Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 10, с. 677 – 684

Двухфотонная лазерная печать структур интегральной фотоники на подложках из MgF_2

А. И. Майдыковский[1)], И. О. Батуев, К. А. Смирнов, И. И. Циняйкин, В. Б. Новиков, Т. В. Мурзина

Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 27 ноября 2025 г.
После переработки 1 апреля 2026 г.
Принята к публикации 8 апреля 2026 г.

Метод прямой двухфотонной лазерной печати (ДФЛП) в последние годы активно развивается благодаря своим уникальным возможностям для разработки, создания и апробации элементов интегральной фотоники. Ключевую роль в минимизации оптических потерь в планарных фотонных схемах играет материал подложки: для эффективного удержания моды необходимо обеспечить высокий контраст показателей преломления между материалом подложки и фотополимером, из которого сформированы направляющие структуры. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования волноводных структур, изготовленных методом ДФЛП на подложках из фторида магния (MgF_2), и продемонстрирована эффективность их применения.

DOI: 10.7868/S3034576626050118

1. Введение. Двухфотонная лазерная печать (ДФЛП) является одним из активно развивающихся прецизионных методов изготовления микроструктур с широким диапазоном функциональных свойств [1]. Пространственное разрешение ДФЛП составляет сотни нанометров [2, 3], а при STED (Stimulated Emission Depletion) – литографии достигает нескольких десятков нанометров [4], при этом не требуется использование литографических шаблонов. К достоинствам метода следует также отнести возможности (i) печати трехмерных структур [5, 6], (ii) создания кросс-платформенных соединений, в том числе сопряжение с оптическим волокном [7, 8], (iii) функционализации фотонных структур за счет введения в состав фотополимера различных наполнителей: красителей [9], квантовых точек [10, 11], магнитных наночастиц [12] и проч.

Ключевым требованием к платформам интегральной фотоники является минимизация оптических потерь в фотонных схемах. Поэтому в настоящее время наиболее востребованы платформы с высоким контрастом показателей преломления активного материала (например, волновода) и подложки, Δn: кремний на изоляторе [13, 14] (SOI, $\Delta n \simeq 2.04$), алмаз на изоляторе [15, 16] (DOI, $\Delta n \simeq 0.95$), ниобат лития на изоляторе [17] (LNOI, $\Delta n \simeq 0.70$), нитрид кремния на изоляторе [18] (SiNOI, $\Delta n \simeq 0.56$). Столь высокое значение контраста Δn позволяет изготавливать компактные устройства с высокой локализацией электромагнитного поля в направляющих структурах и малыми радиусами изгибов. В то же время, световые потери в таких устройствах во многом определяются шероховатостью поверхности структур, рассеяние излучения на которой существенно возрастает с увеличением контраста показателя преломления согласно модели Пейна–Лейси [19], что накладывает высокие требования к качеству их поверхности. Для структур, изготовленных методом ДФЛП на диэлектрических подложках, сложно реализовать большое значение Δn, поскольку показатель преломления используемых полимеров лежит в диапазоне 1.39–1.61 [20], однако требования к уровню шероховатости оказываются значительно ниже по сравнению с платформами, характеризующимися высоким контрастом показателей преломления. Максимальный контраст в случае ДФЛП достигается при размещении волноведущих полимерных структур в воздухе, в этом случае они закрепляются на растяжках или промежуточных опорах над подложкой [21, 22], как было показано, например, в работе [23] для волноводов диаметром 10 мкм и длиной до 1.2 мм. При этом такой подход не позволяет изготавливать сложные оптические схемы, точно контролировать взаимное расположение элементов.

Ранее было предложено изготовление элементов фотонных интегральных схем (ФИС) внутри или на поверхности пористых матриц в качестве несущего каркаса [24, 25] с эффективным показателем преломления 1.1 и менее [26]. При этом наличие пор затруд-

1)e-mail: anton@shg.ru

няет проявку напечатанных структур, и, кроме того, требуются дополнительные операции по изготовлению пористых матриц.

В качестве подложек с относительно низким показателем преломления можно рассматривать фторполимеры, такие как фторированный этиленпропилен (FEP) с показателем преломления $n \simeq 1.34$, сополимер тетрафторэтилена и перфторвинилового эфира (PFA) $n \simeq 1.34$, поливинилиденфторид (PVDF) $n \simeq 1.42$. Они химически инертны, но имеют плохую адгезию к большинству веществ, что приведет к проблемам фиксации напечатанных структур на поверхности этих материалов. Авторам не удалось найти работ по изготовлению методом ДФЛП фотонных структур на поверхности фторполимеров, тем не менее такой подход можно рассматривать как интересное решение для создания оптических интегральных схем на гибком основании.

