

Прямая лазерная запись и исследование оптофлюидных элементов внутри нанопористой силикатной матрицы

© А.С. Шишкина, Ю.И. Яндыбаева, В.А. Якимук, Я. Алсаиф, Р.А. Заколдаев, О.В. Андреева

Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: zakoldaev@gmail.com

Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

В окончательной редакции 08.12.2021 г.

Принята к публикации 07.02.2022 г.

Продemonстрирована прямая лазерная запись фемтосекундными лазерными импульсами ($\lambda = 1030$ nm, $\tau = 220$ fs, $\nu = 200$ kHz) функциональных оптофлюидных элементов внутри нанопористой силикатной матрицы (НПСМ). Действие сфокусированных лазерных импульсов привело к уплотнению нанопористой матрицы, что позволило создать барьеры для изоляции нанопористых ячеек и каналные оптические волноводы. Также продемонстрирована запись микроканалов в режиме разуплотнения нанопористой матрицы с последующей очисткой продуктов разрушения в дистиллированной воде под действием ультразвука. Для каждого типа элементов установлены зависимости геометрических характеристик от энергетических параметров лазерного излучения. Отработаны методики тестирования элементов — проверка проницаемости барьера, ввод лазерного излучения в каналные волноводы.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, фемтосекундные лазерные импульсы, барьеры, волноводы, микроканалы, пористая силикатная матрица, нанопоры.

DOI: 10.21883/OS.2022.05.52437.2885-21

Введение

Прямая лазерная запись с применением ультракоротких лазерных импульсов зарекомендовала себя как гибкий и эффективный инструмент интеграции объемных элементов фотоники [1,2], микро- [3,4] и нанопористых [5] в различных оптических материалах. Типичными представителями таких элементов являются оптические волноводы [6], нанорешетки [7] и микроканалы [8]. Тенденция современных исследований направлена в сторону интеграции функциональных оптофлюидных элементов на единой стеклянной матрице. Такие интегральные системы востребованы для создания лабораторий на чипе [9], электрофлюидных систем [10], микромеханических систем [11] и умных смартфонов [12]. Миниатюризация устройств приводит к сокращению объемов требуемых реагентов/аналитов и повышает чувствительность [13].

Обычно прямую лазерную запись проводят в сплошных оптических средах: плавленый кварц [8], алмазы [14] или полимеры [15]. Исследования, проводимые группой T.T. Fernandez et al. [16], показали, что выбор композиции стекла для записи каналных волноводов сильно влияет на свойства волновода — оптические потери, аспектное соотношение и контраст показателя преломления. Мы рассматриваем альтернативную базу для интеграции оптофлюидных элементов — нанопористую силикатную матрицу (НПСМ) [17]. Эти матрицы оптически прозрачны и обладают высокой стойкостью к физическим и химическим воздействиям, а нанопористая структура

позволяет в широком диапазоне задавать свойства формируемых элементов.

В статье показана возможность прямой лазерной записи фемтосекундными лазерными импульсами трех типов функциональных элементов — изолированных нанопористых ячеек, каналных оптических волноводов и микроканалов в НПСМ. Установлены основные геометрические характеристики элементов в зависимости от параметров лазерного воздействия. Предложены методики тестирования записанных элементов.

Экспериментальная часть

В качестве материала для лазерной записи использовались плоскопараллельные пластины НПСМ с размером $15 \times 20 \times 1$ mm (рис. 1, *a*), средним размером пор 17 nm, пористостью $\sim 50\%$ и составом (по массе) $91.4\text{SiO}_2 - 7.4\text{B}_2\text{O}_3 - 1.2\text{Na}_2\text{O}$ [18]. Пластины НПСМ обладают высоким пропусканием в диапазоне 600–1100 nm (рис. 1, *b*).

Лазерная запись в пластинах НПСМ осуществлялась на экспериментальной установке по трехмерной обработке материалов, которая схематически изображена на рис. 2 и состоит из: волоконного иттербиевого фемтосекундного лазера (1) (Antaus-20W-20u/1M, Avesta Ltd.) с длиной волны $\lambda = 1030$ nm, длительностью импульсов $\tau = 220$ fs и максимальной частотой следования импульсов $\nu = 1$ MHz, перископа (2) (Avesta PVH-DP); зеркала (3) с диэлектрическим покрытием

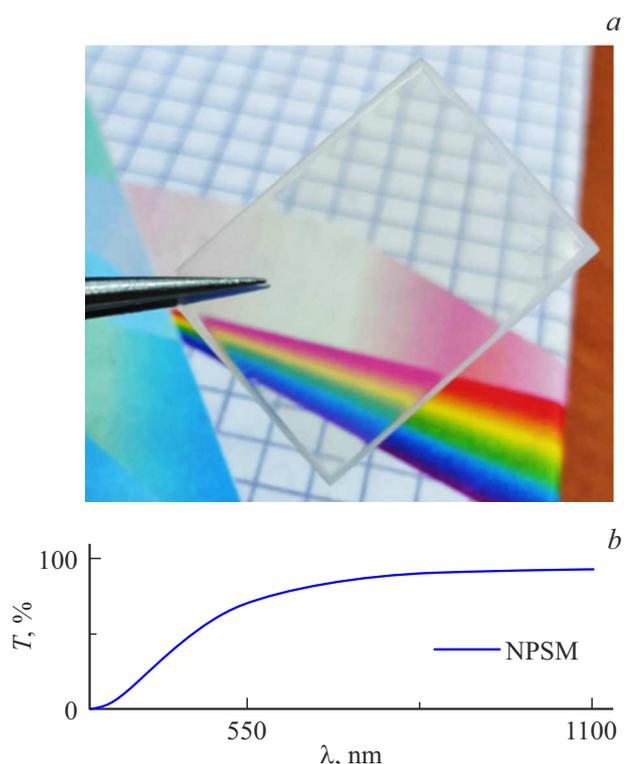


Рис. 1. (а) Фотография НПСМ; (б) спектр пропускания в диапазоне 300–1100 нм.

