micromachines*. 2018. V. 10. № 1. P. 23. <https://doi.org/10.3390/mi10010023>
5. Liao Y., Song J., Li E., Luo Y., Shen Y., Chen D., Cheng Y., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing // *Lab on a Chip*. 2012. V. 12. № 4. P. 746–749. <http://doi.org/10.1039/C2LC21015K>
6. Tan D., Zhang B., Qiu J. Ultrafast laser direct writing in glass: Thermal accumulation engineering and applications // *Laser & Photonics Reviews*. 2021. V. 15. № 9. P. 2000455. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000455>
7. Fedotov S., Lipatiev A., Lipateva T., Lotarev S., Sigaev V. Hollow channel formation inside Sodium Aluminoborate Glass by femtosecond laser

REFERENCES

1. Bruus H. Theoretical microfluidics. Chippenham: Oxford university press, 2007. 345 p.
2. Li W., Chu W., Yin D., Liang Y., Wang P., Qi J., Wang Z., Lin J., Wang M., Wang Z., Cheng Y. A three-dimensional microfluidic mixer of a homogeneous mixing efficiency fabricated by ultrafast laser internal processing of glass // *Applied Physics A*. 2020. V. 126. № 10. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04000-8>
3. Niculescu A.G., Chircov C., Bîrcă A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. V. 22. № 4. P. 2011. <https://doi.org/10.3390/ijms22042011>
4. Italia V., Giakoumaki A.N., Bonfadini S., Bharradwaj V., Le Phu T., Eaton S.M., Ramponi R., Bergamini G., Lanzani G., Criante L. Laser-inscribed glass microfluidic device for non-mixing flow of miscible solvents // *Micromachines*. 2018. V. 10. № 1. P. 23. <https://doi.org/10.3390/mi10010023>
5. Liao Y., Song J., Li E., Luo Y., Shen Y., Chen D., Cheng Y., Xu Z., Sugioka K., Midorikawa K. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing // *Lab on a Chip*. 2012. V. 12. № 4. P. 746–749. <http://doi.org/10.1039/C2LC21015K>
6. Tan D., Zhang B., Qiu J. Ultrafast laser direct writing in glass: Thermal accumulation engineering and applications // *Laser & Photonics Reviews*. 2021. V. 15. № 9. P. 2000455. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000455>
7. Fedotov S., Lipatiev A., Lipateva T., Lotarev S., Sigaev V. Hollow channel formation inside Sodium Aluminoborate Glass by femtosecond laser