Перспективными для создания элементов ФИС методом ДФЛП представляются подложки из кристаллического фторида магния MgF_2, являющегося одноосным материалом с показателем преломления для обыкновенной волны 1.374 [27] на длине волны 1000 нм. Кристаллический фторид магния является прозрачным в широком спектральном диапазоне от 110 нм до 8.5 мкм, имеет порог лазерного повреждения 1.6 Дж/см^2 для фемтосекундного импульсного излучения с длиной волны 800 нм [28] и обеспечивает контраст $\Delta n \simeq 0.14$ при использовании полимера Ormocomp® с показателем преломления 1.51, согласованным со стандартной иммерсионной оптикой. Пластины из этого материала с поверхностью оптического качества коммерчески доступны.

Авторам удалось найти единственную работу [29], в которой была реализована успешная печать на подложках из фторида магния волноводов и кольцевых резонаторов из гибридного фоторезиста, и получены значения добротности резонаторов 6.6×10^4. Однако в ней исследования проводились в узком спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм и не было проведено анализа волноводного режима, не указаны способы увеличения адгезии напечатанных структур к подложке.

В настоящей работе продемонстрирована ДФЛП полосковых волноводов с адаптерами ввода/вывода излучения на подложках MgF_2. Экспериментально и методами численного моделирования показана принципиальная возможность реализации волноводного режима в случае использования подложек из фторида магния (в отличие от стеклянных) в спектральном диапазоне 700–1000 нм при одинаковых геометрических параметрах направляющих структур. Также реализована интеграция полимерных волноводов с органическими флуоресцентными микрокристаллами.

2. Методики эксперимента и расчетов. Волноводные структуры были изготовлены методом ДФЛП по технологии, детально изложенной в работах [9, 22]. В качестве источника накачки использовался титан-сапфировый лазер (TIF-DP, производства фирмы ООО “Авеста-Проект”) с центральной длиной волны излучения 780 нм и длительностью импульсов 50 фс; в области полимеризации длительность импульсов составляла 380 фс. Излучение основной гауссовой моды накачки выделялось с помощью пространственного фильтра, совмещенного с телескопом, направлялось через $4f$-систему на гальваносканер и затем фокусировалось в объеме фотополимера иммерсионным объективом Nikon Plan APO VC 60×/1.4NA OIL, расположенным на пьезотрансляторе.

Для ДФЛП использовался гибридный негативный фоторезист OrmoComp® (“Micro resist technology GmbH”) [30] с показателем преломления 1.515 в твердом состоянии на длине волны $\lambda = 700$ нм [31]. Полированные пластины монокристаллического фторида магния с кристаллографической ориентацией поверхности (001) толщиной 1 мм и показателем преломления 1.376–1.374 (для обыкновенной волны) в спектральном диапазоне $\lambda = 700-1000$ нм [27, 32], соответственно служили в качестве подложек. Использование именно кристаллического MgF_2 не является критическим фактором, так как показатели преломления аморфной и кристаллической фаз практически идентичны. Тем не менее для корректного задания параметров численного моделирования и чистоты эксперимента были выбраны пластины из монокристаллического MgF_2. Оптическая ось MgF_2 была направлена перпендикулярно поверхности подложки.

Подложки предварительно выдерживались в концентрированной серной кислоте в течение 5 мин для увеличения адгезии фотополимера, затем промывались в дистиллированной воде и изопропиловом спирте. Капля фоторезиста, выступающая также в качестве иммерсирующей среды, объемом 5 мкл помещалась на подложку из MgF_2 и прогревалась при температуре 90 °С в течение 5 мин.

Печать осуществлялась сфокусированным лазерным пучком с диаметром в перетяжке около 560 нм и мощностью 5 мВт в объеме фоторезиста; скорость движения перетяжки составляла 1250 мкм/с, плотность энергии в перетяжке не превышала 0.02 Дж/см^2, что существенно меньше предельных значений повреждения как для фторида магния [28], так и фоторезиста OrmoComp® [33]. После завершения процесса печати подложка с полимером и сформированными структурами вновь выдерживалась при температуре 90 °C в течение 10 мин и промывалась в проявителе Ormodev®.

Разработка дизайна модели для печати проводилась в программе Solidworks 2021 (Dassault Systems SolidWorks Corp.). На рисунке 1a, b приведены основные виды и 3D-модель изготовленных структур. Они состоят из волноводов с поперечными размерами 3×3 мкм^2 и длиной 20 мкм, и адаптеров ввода/вывода излучения, образованных полусферами с диаметром 18 мкм; плоское основание полусфер было ориентировано под углом 48° к плоскости подложки и выступало в качестве поверхности полного внутреннего отражения. Сечение волновода выбиралось исходя из условия поддержания им многомодового режима распространения света в изучаемом диапазоне для подложки из фторида магния с целью уменьшения оптических потерь на согласовании мод света при заведении излучения в волновод.