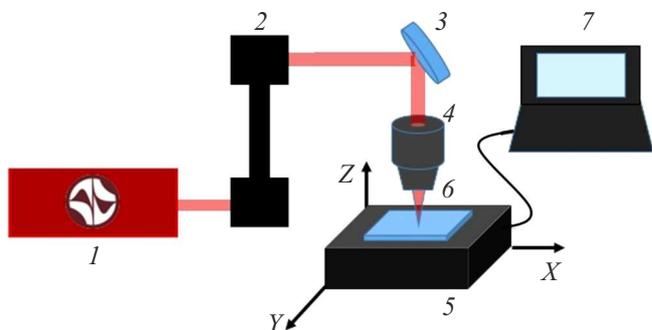


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для прямой лазерной записи: фемтосекундный лазер (1), перископ (2), диэлектрические зеркала (3), объектив (4), трехкоординатная система (5), образец (6), ПК (7).

($R > 99\%$), фокусирующей оптике (4), трехкоординатной системы (5) (Thorlabs), обеспечивающей скорость перемещения образца (6) в поле XYZ от 0.1 до 50.0 mm/s с минимальным шагом смещения $0.5 \mu\text{m}$, и ПК (7). Выбор оптики (4) для фокусировки лазерного излучения зависит от поставленной задачи. Для записи волноводов и микроканалов фокусировка излучения осуществлялась с помощью объектива (ЛОМО, 60x, NA = 0.85). Плосковыпуклая линза (Thorlabs LA4102, $f' = 200 \text{ mm}$) использовалась при записи барьеров.

Схема работает следующим образом: излучение лазера (1), прошедшее через систему зеркал (2, 3), фокуси-

руется линзой или объективом (4) в объем пластины НПСМ (5). Пластина НПСМ закрепляется на трехкоординатной системе (6) для позиционирования образца относительно сфокусированного лазерного пучка. Одновременно с включением лазера (1) запускается перемещение координатной системы (6) для перемещения образца согласно траектории, заданной через ПК с помощью программы для управления лазерным источником и координатной системой „Laserbench v2.0“ [19]. Запись производилась на глубине $400 \mu\text{m}$ от поверхности пластины НПСМ при постоянной $\nu = 200 \text{ kHz}$.

Если запись канальных волноводов и барьеров происходила за 1 этап прямолинейного сканирования по координате X на всю длину пластины НПСМ, то создание микроканала осуществлялось за несколько этапов, что представлено схематично на рис. 3, а: (i) прямая лазерная запись треков в режиме разуплотнения НПСМ [20] и (ii) последующая очистка записанных треков от продуктов разрушения в дистиллированной воде под действием ультразвука (ультразвуковая ванна, Сапфир) при температуре 31°C . Дополнительно проводилась термическая обработка (700°C , 1 h) микроканалов для демонстрации возможности сглаживания внутреннего рельефа каналов.

Оценка проницаемости барьеров производилась при погружении образца НПСМ с барьерами в водный раствор органического красителя тионина с массовой долей 0.009% (рис. 3, б). Методика заключается в фиксации пластины НПСМ с записанными барьерами над емкостью с органическим красителем. При погружении части пластины в краситель, не задевая записанные барьеры, происходит заполнение нанопористого каркаса раствором. Барьер физически разделяет пластину НПСМ на сектор, в нашем случае с площадью $\sim 5 \text{ mm}^2$, и сдерживает распространение молекул красителя. Последующее рассмотрение пластины НПСМ под микроскопом позволяет зафиксировать непроницаемость барьера по отношению к молекулам красителя. Такой метод исследования позволяет обнаружить распространившиеся

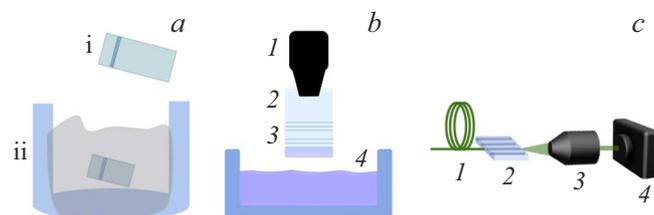


Рис. 3. Схематическое изображение этапов тестирования созданных оптофлюидных элементов: (а) два этапа формирования микроканалов: (i) — запись треков в режиме разуплотнения НПСМ материала и (ii) — очистка треков разуплотнения в воде от продуктов разрушения; (б) исследование проницаемости барьеров: 1 — держатель, 2 — НПСМ, 3 — барьеры в НПСМ, 4 — раствор красителя; (с) ввод излучения в волноводы: 1 — оптоволокно, 2 — НПСМ с канальными волноводами, 3 — объектив (40x, NA 0.65), 4 — КМОП камера Gentec 3M.

за пределы барьера молекулы красителя без анализа спектра вещества.