- writing and distilled water etching // *Materials*. 2021. V. 14. № 19. P. 5495. <https://doi.org/10.3390/ma14195495>
8. Sima F., Sugioka K. Ultrafast laser manufacturing of nanofluidic systems // *Nanophotonics*. 2021. V. 10. № 9. P. 2389–2406. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0159>
9. Macias-Montero M., Muñoz F., Sotillo B., Del Hoyo J., Ariza R., Fernandez P., Siegel J., Solis J. Femtosecond laser induced thermophoretic writing of waveguides in silicate glass // *Scientific reports*. 2021. V. 1. № 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87765-z>
10. Shakhgildyan G., Lipatiev A., Lotarev S., Fedotov S., Sigaev V. Glass: Home of the periodic table // *Frontiers in Chemistry*. 2020. V. 8. P. 384. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00384>
11. Kanehira S., Si J., Qiu J., Fujita K., Hirao K. Periodic nanovoid structures via femtosecond laser irradiation // *Nano Letters*. 2005. V. 5. № 8. P. 1591–1595. <https://doi.org/10.1021/nl0510154>
12. Li X., Xu J., Lin Z., Qi J., Wang P., Chu W., Fang Z., Wang Z., Chai Z., Cheng Y. Polarization-insensitive space-selective etching in fused silica induced by picosecond laser irradiation // *Applied Surface Science*. 2019. V. 485. P. 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.211>
13. Capuano L., Tiggelaar R.M., Berenschot J.W., Gardeniers J.G., Römer G.R. Fabrication of millimeter-long structures in sapphire using femtosecond infrared laser pulses and selective etching // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. V. 133. P. 106114. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020>
14. Vazquez R.M., Osellame R., Nolli D., Dongre C., van den Vlekkert H., Ramponi R., Pollnau M., Cerullo G. Integration of femtosecond laser written optical waveguides in a lab-on-chip // *Lab on a Chip*. 2009. V. № 1. P. 91–96. <https://doi.org/10.1039/B808360F>
15. Lijing Z., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Petrov A.B., Veiko V.P., Alodjants A.P. Optical sensitivity of waveguides inscribed in nanoporous silicate framework // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. № 1. P. 123. <https://doi.org/10.3390/nano11010123>
16. Sima F., Sugioka K., Vázquez R.M., Osellame R., Kelemen L., Ormos P. Three-dimensional femtosecond laser processing for lab-on-a-chip applications // *Nanophotonics*. 2018. V. 7. № 3. P. 613–634. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0097>
17. Liu C., Liao Y., He F., Song J., Lin D., Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. Compact 3D microfluidic channel structures embedded in glass fabricated by femtosecond laser direct writing // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. 2013. V. 8. № 2. P. 170. <http://doi.org/10.2961/jlmn.2013.02.0010>
- writing and distilled water etching // *Materials*. 2021. V. 14. № 19. P. 5495. <https://doi.org/10.3390/ma14195495>
8. Sima F., Sugioka K. Ultrafast laser manufacturing of nanofluidic systems // *Nanophotonics*. 2021. V. 10. № 9. P. 2389–2406. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0159>
9. Macias-Montero M., Muñoz F., Sotillo B., Del Hoyo J., Ariza R., Fernandez P., Siegel J., Solis J. Femtosecond laser induced thermophoretic writing of waveguides in silicate glass // *Scientific reports*. 2021. V. 1. № 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87765-z>
10. Shakhgildyan G., Lipatiev A., Lotarev S., Fedotov S., Sigaev V. Glass: Home of the periodic table // *Frontiers in Chemistry*. 2020. V. 8. P. 384. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00384>
11. Kanehira S., Si J., Qiu J., Fujita K., Hirao K. Periodic nanovoid structures via femtosecond laser irradiation // *Nano Letters*. 2005. V. 5. № 8. P. 1591–1595. <https://doi.org/10.1021/nl0510154>
12. Li X., Xu J., Lin Z., Qi J., Wang P., Chu W., Fang Z., Wang Z., Chai Z., Cheng Y. Polarization-insensitive space-selective etching in fused silica induced by picosecond laser irradiation // *Applied Surface Science*. 2019. V. 485. P. 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.211>
13. Capuano L., Tiggelaar R.M., Berenschot J.W., Gardeniers J.G., Römer G.R. Fabrication of millimeter-long structures in sapphire using femtosecond infrared laser pulses and selective etching // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. V. 133. P. 106114. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020>
14. Vazquez R.M., Osellame R., Nolli D., Dongre C., van den Vlekkert H., Ramponi R., Pollnau M., Cerullo G. Integration of femtosecond laser written optical waveguides in a lab-on-chip // *Lab on a Chip*. 2009. V. № 1. P. 91–96. <https://doi.org/10.1039/B808360F>
15. Lijing Z., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Petrov A.B., Veiko V.P., Alodjants A.P. Optical sensitivity of waveguides inscribed in nanoporous silicate framework // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. № 1. P. 123. <https://doi.org/10.3390/nano11010123>
16. Sima F., Sugioka K., Vázquez R.M., Osellame R., Kelemen L., Ormos P. Three-dimensional femtosecond laser processing for lab-on-a-chip applications // *Nanophotonics*. 2018. V. 7. № 3. P. 613–634. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0097>
17. Liu C., Liao Y., He F., Song J., Lin D., Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. Compact 3D microfluidic channel structures embedded in glass fabricated by femtosecond laser direct writing // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. 2013. V. 8. № 2. P. 170. <http://doi.org/10.2961/jlmn.2013.02.0010>