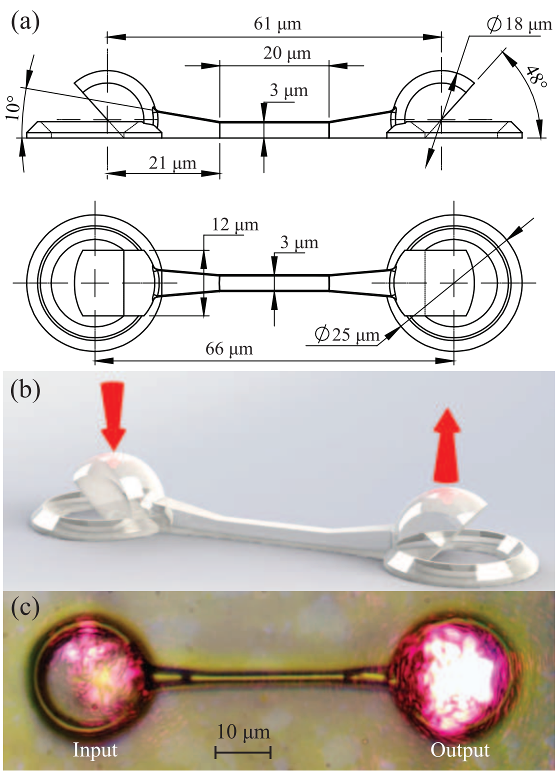

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Чертеж волновода с адаптерами ввода/вывода, вид сбоку и сверху, размеры указаны в микрометрах. (b) – 3D изображение модели волновода с адаптерами ввода/вывода. (c) – Изображение (вид сверху) в микроскопе при заведении излучения с $\lambda = 700$ нм сверху (от наблюдателя) в левый адаптер (input), наблюдается яркое пятно в правом адаптере (output), соответствующее излучению, прошедшему через волновод сечением 3×3 мкм^2 и длиной 20 мкм на подложке MgF_2 и высвеченное в сторону наблюдателя

Волновод квадратного сечения, лежащий на подложке, является асимметричным полосковым волноводом и характеризуется наличием длин волн отсечки волноводного и одномодового режимов. Нами была проведена оценка значений отсечки на основе теории диэлектрических асимметричных волноводов для структур на подложках из MgF_2 или стекла ВК7 [34]. Показатель преломления для последнего меняется в диапазоне 1.5131–1.5075 для излучения в диапазоне длин волн 700–1000 нм соответственно [35]. Так, одномодовый режим для рассматриваемого волновода на подложке MgF_2 поддерживается в спектральном диапазоне 1.4–6 мкм, для подложки из ВК7 – в диапазоне 200–600 нм, при больших длинах волн λ рассматриваемая полосковая структура перестает поддерживать волноводный режим и излучение "высвечивается" в подложку, при меньших λ реализуется многомодовое распространение света.

Полусферический элемент адаптера работает как собирающая линза: он фокусирует свет, отраженный от плоского основания, на входной торец волновода. Адаптеры такого вида позволяют заводить (и выводить) излучение в волновод в направлении нормали к подложке. Они были предложены ранее применительно к волноводам из полимера на слое диоксида кремния для последующего заведения излучения с помощью медленно расширяющегося перехода в сопряженный волновод, изготовленный из нитрида кремния [36]. Нами было добавлено кольцевое основание, которое повышает стабильность структуры на подложке. Преимущество такого типа адаптеров [22, 37] заведения по сравнению с торцевым вводом или решеточными адаптерами состоит в широком спектральном диапазоне их работы, компактности и возможности заводить излучение перпендикулярно подложке, в плоскости которой расположены элементы ФИС.

Спектры линейного пропускания были измерены при использовании импульсного излучения фемтосекундного параметрического осциллятора TOPOL-1050-C (производство фирмы ООО "Авеста-Проект") с диапазоном перестройки длины волны излучения в сигнальном канале 700–1000 нм и частотой следования импульсов 80 МГц. Линейная поляризация падающего лазерного излучения задавалась с помощью призмы Глана–Тейлора и ахроматической полуволновой пластинки нулевого порядка, расположенных перед фокусирующим объективом Plan Apo

50×/0.55NA. Структура располагалась в фокальной плоскости объектива, который использовался как для заведения, так и для сбора излучения, вышедшего из структуры.

Измерение спектров пропускания изготовленных волноводных структур проводилось при заведении зондирующего излучения в адаптер в направлении перпендикулярном подложке, и сборе прошедшего излучения на выходе из второго адаптера, рис. 1b. Изображение, полученное методом оптической микроскопии, приводится на рис. 1c, на котором видно отсутствие рассеяния в области волновода и слабое обратное рассеяние в области входного адаптера (input). Для пространственной селекции прошедшего излучения использовалась диафрагма, расположенная в фокальной плоскости тубусной линзы. Для каждой длины волны зондирующего излучения положение структуры подстраивалось на максимум детектируемой мощности с помощью трехкоординатного пьезотранслятора Ratis XYZ_H (производство ООО "Нано Скан Технология"), таким образом компенсировались хроматические аберрации объектива. Мощность излучения на входе адаптера не превышала 10 мВт.