Тестирование волноводов производилось на установке, схема которой представлена на рис. 3, *c*, и была использована нами ранее для исследования волноводов в пористом стекле [17]. Состав схемы: оптическое волокно (Thorlabs, FS-SN-3224) с диаметром модового поля $4\ \mu\text{m}$ (1), пластины НПСМ с записанными в объеме волноводами (2), объектива (40X, 0.65 NA) (3) и КМОП камеры (Gentec 3M) (4). Ввод излучения ($\lambda = 532\ \text{nm}$) в каналный волновод осуществляется с помощью волокна (1), малое сечение которого и возможность подведения близко к образцу, позволяют осуществить ввод излучения с минимальными потерями. Ближнепольное распределение интенсивности регистрируется с помощью КМОП камеры (3) с объективом (4).

Микрофотографии записанных элементов были выполнены с помощью микроскопа Axio Imager A1m (Carl Zeiss). Спектр пропускания НПСМ был получен с помощью спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО). Обработка торцов пластин НПСМ после лазерной записи производилась на шлифовально-полировальной установке (Buehler MetaServ 250).

Результаты и обсуждение

Запись барьеров

Треки с уплотненной структурой и вытянутой формой в сечении были сформированы под действием фемтосекундных лазерных импульсов с постоянной частотой 200 kHz и при разных значениях мощности излучения (1000–1750 mW) и скоростях сканирования (0.5–20 mm/s). Ожидалось получить область с уплотнением на всю толщину пластины НПСМ (рис. 4, *a*). Рассчитанная длина Рэлея составила 5.8 mm. Однако фокусировка и дефокусировка излучения в процессе модификации обрабатываемого материала значительно уменьшает размер формируемой области модификации в диэлектрике [21] (рис. 4, *b*). В результате записи были получены барьеры с максимальной высотой $\sim 750\ \mu\text{m}$. Все созданные барьеры выглядят идентично: вытянутая область модификации, которая расширяется в центральной части и сужается в верхней и нижней частях. Для различных значений мощности была составлена зависимость длины и ширины барьеров в поперечном сечении (рис. 4, *c*). С увеличением мощности лазерного излучения высота барьеров увеличивается с 500 до $800\ \mu\text{m}$, но при этом их ширина остается в пределах от 8 до $10\ \mu\text{m}$.

Проницаемость барьера оценивалась в результате пропитки НПСМ раствором красителя тионина (рис. 5, *a, c*). При размещении НПСМ в растворе матрица начинает захватывать молекулы красителя в результате диффузионных процессов и через некоторое время молекулы заполняют поровое пространство красителем. В результа-

те формирования барьера в НПСМ удалось остановить распространение молекул красителя (рис. 5, *b*).

На данном этапе записанные барьеры не являются абсолютно непроницаемыми, так как обнаружено, что при пропитывании образца раствором красителя вода распространилась за пределы барьера, так как ее молекулы имеют размер меньше, чем размер пор в области барьера.

Запись каналных волноводов

В результате фемтосекундной лазерной записи ($\nu = 200\ \text{kHz}$, $P = 17\text{--}170\ \text{mW}$, $v = 15\ \text{mm/s}$) в объеме пластины НПСМ были созданы каналные оптические волноводы. На рис. 6, *a* представлен внешний вид сечения стандартных волноводов, образованных в результате увеличения показателя преломления модифицированной области материала. При исследовании поперечного и продольного сечения сформированных элементов под микроскопом была выявлена зависимость ширины (w) и высоты (h) их сечения от мощности лазерного излучения (P) (рис. 6, *b*). Было замечено, что по мере увеличения мощности излучения формировались асимметричные волноводы с аспектным соотношением до 9.0.

Далее с использованием экспериментальной схемы, представленной на рис. 3, *c*, проводилось исследование распространения в волноводах лазерного излучения с длиной волны 532 nm, 20 mW. Фотография процесса ввода излучения в каналный волновод в пластине НПСМ представлена на рис. 7, *a*. В результате было зарегистрировано ближнепольное распределение интенсивности на выходе из волновода (рис. 7, *b*). Замечено, что при расстоянии между волноводами 5–10 μm происходит перекачка излучения в соседний волновод (рис. 7, *b*). С одной стороны, это связано с низким контрастом показателя преломления волновода, что проявляется в оптических потерях. С другой стороны, эффект перекачки когерентного излучения между оптическими волноводами является востребованным для изучения квантового перехода в так называемых фотонных решетках [22]. Нанопористый силикатный каркас между такими каналными волноводами может быть привлекательным с точки зрения его заполнения веществами, обладающими нелинейным оптическим откликом или люминесцентными свойствами. Это требует дальнейшего исследования.

Запись микроканалов

Создание микроканала внутри пластины НПСМ происходит в 2 этапа. На первом этапе происходит лазерная запись треков в режиме разуплотнения НПСМ. В сечении формируемого трека образуются частицы разрушенного материала. На втором этапе происходит очистка треков разуплотнения от этих частиц. Основной задачей является сохранение нанопористой структуры вокруг канала и проведение очистки канала без химического травления. В сплошных стеклах этап очистки таких треков осуществляется в сильных кислотах или щелочах, что изменяет геометрию микроканала [23] и/или появляются