18. Zhong L., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P., Li Z. Porous glass density tailoring by femtosecond laser pulses // *Optical and Quantum Electronics*. 2020. V. 52. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2163-7>
19. Kudryashov S., Rupasov A., Zakoldaev R., Smaev M., Kuchmizhak A., Zolot'ko A., Kosobokov M., Akhmatkhanov A., Shur V. Nanohydrodynamic local compaction and nanoplasmonic form-birefringence inscription by ultrashort laser pulses in nanoporous fused Silica // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 20. P. 3613. <https://doi.org/10.3390/nano12203613>
20. Itina T.E., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Ma H., Kudryashov S.I., Medvedev O.S., Veiko V.P. Ultra-short laser-induced high aspect ratio densification in porous glass // *Optical Materials Express*. 2019. V. 9. № 11. P. 4379–4389. <https://doi.org/10.1364/OME.9.004379>
21. Быков Е.П., Заколдаев Р.А., Андреева Н.В., Шишкина А.С., Яндыбаева Ю.И., Андреева О.В. Изготовление нанопористых силикатных матриц: вопросы оптической однородности // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 3. С. 56–67. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-56-67>
22. Ma H., Zakoldaev R.A., Rudenko A., Sergeev M.M., Veiko V.P., Itina T.E. Well-controlled femtosecond laser inscription of periodic void structures in porous glass for photonic applications // *Optics Express*. 2017. V. 25. № 26. P. 33261–33270. <https://doi.org/10.1364/OE.25.033261>
23. Liao Y., Ni J., Qiao L., Huang M., Bellouard Y., Sugioka K., Cheng Y. High-fidelity visualization of formation of volume nanogratings in porous glass by femtosecond laser irradiation // *Optica*. 2015. V. 2. № 4. P. 329–34. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000329>
24. Kudryashov S.I., Danilov P.A., Rupasov A.E., Smayev M.P., Kirichenko A.N., Smirnov N.A., Ionin A.A., Zolot'ko A.S., Zakoldaev R.A. Birefringent microstructures in bulk fluorite produced by ultrafast pulsewidth-dependent laser inscription // *Applied Surface Science*. 2021. V. 568. P. 150877. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2021.150877>
25. Liu Z., Xu J., Lin Z., Qi J., Li X., Zhang A., Lin J., Chen J., Fang Z., Song Y., Chu W. Fabrication of single-mode circular optofluidic waveguides in fused silica using femtosecond laser microfabrication // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 141. P. 107118. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107118>
26. Xu J., Sima F., Sugioka K. Femtosecond laser direct writing for 3D microfluidic biochip fabrication // *Laser Micro-Nano-Manufacturing and 3D Microprinting*. 2020. P. 247–272. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59313-1_8
18. Zhong L., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P., Li Z. Porous glass density tailoring by femtosecond laser pulses // *Optical and Quantum Electronics*. 2020. V. 52. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2163-7>
19. Kudryashov S., Rupasov A., Zakoldaev R., Smaev M., Kuchmizhak A., Zolot'ko A., Kosobokov M., Akhmatkhanov A., Shur V. Nanohydrodynamic local compaction and nanoplasmonic form-birefringence inscription by ultrashort laser pulses in nanoporous fused Silica // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 20. P. 3613. <https://doi.org/10.3390/nano12203613>
20. Itina T.E., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Ma H., Kudryashov S.I., Medvedev O.S., Veiko V.P. Ultra-short laser-induced high aspect ratio densification in porous glass // *Optical Materials Express*. 2019. V. 9. № 11. P. 4379–4389. <https://doi.org/10.1364/OME.9.004379>
21. Bykov E.P., Zakoldaev R.A., Andreeva N.V., Shishkina A.S., Yandybaeva Y.I., Andreeva O.V. Production of nanoporous silicate matrices — problems of optical homogeneity // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89. № 3. P. 161–168. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000161>
22. Ma H., Zakoldaev R.A., Rudenko A., Sergeev M.M., Veiko V.P., Itina T.E. Well-controlled femtosecond laser inscription of periodic void structures in porous glass for photonic applications // *Optics express*. 2017. V. 25. № 26. P. 33261–33270. <https://doi.org/10.1364/OE.25.033261>
23. Liao Y., Ni J., Qiao L., Huang M., Bellouard Y., Sugioka K., Cheng Y. High-fidelity visualization of formation of volume nanogratings in porous glass by femtosecond laser irradiation // *Optica*. 2015. V. 2. № 4. P. 329–34. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000329>
24. Kudryashov S.I., Danilov P.A., Rupasov A.E., Smayev M.P., Kirichenko A.N., Smirnov N.A., Ionin A.A., Zolot'ko A.S., Zakoldaev R.A. Birefringent microstructures in bulk fluorite produced by ultrafast pulsewidth-dependent laser inscription // *Applied Surface Science*. 2021. V. 568. P. 150877. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2021.150877>
25. Liu Z., Xu J., Lin Z., Qi J., Li X., Zhang A., Lin J., Chen J., Fang Z., Song Y., Chu W. Fabrication of single-mode circular optofluidic waveguides in fused silica using femtosecond laser microfabrication // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 141. P. 107118. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107118>
26. Xu J., Sima F., Sugioka K. Femtosecond laser direct writing for 3D microfluidic biochip fabrication // *Laser Micro-Nano-Manufacturing and 3D Microprinting*. 2020. P. 247–272. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59313-1_8

АВТОРЫ

Алена Сергеевна Шишкина — старший лаборант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57426223000, <http://orcid.org/0000-0002-6628-1234>, shishka2001.shishkina@yandex.ru

Язан Алсаиф — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-0160-0828>, yazan.alsaiif97@hotmail.com

Вероника Андреевна Якимук — старший лаборант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57426182500, <http://orcid.org/0000-0002-1810-847X>, yakimuk2001@mail.ru

Чуньюй Ли — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1401-0918>, ccharmylee@gmail.com

Ольга Владимировна Андреева — доктор техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7006390263, <http://orcid.org/0000-0003-3245-0762>, olga_andreeva@mail.ru

Роман Алексеевич Заколдаев — канд. техн. наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56032041700, <http://orcid.org/0000-0001-6212-0532>, zakoldaev@gmail.com

AUTHORS

Alena S. Shishkina — Senior laboratory assistant, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57426223000, <http://orcid.org/0000-0002-6628-1234>, shishka2001.shishkina@yandex.ru

Yazan Alsaif — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-0160-0828>, yazan.alsaiif97@hotmail.com

Veronika A. Yakimuk — Senior laboratory assistant, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57426182500, <http://orcid.org/0000-0002-1810-847X>, yakimuk2001@mail.ru

Chunyu Li — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-1401-0918>, ccharmylee@gmail.com

Olga V. Andreeva — Dr.Sc., Associate Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7006390263, <http://orcid.org/0000-0003-3245-0762>, olga_andreeva@mail.ru

Roman A. Zakoldaev — PhD, Research Associate, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56032041700, <http://orcid.org/0000-0001-6212-0532>, zakoldaev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.10.2022
Одобрена после рецензирования 12.01.2023
Принята к печати 27.02.2023

The article was submitted to the editorial office 25.10.2022
Approved after review 12.01.2023
Accepted for publication 27.02.2023