

УДК 535.8

ВОЛНОВЕДУЩИЕ СТРУКТУРЫ И ФОТОННЫЕ РАЗВЕТВИТЕЛИ, СОЗДАННЫЕ МЕТОДОМ ПРЯМОГО (3 + 1)D ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА

© 2023 г. Д. А. Колымагин^{1, *}, Д. А. Чубич¹, Д. А. Щербаков¹, Р. М. Паттия¹,
А. В. Грициенко^{1, 2}, А. В. Писаренко¹, И. В. Душкин¹, А. Г. Витухновский^{1, 2}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: kolymagin@phystech.edu

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Проблема создания высокопроизводительных систем передачи и обработки больших объемов данных, обуславливает важность создания гибридных фотонных интегральных схем сложной архитектуры. Изучены трехмерные фотонные волноведущие структуры, созданные методом прямого (3 + 1)D лазерного письма, с целью интеграции таких структур в фотонные интегральные схемы.

DOI: 10.31857/S0367676523702927, EDN: QUWEWR

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение производительности систем передачи и обработки больших объемов данных возможно с помощью перехода на интегральную оптическую платформу. Такой переход обуславливает важность создания гибридных фотонных интегральных схем сложной архитектуры. 3D-микроструктуры, интегрированные в архитектуру фотонных интегральных схем (ФИС, англ. PIC), позволят оптимизировать топологию схем, а также повысить компактность и эффективность функциональных элементов [1]. Одним из способов интеграции 3D-микроструктур в архитектуру ФИС является использование метода прямого лазерного письма (Direct Laser Writing – DLW-фотолитография) [2, 3, 4].

С помощью метода DLW-фотолитографии создаются фотонные микроструктуры, важные для практических применений, такие как: устройства ввода и вывода излучения для ФИС [4]; 3D-миковолноводы (Photonic Wire Bond-PWB), эффективность которых лучше 6 дБ (25%) [5, 6]; устройства, меняющие плоскость поляризации выходящего из волновода излучения относительно входящего [8]. Исследуются возможности создания и применения многомодовых сплиттеров на 16 каналов [9], которые можно использовать в качестве элемента реализации вычислений с помощью нейросетей [10]. PWB, изготовленные методом DLW, могут использоваться как в качестве

оптического широкополосного канала связи между чипами [11], так и для взаимосвязей между компонентами в фотонных интегральных схемах. Поскольку “стандартные” элементы генерации света (полупроводниковые лазеры), а также блоки обработки и регистрации оптических сигналов часто расположены на разных микросхемах [12], изготовленных из разных полупроводников, PWB являются единственным компактным решением для эффективного соединения таких элементов.

Одним из важных направлений развития технологий является разработка ФИС, оперирующих одиночными фотонами для реализации квантовых вычислений и квантовой криптографии на чипе. Таким образом, интеграцию элементов PIC в современные интегральные схемы, можно рассматривать как важный этап создания принципиально новых устройств [13–20]. Одним из способов реализации ФИС с источниками одиночных фотонов является внедрение алмазов с NV-центрами окраски в миковолноводы [21].

Улучшения свойств получаемых с помощью двухфотонной фотополимеризации 3D-микроструктур, а также создание функциональных структур возможно благодаря применению метода прямого (3 + 1)D лазерного письма. Метод прямого (3 + 1)D лазерного письма, позволяет варьировать физические характеристики фоточувствительного материала посредством контроля интенсивности и времени облучения фемтосе-

кундным излучением в процессе фотолитографии [22, 23]. Благодаря прецизионному контролю процесса литографии возможна реализация элементов с градиентным показателем преломления [24]. Данная работа посвящена исследованию 3D фотонных волноведущих структур, созданных методом прямого (3 + 1)D лазерного письма с целью интеграции таких структур в фотонные интегральные схемы.

МЕТОДЫ

Физической основой, позволяющей реализовать метод прямого (3 + 1)D лазерного письма, является зависимость физических характеристик фоточувствительного материала, таких как степень конверсии и показатель преломления, от поглощенной дозы фемтосекундного лазерного излучения. Для реализации метода прямого (3 + 1)D лазерного письма в работе использовалась коммерческая установка Nanoscribe Photonic Professional (Nanoscribe GmbH, Germany). Фокусировка излучения осуществлялась посредством 63× планапохроматического объектива (Zeiss) с числовой апертурой NA = 1.4. Центральная длина волны фемтосекундного лазерного излучения принимала значение 780 нм. В процессе реализации метода прямого (3 + 1)D лазерного письма использовалась оригинальная фоточувствительная композиция на основе метилакрилатного красителя, производного от бензилиденциклопентанона [25]. Подготовка фоточувствительной композиции осуществлялась растворением красителя 4Met-BAC в мономере пентаэритритол триакрилат (CAS № 3524-68-3, Pentaerythritol triacrylate, PETA). Массовая доля красителя в фоточувствительной композиции достигала концентрации 1%. Процедура “проявки” структур осуществлялась посредством погружения структур в течение 25 мин в ацетат метилового эфира пропиленгликоля (CAS № 108-65-6, Propylene glycol methyl ether acetate, PGMEA), после чего структуры погружались на 5 мин в изопропанол (CAS № 67-63-0, Isopropyl alcohol, IPA). Показатель преломления мономера PETA принимает значение 1.483 в не полимеризованном состоянии и 1.51 после процесса однофотонной фотополимеризации [26]. Коммерческие фоторезисты на основе метакрилатных мономеров с близким показателем преломления 1.52 в полимеризованном состоянии обладают мнимой частью показателя преломления, не превышающей значение 10^{-4} [27].