Численное моделирование распространения оптического излучения в исследуемых структурах было проведено методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием программного пакета Ansys Lumerical 2020; шаг пространственной сетки составлял 25 нм, область моделирования была окружена идеально согласованным слоем для устранения нефизичных отражений. В моделировании учитывалась дисперсия показателей преломления MgF_2[27] и полимера Ormocomp® [31].

3. Полученные результаты и обсуждение. Были проведены численные расчеты распространения излучения для уединенного прямолинейного волновода без адаптеров ввода/вывода света на подложке из MgF_2 или стекла BK7 при заведении излучения в спектральном диапазоне 700–1000 нм в его торец. Источник излучения задавался гауссовым пучком с шириной перетяжки 2 мкм и линейной поляризацией для возбуждения TE или TM мод. Моделировалось распространение излучения в изолированном волноводе с сечением 3×3 мкм^2 и длиной 60 мкм.

Рисунок 2a демонстрирует распределение нормированной интенсивности излучения в центральном продольном срезе области моделирования с волноводом на подложке из фторида магния, цветовая шкала приведена в логарифмическом масштабе. Видно, что основные потери, связанные с рассеянием света,

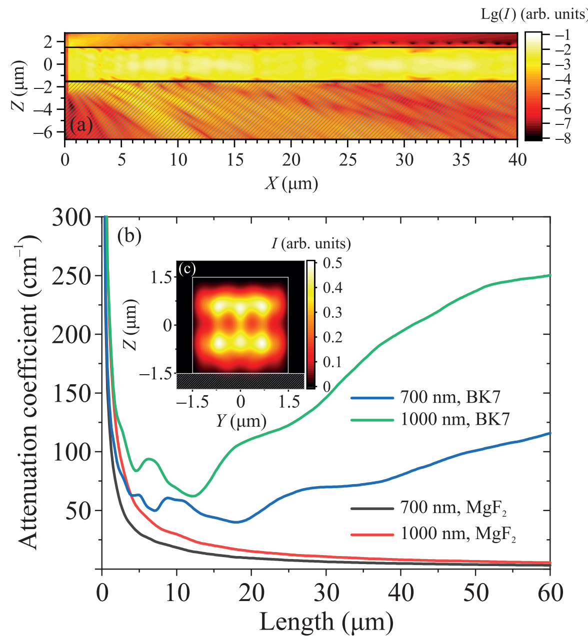

Рис. 2. (Цветной онлайн) Результаты численного моделирования: (a) – распределение интенсивности света в продольном сечении волновода (обозначен черным контуром) на подложке MgF_2 (обозначена заштрихованной областью) при $\lambda = 700$ нм, свет распространяется слева направо. (b) – Расчетная зависимость коэффициента ослабления от длины волновода для двух типов подложек, за начало отсчета принят входной торец волновода. (c) – Распределение интенсивности света в поперечном сечении волновода (обозначен белым контуром), расположенного на подложке MgF_2 при длине волны излучения $\lambda = 700$ нм на удалении 40 мкм от входного торца волновода

и соответствующие областям высокой интенсивности вне волновода, наблюдаются при прохождении излучением первых 10–20 мкм в волноводе, затем рассеяние сильно снижается. Это свидетельствует об установлении на начальном участке структуры волноводного режима распространения излучения. Большое число максимумов в распределении поля в поперечном сечении волновода на рис. 2c позволяет говорить о многомодовом режиме распространения света в данном спектральном диапазоне.

На основе данных численного моделирования были рассчитаны зависимости коэффициента ослабления излучения в волноводе от расстояния до входного торца на подложке из фторида магния или стекла BK7 (рис. 2b). Для установившегося волноводного режима в случае прямолинейного участка волновода этот коэффициент – константа. Приведенные графики показывают принципиально различный режим работы волноводов, так, рост коэффициента ослабления для подложки из стекла (синяя и зеленая кривые) при удалении от входного торца волновода показывает нарастание удельных потерь энергии и говорит о нарушении локализации света и переходе в режим излучения в подложку, что согласуется с расчетными значениями длины волны отсечки, которая составляет 600 нм для стеклянной подложки. Напротив, волновод на подложке из фторида магния демонстрирует стабильный волноводный режим: коэффициент ослабления в рассматриваемом спектральном диапазоне выходит на “плато”, что подтверждает эффективное удержание излучения в направляющей структуре. Для всех типов рассматриваемых структур оптические потери возрастают с увеличением длины волны. Существенной зависимости от поляризации излучения не наблюдалось, поэтому приведены данные для ориентации поляризации падающего излучения в плоскости подложки (E_y – поляризация), что соответствует возбуждению TE мод.