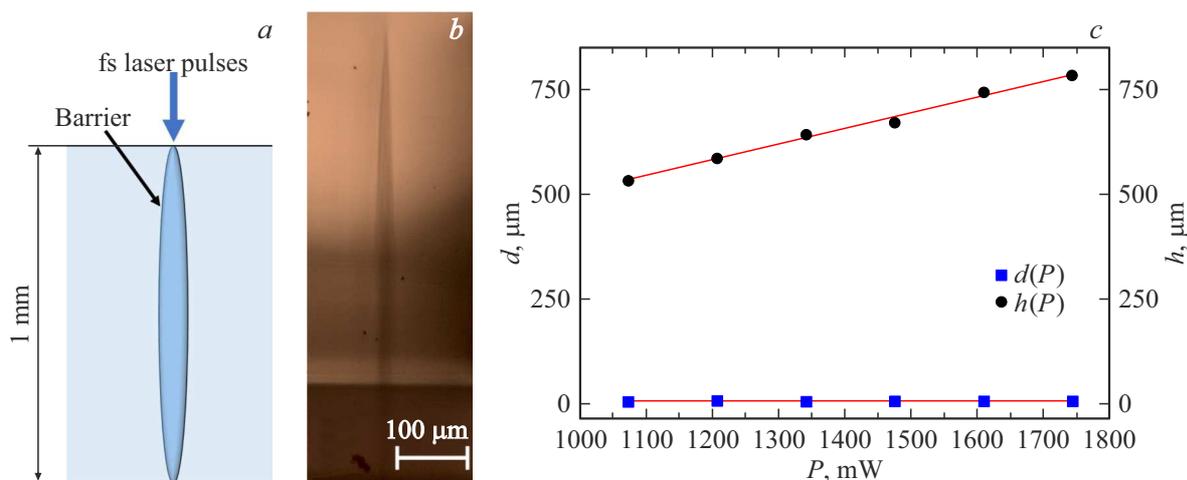


Рис. 4. (а) Схематическое изображение барьера в пластине НПСМ; (б) микрофотография барьера, записанного при мощности 1540 mW и скорости сканирования 1 mm/s; (с) зависимость высоты барьера (h) и (d) ширины в поперечном сечении от мощности излучения.

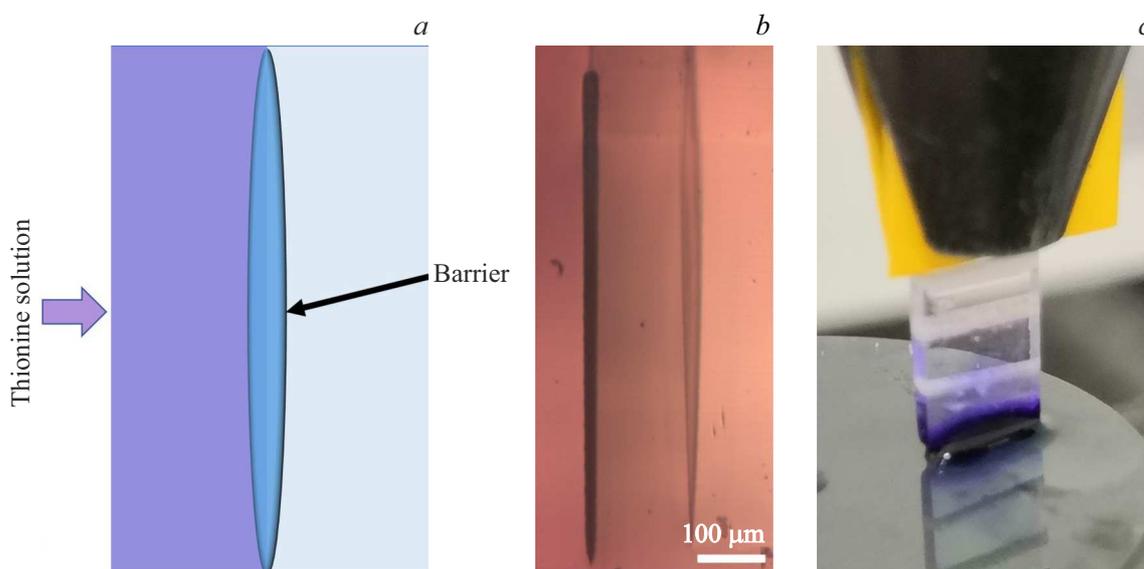


Рис. 5. (а) Схематическое изображение функционирования барьера для сдерживания молекул красителя; (б) микрофотография сечения пластины НПСМ после пропитки раствором тионина (молекулы красителя распространяются слева направо); (с) фотография процесса пропитки пластины НПСМ с барьером.

ограничения по его длине [8]. Запись треков разуплотнения проводилась при постоянной частоте следования импульсов 200 kHz, скорости сканирования 20 mm/s, но различной мощностью излучения от 170 до 640 mW. Один из критериев выбора режима для лазерной записи — формирование непрерывного и однородного ($\pm 0.5 \mu\text{m}$) трека разуплотнения по всей траектории записи. Фрагмент таких треков представлен на рис. 8, а. Однородное свечение сформированной структуры при исследовании в скрещенных поляризаторе и анализаторе свидетельствует о наличии дефектов на периферии трека (рис. 8, б). Предполагается, что именно эта светящаяся область будет очищена в воде под действием ультразву-

ка. Предварительно перед помещением образца в воду пластина НПСМ шлифовалась с торцов для вскрытия этих треков (рис. 8, с) и обеспечения доступа дистиллированной воды в процессе очистки канала. Также проведено исследование изменения геометрии треков от мощности лазерного излучения. Полученные результаты свидетельствуют, что геометрию трека (высоту (h) и ширину (d)) можно варьировать в широких пределах — от 4 до 20 μm и от 4 μm до 14 μm соответственно (рис. 8, д).

Затем пластина НПСМ с треками разуплотнения помещалась в ультразвуковую ванну, наполненную дистиллированной водой. Наблюдение за микроканалами с

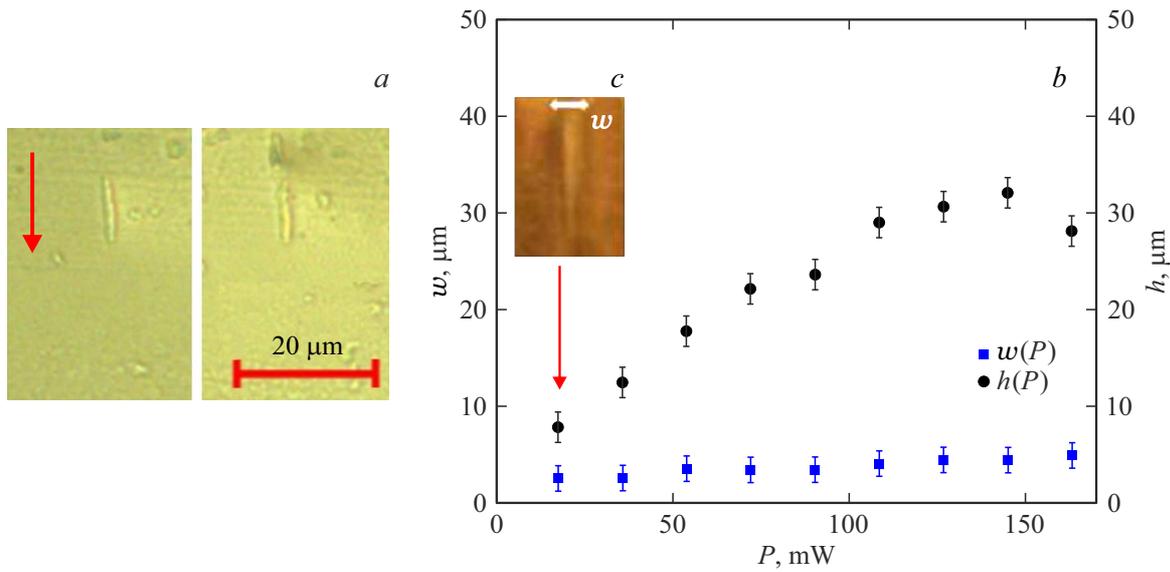


Рис. 6. (a) Микрофотографии асимметричных волноводов (вид с торца, стрелкой указано направление лазерного пучка в процессе записи); (b) зависимость ширины поперечного сечения волновода от мощности лазерного излучения; (c) сечение волновода при мощности лазерного излучения 17–50 mW.

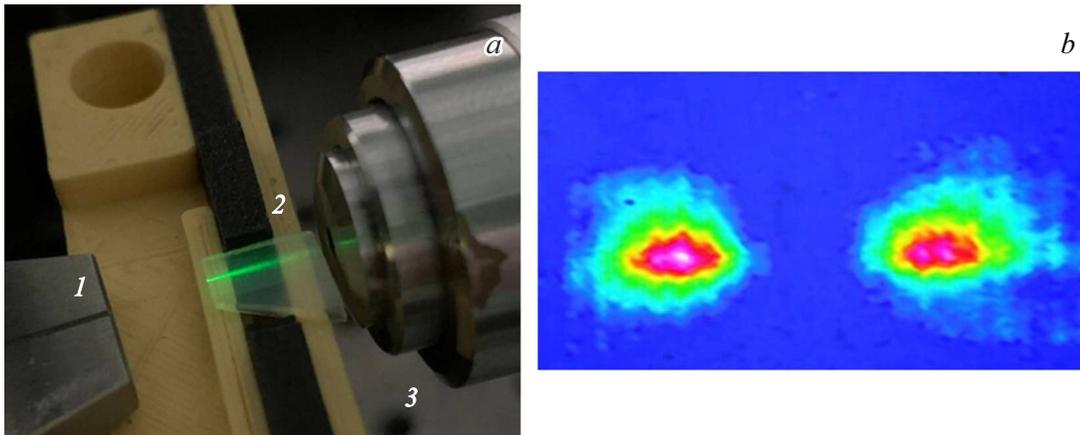


Рис. 7. (a) Фотография процесса ввода излучения в волновод: 1 — волокно, 2 — НПМС с массивом канальных волноводов с периодом размещения $10\mu\text{m}$ и 3 — объектив; (b) ближнепольное распределение интенсивности на выходе из волновода.

помощью микроскопа проводилось каждые 15 min действия ультразвука. Спустя 15 min произошло заметное просветление канала по всей его длине (рис. 9, a). Затем действие ультразвука проводилось на протяжении дополнительных 120 min. Можно отметить, что сильных изменений в сечении канала не происходило после 60 min (рис. 9, b). По фотографии видно, что в треке появились области просветления, которые, вероятно, заполнены водой, так как после сушки образца (100°C) появилось заметное рассеяние от канала при наблюдении в оптический микроскоп (рис. 9, c). По микрофотографиям видно, что на периферии канала остались неочищенные области в виде, скорее всего, микропор согласно нашим предварительным исследованиям в [24]. Более детальное рассмотрение возможно

с помощью электронной микроскопии. Тем не менее для исключения консолидации продуктов разрушения следует применять меньшую частоту следования импульсов [25].