Результаты моделирования распространения E_x- и E_y-поляризованного излучения, прошедшего через рассматриваемую структуру адаптер + волновод + адаптер на подложке, MgF_2 представлены на рис. 3. Численный расчет спектров

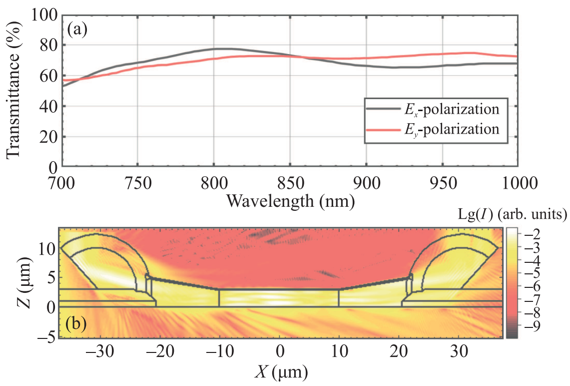

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Рассчитанные спектры пропускания волновода с адаптерами ввода/вывода на подложке MgF_2 для E_x – и E_y – поляризаций падающего света. (b) – Распределение интенсивности света в продольном сечении волновода для излучения с $\lambda = 700$ нм. В волноводе свет распространяется слева направо

пропускания проводился с шагом 3 нм по длине волны в диапазоне $\lambda = 700{-}1000$ нм. Источник излучения имитировал сходящийся гауссов пучок с числовой апертурой $NA = 0.2$, перетяжка которого располагалась над левым адаптером в точке с координатами $x = -34.5$ мкм, $z = 12.7$ мкм (рис. 3b), что соответствовало экспериментальным условиям.

Коэффициент пропускания вычислялся как отношение полной мощности излучения, прошедшего через устройство вывода, к мощности источника света для каждой длины волны. Видно, что среднее значение коэффициента пропускания в интервале $\lambda = 700{-}1000$ нм, доступном для экспериментального исследования, составляет более 50 % (см. рис. 3a).

Рассчитанные карты пространственного распределения нормированной интенсивности излучения в продольном вертикальном сечении структуры приведены на рис. 3b; цветовая шкала приведена в логарифмическом масштабе. Черным цветом показан контур сечения моделируемой структуры. Видно, что основными источниками потерь являются рассеяние в области адаптеров ввода и вывода излучения, а также “утекание” излучения из волновода в подложку в процессе установления стационарного волноводного режима. В численных расчетах шероховатость поверхности структур не учитывалась.

Экспериментальные спектры пропускания были измерены в изготовленных волноводных структурах при заведении зондирующего излучения в адаптер ввода в направлении нормали к подложке, прошедшее излучение выводилось через второй адаптер в обратном направлении и направлялось на КМОП-камеру или измеритель мощности. На рисунке 1c представлена микрофотография одной из изготовленных структур (вид сверху); зондирующее излучение заводилось в левый адаптер (input), собиралось на выходе из правого (output). Видно, что интенсивное излучение накачки наблюдается преимущественно в области выходного адаптера, тогда как в сужающейся и прямой части волновода свет распространяется без видимого рассеяния.

Усредненные спектры пропускания света через два адаптера, соединенные волноводом с прямым участком длиной 20 мкм, приведены на рис. 4. Полоса ошибки, указанная на графике, показывает среднеквадратичное отклонение измеренных значений для 3-х идентичных адаптеров в напечатанной серии, продемонстрировавших наиболее высокое пропускание. Пропускание имеет слабо выраженную зависимость от длины волны и поляризации зондирующего излучения и в среднем составляет 14 %. Снижение значения пропускания в 3.5 раза по сравнению с результатами численного моделирования объясняется нарушением эффекта полного внутреннего отражения на входном и выходном адаптерах. Это обусловлено отклонением геометрии изготовленных адаптеров от принятой в расчетах – в частности, отклонением поверхности полного внутреннего отражения от идеально гладкой плоскости, связанным с послойной полимеризацией фотополимера.