Затем была проведена термическая обработка НПМС с микроканалами в печи при температуре выше температуры стеклования (700°C в течение 1 h). Микрофотографии свидетельствуют о существенной — в 0.65 раза — усадке микроканалов (рис. 9, d). Однако можно отметить, что треки, сформированные при мощности 200–250 mW, обладали большим свободным пространством, что привело к уширению канала в результате термической обработки до $16\mu\text{m}$, в то время как каналы с меньшим свободным пространством практически сомкнулись и оставили лишь центральную часть. Кроме

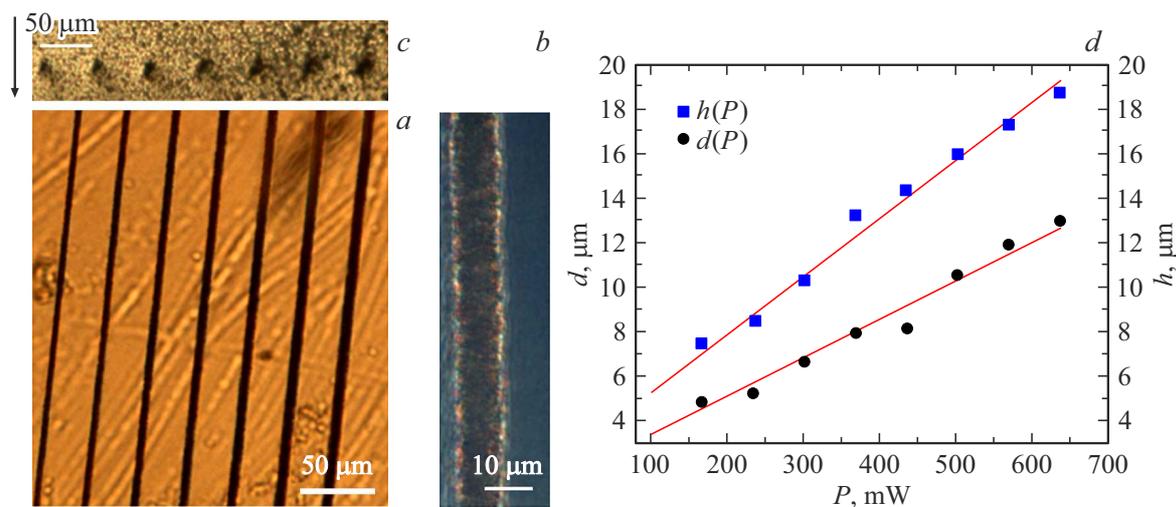


Рис. 8. (а) Микрофотография треков разуплотнения материала после лазерной записи (с) вид с торца после шлифовки, стрелкой указано направление лазерного пучка в процессе записи и (b) микрофотография трека разуплотнения под скрещенными поляризаторами; (d) график зависимости диаметра и высоты поперечного сечения микроканала от мощности лазера.

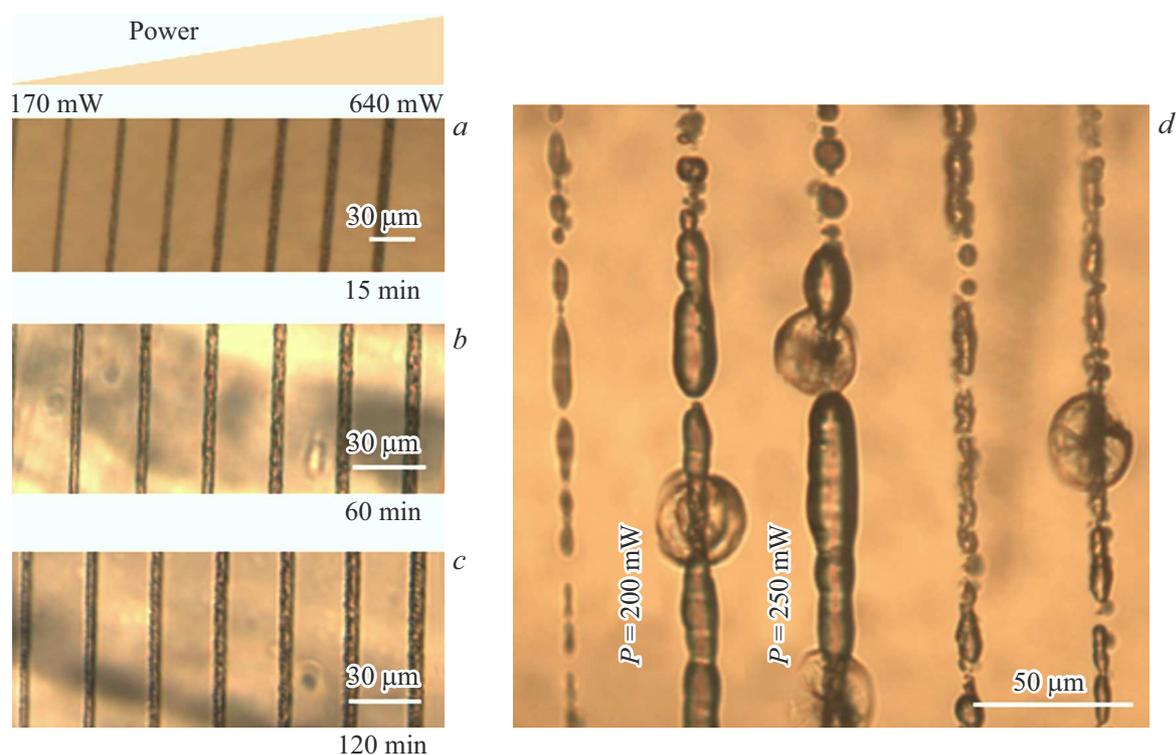


Рис. 9. Микрофотография микроканалов после очистки в дистиллированной воде под действием ультразвука спустя 15 (a), 60 (b) и 120 min (c), (d) после термической обработки образца.

того, термическая обработка привела к значительному сглаживанию внутренней поверхности канала. Следует более детально исследовать температурный режим обработки каналов и определить температуру, при которой происходит сглаживание канала без его смыкания. Гладкие каналы обеспечивают ламинарный поток, что востребовано для задач микрофлюидики [26].

Основываясь на опубликованных данных [27], можно предположить, что более длинные микроканалы будет сложнее очистить, так как область разрушения может блокировать поток воды. Есть несколько путей решения этих препятствий — расширение канала, запись дополнительных каналов с выводом на поверхность стекла или многопроходная запись.

Заключение

В работе продемонстрирована прямая лазерная запись с длиной волны 1030 nm, постоянной длительностью импульса 220 fs и частотой следования импульсов 200 kHz трех типов оптофлюидных элементов внутри пластины НПСМ. Исследуемыми элементами являются барьеры, каналные оптические волноводы и микроканалы. Внешнее различие записанных элементов отражено на микрофотографиях, а также графиках зависимости их размеров в поперечном сечении от мощности лазерного излучения, где кривые имеют линейный вид.

В частности, с увеличением мощности лазерного излучения увеличивается высота барьера с 500 до 800 μm , но при этом его ширина остается постоянной (8–10 μm). Тестирование барьеров подтвердило сдерживание молекул красителя тионина в области, ограниченной барьером. Показано, что барьер способен останавливать распространение молекул красителя вглубь пластины НПСМ. Однако мы заметили избирательную проницаемость барьера в зависимости от размера молекул. Например, молекулы воды смогли проникнуть сквозь барьер.

Острая фокусировка лазерного излучения привела к записи каналных волноводов первого типа. Контролируя мощность лазерного излучения удалось изменить aspectное соотношение сечения волновода с 5.0 до 9.0. Ввод излучения (532 nm, 20 mW) осуществлялся с использованием одномодового волокна. Ближнепольное распределение регистрировалось с помощью объектива и КМОП камеры. Отмечено, что при расположении волноводов на расстоянии друг от друга 5–10 μm происходит перекачка излучения из одного канала в другой.

Описана и продемонстрирована методика формирования микроканалов в пластине НПСМ, состоящая из двух этапов. На первом этапе происходит лазерная запись треков разуплотнения нанопористого каркаса, состоящих из продуктов разрушения материала. На втором этапе очистка треков в дистиллированной воде под действием ультразвука. Показано, что 15 min достаточно для очистки продуктов разрушения на протяжении всего канала. Однако на периферии канала все еще остаются продукты разрушения. Дополнительный этап термической обработки подтвердил, что треки разуплотнения, записанные при мощности лазерного излучения 200–250 mW, содержали меньшее количество продуктов разрушения после этапа очистки. В дальнейшем целесообразно исключить консолидацию продуктов разрушения за счет снижения частоты следования импульсов.

Полученные результаты являются перспективными в области интеграции оптических, жидкостных и сепарирующих элементов на единой силикатной оптически-прозрачной матрице. Каждый представленный элемент имеет дополнительное преимущество благодаря окружающей нанопористой среде, которая может быть пропитана органическими молекулами [28], фоточувствительными [29] и редкоземельными [30] компонентами,

квантовыми точками [31] и др. для придания уникальных оптических свойств каждому элементу.

Финансирование работы

Прямая лазерная запись и исследование интегральных элементов выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103). В.А. Якимук выражает признательность за поддержку исследований каналных волноводов в рамках финансовой поддержки гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Tan, B. Zhang, J. Qiu. *Laser & Photonics Reviews*, **15** (9), 2000455 (2021). DOI: 10.1002/lpor.202000455
- [2] B. Zhang, L. Li, B. Wu, H. Liu, P. Wu, L. Wang, F. Chen. *J. Lightwave Technology*, **39** (5), 1438–1443 (2021). DOI: 10.1109/JLT.2020.3038438
- [3] G.L. Roth, S. Kefer, S. Hessler, C. Esen, R. Hellmann. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **16** (1), (2021). DOI: 10.2961/jlmn.2021.01.2009
- [4] Y. Cheng. *Micromachines*, **8** (2), 59 (2017). DOI: 10.3390/mi8020059
- [5] F. Sima, K. Sugioka. *Nanophotonics* (2021). DOI: 10.1515/nanoph-2021-0159
- [6] M. Macias-Montero, F. Muñoz, B. Sotillo, J. del Hoyo, R. Ariza, P. Fernandez, J. Siegel, J. Solis. *Sci. Rep.*, **11** (1), 1–12 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-87765-z
- [7] S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, A.E. Rupasov, M.P. Smayev, A.N. Kirichenko, N.A. Smirnov, A.A. Ionin, A.S. Zolot'ko, R.A. Zakoldaev. *Appl. Surface Sci.*, **568**, 150877 (2021). DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.150877
- [8] Z. Liu, J. Xu, Z. Lin, J. Qi, X. Li, A. Zhang, J. Lin, J. Chen, Z. Fang, Y. Song, W. Chu, Y. Cheng. *Optics & Laser Technology*, **141**, 107118 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107118
- [9] A. Schaap, T. Rohrlack, Y. Bellouard. *Lab on a Chip*, **12** (8), 1527–1532 (2012). DOI: 10.1039/c2lc21091f
- [10] J. Xu, K. Midorikawa, K. Sugioka. *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing*, **XXI** (9735), 97350B (2016). DOI: 10.1117/12.2208842
- [11] V. Stankevič, G. Račiukaitis. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **9** (3), 1–5 (2014). DOI: 10.1364/OE.431306
- [12] J. Lapointe, M. Gagné, M.-J. Li, R. Kashyap. *Optics Express*, **22** (13), 15473–15483 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.015473
- [13] L. Syedmoradi, M. Daneshpour, M. Alvandipour, F.A. Gomez, H. Hajghassem, K. Omidfar. *Biosensors and Bioelectronics*, **87**, 373–387 (2017). DOI: 10.1016/j.bios.2016.08.084
- [14] L. Capuano, R.M. Tiggelaar, J.W. Berenschot, J.G.E. Garniers, G.R.B.E. Römer. *Optics and Lasers in Engineering*, **133**, 106114 (2020). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106114
- [15] X.L. Guo, Y. Chen, H.L. Jiang, X.B. Qiu, D.L. Yu. *Sensors*, **18** (9), 3141 (2018). DOI: 10.3390/s18093141