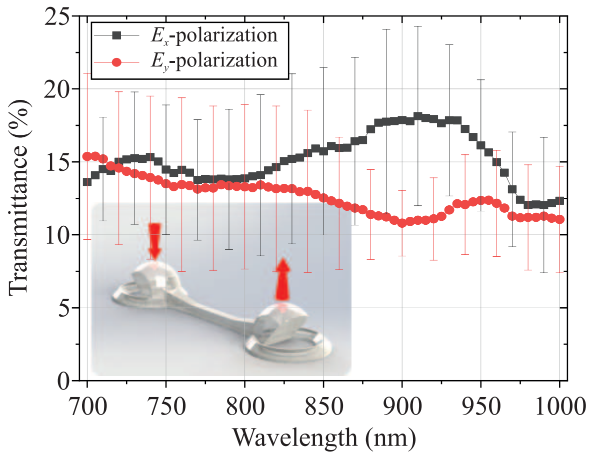

Рис. 4. (Цветной онлайн) Измеренные спектры пропускания структуры, показанной на рис. 4b, для E_x-поляризованного излучения (черные точки) и E_y-поляризованного (красные точки). Планками погрешности указано стандартное отклонение измеренных средних значений пропускания для трех адаптеров. На вставке представлена трехмерная модель волновода с адаптерами, стрелками обозначены направления заведения и выведения зондирующего излучения

Таким образом, измеренная эффективность волноводных структур, напечатанных на подложке из фторида магния, демонстрирует приемлемые значения, достаточные для использования таких структур для доставки оптического излучения с помощью волновода в плоскости подложки к структурам таких типов, как микрорезонаторы, адаптеры ввода/вывода, активные флуоресцирующие микроструктуры для исследования их оптических свойств и разработки элементов ФИС.

Волноводные структуры с микрокристаллами красителя были получены путем перенесения микрокристаллов, синтезированных методом сублимации на стеклянной подложке, в область вблизи торца волновода, напечатанного на подложке из MgF_2. Изображения двух из полученных составных структур – волновод с адаптером ввода/вывода (выделен синим) и микрокристалл (красным), полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа (СЭМ), приведены на рис. 5a, b. В первой структуре микрокристалл (с размерами примерно $1 \times 6 \times \times 17$ мкм^3) расположен непосредственно на волноводе, во второй (размеры кристалла $2 \times 5 \times 6$ мкм^3) – на подложке на расстоянии около 2 мкм от его торца.

На рисунке 5c показана оптическая микрофотография комбинированной структуры адаптер + волновод + кристалл красителя DCM. При заведении в адаптер излучения с длиной волны 405 нм и мощностью 3 мкВт наблюдается яркая флуоресценция (ФЛ) микрокристалла в желто-оранжевой области спектра, что показано на изображении, полученном с применением фильтра, отрезающего излучение накачки (рис. 5d). Важно, что при этом излучение ФЛ микрокристалла DCM достаточно эффективно выводится обратно через тот же волновод и адаптер в направлении, перпендикулярном подложке (рис. 5d). Таким образом, реализовано оптическое адресное возбуждение микроисточника ФЛ в плоскости подложки.

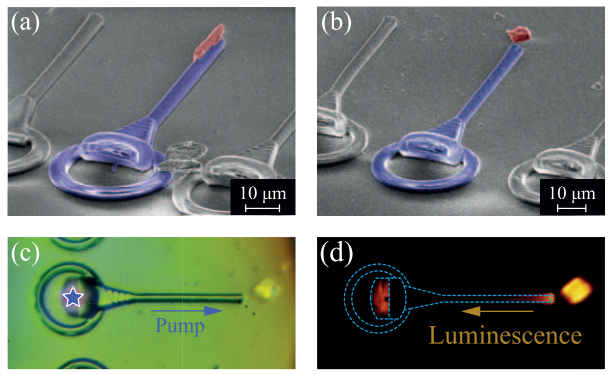

Рис. 5. (Цветной онлайн) (a), (b) – СЭМ изображения волноводов с кристаллами красителя вблизи торцов волноводов. (c) – Оптическая микрофотография полимерной структуры с микрокристаллом, звездочкой указана область заведения излучения с длиной волны 405 нм. (d) – Фотография вывода излучения ФЛ микрокристалла DCM обратно через волновод и адаптер

5. Заключение. Продемонстрирована эффективность применения подложек из фторида магния для создания элементов интегральной фотоники методом ДФЛП. За счет контраста показателей преломления ($\Delta n = 0.14$) достигнута высокая степень локализации поля в волноводах сечением 3×3 мкм^2. В отличие от структур на стекле BK7, использование MgF_2 позволило обеспечить полноценный волноводный режим, что подтверждается как численным моделированием, так и экспериментальными данными.

Методом численного моделирования показано пропускание не менее 50 % в элементах, состоящих из двух адаптеров, соединенных волноводом сечением 3×3 мкм^2, длиной 20 мкм, в ближнем ИК диапазоне на подложке из MgF_2. Экспериментально продемонстрирована эффективность в среднем на уровне 14 % в спектральном диапазоне 700–1000 нм.