- [16] T.T. Fernandez, S. Gross, K. Privat, B. Johnston, M. Withford. *Advanced Functional Materials*, 2103103 (2021). DOI: 10.1002/adfm.202103103
- [17] Z. Lijing, R.A. Zakoldaev, M.M. Sergeev, A.B. Petrov, V.P. Veiko, A.P. Alodjants. *Nanomaterials*, **11** (1), 123 (2021). DOI: 10.3390/nano11010123
- [18] O.V. Andreeva, I.E. Obyknovennaya, E.R. Gavrilyuk, A.A. Paramonov, A.P. Kushnarenko. *J. Optical Technology*, **72** (12), 916–922 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000916
- [19] В.С. Рымкевич, Р.А. Заколдаев, М.М. Сергеев, В.В. Коваль. Программа для управления лазерными установками и координатным столом „Laserbench v2.0“. Свидетельство № 2017612835 (2017).
- [20] H. Ma, R.A. Zakoldaev, A. Rudenko, M.M. Sergeev, V.P. Veiko, T.E. Itina. *Optics Express*, **25** (26), 33261–33270 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.033261
- [21] K. Liao, W. Wang, X. Mei, B. Liu. *Optics & Laser Technology*, **142**, 107201 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107201
- [22] N.N. Skryabin, S.A. Zhuravitskii, I.V. Dyakonov, M.Y. Saygin, S.S. Straupe, S.P. Kulik. In: *AIP Conference Proceedings* (AIP Publishing LLC, 2020), v. 2241, N 1, p. 020033. DOI: doi.org/10.1063/5.0011377
- [23] Z. Wang, H. Zheng, W. Zhou. *Laser and Particle Beams*, **27** (3), 521–528 (2009). DOI: 10.1017/S0263034609990255
- [24] T.E. Itina, R.A. Zakoldaev, M.M. Sergeev, H. Ma, S.I. Kudryashov, O.S. Medvedev, V.P. Veiko. *Optical Materials Express*, **9** (11), 4379–4389 (2019). DOI: 10.1364/OME.9.004379
- [25] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H.Y. Zheng, H. Qiu, D. Low. *Thin Solid Films*, **477** (1–2), 216–221 (2005). DOI: 10.1016/j.tsf.2004.08.136
- [26] B.G. Belenkii, N.I. Komyak, V.E. Kurochkin, A.A. Evstrapov, V.L. Sukhanov. *Sci. Instrument.*, **10** (3), 3–16 (2000).
- [27] Y. Liao, Y. Ju, L. Zhang, F. He, Q. Zhang, Y. Shen, D. Chen, Y. Cheng, Z. Xu, K. Sugioka, K. Midorikawa. *Opt. Lett.*, **35** (19), 3225–3227 (2010). DOI: 10.1364/OL.35.003225
- [28] K. Ito, N. Kawamura, Y. Suzuki, Y.Y. Maruo. *Microchemical J.*, **159**, 105428 (2020). DOI: 10.1016/j.microc.2020.105428
- [29] M.A. Girsova, L.N. Kurilenko, I.N. Anfimova, M.Y. Arsent'ev, L.F. Dikaya, E.A. Semenova. *Russian Chemical Bulletin*, **69** (5), 920–925 (2020). DOI: 10.1016/j.microc.2020.105428
- [30] L.D. Iskhakova, V.M. Mashinsky, F.O. Milovich, V.V. Velmiskin, E.A. Plastinin, S.V. Firstov, M.V. Lukashova, P.A. Somov, E.M. Dianov. *J. Non-Crystalline Solids*, **503**, 28–35 (2019). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.09.022
- [31] A.P. Litvin, A.A. Babaev, P.S. Parfenov, E.V. Ushakova, M.A. Baranov, O.V. Andreeva, K. Berwick, A.V. Fedorov, A.V. Baranov. *J. Phys. Chem. C*, **121** (15), 8645–8652 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b01952