Показана возможность локального сопряжения полимерных волноводных структур с микрокристаллами органических красителей; возбуждение ФЛ кристаллов происходит через волновод, а вывод сигнала ФЛ осуществляется через адаптер в направлении нормали к поверхности подложки, что представляет собой перспективное направление для создания локальных источников излучения с оптической накачкой в ФИС.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант # 24-42-02009. Эксперименты выполнены с использованием оборудования, предоставленного по программе развития Московского государственного университета, соглашение # 126 от 01/03/2022. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. A. Jaiswal, C.K. Rastogi, S. Rani, G.P. Singh, S. Saxena, and S. Shukla, "Two decades of two-photon lithography: Materials science perspective for additive manufacturing of 2d/3d nano-microstructures", Science **26**(4), 106374 (2023).
2. V. Harinarayana and Y. Shin, "Two-photon lithography for three- dimensional fabrication in micro/nanoscale regime: A comprehensive review", Opt. Laser Technol. **142**, 107180 (2021).
3. A. Jaiswal, C.K. Rastogi, S. Rani, G.P. Singh, S. Saxena, and S. Shukla, "Two decades of two-photon lithography: Materials science perspective for additive manufacturing of 2d/3d nano-microstructures", Science **26**(4), 106374 (2023).
4. A.G. Vitukhnovsky, D.A. Chubich, S.P. Eliseev, V.V. Sychev, D.A. Kolymagin, and A.S. Selyukov, "Advantages of sted-inspired 3d direct laser writing for fabrication of hybrid nanostructures", Russ. Laser Res. **38**(4), 375 (2017).
5. R.D. Zvagelsky, D.A. Chubich, D.A. Kolymagin, E.V. Korostylev, V.V. Kovalyuk, A.I. Prokhodtsov, A.V. Tarasov, G.N. Goltsman, and A.G. Vitukhnovsky, "Three-dimensional polymer wire bonds on a chip: morphology and functionality", J. Phys. D: Appl. Phys. **53**, 355102 (2020).
6. A. Pisarenko, R. Zvagelsky, D. Kolymagin, B. Katanchiev, A. Vitukhnovsky, and D. Chubich, "Dlw-printed optical fiber micro-connector kit for effective light coupling in optical prototyping", Optik **201**, 163350 (2020).
7. M. Trappen, M. Blaicher, P.-I. Dietrich, C. Dankwart, Y. Xu, T. Hoose, M. R. Billah, A. Abbasi, R. Baets, U. Troppenz, M. Theurer, K. Wörhoff, M. Seyfried, W. Freude, and C. Koos, "3d-printed optical probes for wafer-level testing of photonic integrated circuits", Opt. Express **28**, 37996 (2020).
8. S. Yu, Q. Du, C. Mendonca, L. Ranno, T. Gu, and J. Hu, "Two-photon lithography for integrated photonic packaging", Light: Advanced Manufacturing **4**, 1 (2023).
9. A. Maydykovskiy, E. Mamonov, N. Mitetelo, S. Soria, and T.V. Murzina, "Two-photon laser lithography of active microcavity structures", JETP Lett. **115**(5), 261 (2022).
10. Y. Peng, S. Jradi, X. Yang, M. Dupont, F. Hamie, X.Q. Dinh, X.W. Sun, T. Xu, and R. Bachelot, "3d photoluminescent nanostructures containing quantum dots fabricated by two-photon polymerization: Influence of quantum dots on the spatial resolution of laser writing", Advanced Materials Technologies **4**(2), 1800522 (2019).
11. Y. Yu, A. Prudnikau, V. Lesnyak, and R. Kirchner, "Quantum dots facilitate 3d two-photon laser lithography", Advanced Materials **35**(29), 2211702 (2023).
12. J. Askey, A. van den Berg, S.R. Gomez, C. Donnelly, D. Grundler, and S. Ladak, "Exploiting two-photon lithography, deposition, and processing to realize complex 3d magnetic nanostructures", Adv. Funct. Mater. **36**, e16383 (2026).
13. L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems* (Cambridge University Press, Cambridge, 2015).
14. S.S. Kosolobov, I.A. Pshenichnyuk, K.R. Taziev, A.K. Zemtsova, D.S. Zemtsov, A.S. Smirnov, D.M. Zhigunov, and V.P. Drachev, "Silicon integrated photonics", Phys.-Uspekhi **67**(11), 1153 (2024).
15. B.J.M. Hausmann, B. Shields, Q. Quan, P. Maletinsky, M. McCutcheon, J.T. Choy, T.M. Babinec, A. Kubanek, A. Yacoby, M.D. Lukin, and M. Loncǎr, "Integrated diamond networks for quantum nanophotonics", Nano Lett. **12**(3), 1578 (2012).
16. P. Rath, N. Gruhler, S. Khasminskaya, C. Nebel, C. Wild, and W.H.P. Pernice, "Waferscale nanophotonic circuits made from diamond-on-insulator substrates", Opt. Express **21**, 11031 (2013).
17. G. Poberaj, H. Hu, W. Sohler, and P. Günter, "Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonic devices", Laser & Photonics Rev. **6**(4), 488 (2012).
18. A. Rahim, E. Ryckeboer, A.Z. Subramanian et al. (Collaboration), "Expanding the silicon photonics portfolio with silicon nitride photonic integrated circuits", J. Light. Technol. **35**(4), 639 (2017).
19. J. Lacey and F. Payne, "Radiation loss from planar waveguides with random wall imperfections", IEE Proceedings J. (Optoelectronics) **137**, 282 (1990).
20. X. Zhang, J. Qiu, X. Li, J. Zhao, and L. Liu, "Complex refractive indices measurements of polymers in visible and near-infrared bands", Appl. Opt. **59**, 2337 (2020).
21. S. Zhang, S.-J. Tang, S. Feng, Y.-F. Xiao, W. Cui, X. Wang, W. Sun, J. Ye, P. Han, X. Zhang, and

Y. Zhang, "High-q polymer microcavities integrated on a multicore fiber facet for vapor sensing", Adv. Opt. Mater. **7**(20), 1900602 (2019).

22. A. I. Maydykovskiy, D. A. Apostolov, E. A. Mamonov, D. A. Kopylov, S. A. Dagesyan, and T. V. Murzina, "Two-photon laser lithography of functional microstructures of integrated photonics: Waveguides, microcavities, and prism input/output adapters of optical radiation", JETP Lett. **117**(1), 37 (2023).
23. C. Flynn, H. Cao, B. E. Applegate, and T. S. Tkaczyk, "Fabrication of waveguide directional couplers using 2-photon lithography", Opt. Express **31**, 26323 (2023).
24. C. R. Ocier, C. A. Richards, D. A. Bacon-Brown et al. (Collaboration), "Direct laser writing of volumetric gradient index lenses and waveguides", Light Sci. Appl. **9**(1), 196 (2020).
25. S. Krivec, N. Matsko, V. Satzinger, N. Pucher, N. Galler, T. Koch, V. Schmidt, W. Grogger, R. Liska, and H. C. Lichtenegger, "Silica-based, organically modified host material for waveguide structuring by two-photon-induced photopolymerization", Adv. Funct. Mater. **20**(5), 811 (2010).
26. V. B. Novikov, A. I. Maydykovskiy, B. I. Mantsyzov, and T. V. Murzina, "Laue diffraction in one-dimensional photonic crystals: The way for phase-matched second-harmonic generation", Phys. Rev. B **93**, 235420 (2016).
27. Q. Zheng, X. Wang, and D. Thompson, "Temperature-dependent optical properties of monocrystalline CaF_2, BaF_2, and MgF_2", Opt. Mater. Express **13**, 2380 (2023).
28. H. Sun, T. Jia, C. Li, X. Li, S. Xu, D. Feng, X. Wang, X. Ge, and Z. Xu, "Mechanisms of femtosecond laser-induced damage in magnesium fluoride", Solid State Commun. **141**(3), 127 (2007).
29. D. Zhu, S. Jiang, Y. Wang, D. Liu, W. Bao, L. Liu, J. Qu, Y. Wang, and C. Liao, "Ultrafast laser 3d nanolithography of organic–inorganic hybrid waveguide devices", APL Photonics **10**, 026101 (2025).
30. "Micro resist technology gmbh", 2025; URL: http://www.microresist.de/produkt/ormocomp/.
31. M. Schmid, D. Ludescher, and H. Giessen, "Optical properties of photoresists for femtosecond 3d printing: refractive index, extinction, luminescence-dose dependence, aging, heat treatment and comparison between 1-photon and 2-photon exposure", Opt. Mater. Express **9**, 4564 (2019).
32. M. J. Dodge, "Refractive properties of magnesium fluoride", Appl. Opt. **23**, 1980 (1984).
33. A. Žukauskas, G. Batavičiūtė, M. Ščiuka, T. Jukna, A. Melninkaitis, and M. Malinauskas, "Characterization of photopolymers used in laser 3d micro/nanolithography by means of laser-induced damage threshold (lidt)", Opt. Mater. Express **4**, 1601 (2014).
34. H. Kogelnik and V. Ramaswamy, "Scaling rules for thin-film optical waveguides", Appl. Opt. **13**, 1857 (1974).
35. Schott, "Optical glass, data sheets"; 2025; URL: https://media.schott.com/api/public/content/38cbbe876d324e03b1881d33f3d26635?v=ae4e3db8.
36. H. Gehring, A. Eich, C. Schuck, and W. H. P. Pernice, "Broadband out-of-plane coupling at visible wavelengths", Opt. Lett. **44**, 5089 (2019).
37. I. O. Batuev, K. A. Smirnov, I. I. Tsiniaikin, A. I. Maydykovskiy, and T. V. Murzina, "Light coupling devices for subwavelength waveguides based on second order surfaces manufactured by two-photon laser lithography", Moscow University Physics Bulletin **80**(3), 2530401–1 (2025).