Морфологическая характеристика полученных структур осуществлялась методами рамановской спектроскопии и лазерной сканирующей конфокальной микроскопии (ЛСКМ). Благодаря наличию в использованных фотокомпозициях фотоинициаторов, обладающих флуоресценцией, метод лазерной конфокальной микроскопии

имеет ряд преимуществ при исследовании морфологии микроструктур сложной 3D-геометрии. Благодаря молекулам фотоинициатора, содержащимся в изготовленных полимерных структурах по всему объему, возможен качественный анализ объема волноведущих структур. Проводимый анализ позволяет выявлять дефекты в объеме структур, которые существенным образом влияют на эффективность пропускания структур в составе фотонных интегральных схем.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ПРЯМОГО (3 + 1)D ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА

Для создания 3D-микроструктур методом прямого (3 + 1)D лазерного письма была исследована зависимость степени конверсии (DC) оригинальной фоточувствительной композиции от параметров процесса (3 + 1)D-литографии. Для исследований были подготовлены полимерные 3D-микроструктуры в форме параллелепипедов высотой 8 мкм и квадратным сечением с длиной стороны 25 мкм. Структуры изготавливались при разных мощностях лазерного излучения. Степень конверсии созданных 3D-микроструктур исследовалась методами спектроскопии комбинационного рассеяния по относительному изменению пиков в спектрах комбинационного рассеяния с волновыми числами 1635 и 1723 см^{-1} , связанных с колебательными переходами C=C и C=O связей соответственно, в молекулах олигомера PETA. Значение величины степени конверсии вычислялось по формуле (1):

$$DC = \left(1 - \frac{A_{C=C}^p / A_{C=O}^p}{A_{C=C}^m / A_{C=O}^m} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

где $A_{C=C}^p$, $A_{C=O}^p$, $A_{C=C}^m$, $A_{C=O}^m$ величины проинтегрированного сигнала комбинационного рассеяния пика колебательного перехода C=C и C=O (нижний индекс) полимеризованной (p) и не полимеризованной (m) фоточувствительной композиции.

Было выявлено, что определенные в эксперименте значения степени конверсии (DC) монотонно зависели от мощности фемтосекундного лазерного излучения (LP), применяемого в процессе прямого (3 + 1)D лазерного письма (рис. 1). Так при увеличении лазерного излучения в диапазоне 0 до 5 мВт наблюдается увеличение степени конверсии получаемого из фоточувствительной композиции полимера. При больших значениях лазерного излучения степень конверсии достигает насыщения (34–36%). Эффект насыщения степени конверсии связан с величинами квантовой эффективности возбуждения молекул метакрилатного красителя 4Met-BAC посредством двухфотонного поглощения, а также квантовой эффективности инициации возбужденными мо-

лекулами 4Met-ВАС процесса радикальной полимеризации. В рамках проводимых исследований была сделана экстраполяция полученных зависимостей на основе модели пороговых явлений:

$$DC = \left[C_1 \left(1 - e^{-C_2 \left(\frac{LP}{LP_{th}} \right)^2} \right) + C_0 \right] \times 100\%, \quad (2)$$

где $C_2 = 0.15$; $C_1 = 0.40$; $C_0 = -0.05$ – коэффициенты пропорциональности. $LP_{th} = 0.9$ мВт – экспериментально определенная пороговая мощность фотополимеризации для данной фоточувствительной композиции. Параметр C_2 определялся с точностью до постоянного множителя (равного 4.6) по квадрату отношения LP_{th} к значению мощности, при котором достигалось значение насыщения DC. Параметры C_0 и C_1 определялись из условий значения конверсии 0 при значении мощности лазерного излучения равного LP_{th} , а также по условию равенства величины $(C_0 + C_1) \times 100\%$ (предельный переход $LP \gg LP_{th}$) значению насыщения DC.

Полученные экспериментальные данные позволяют определить диапазон доз фемтосекундного излучения, используемого в процессе прямого (3 + 1)D лазерного письма, в рамках которого характеристики полученного из оригинальной фотоконпозиции материала зависят от величины дозы лазерного излучения.

ФОТОННЫЕ РАЗВЕТВИТЕЛИ, СОЗДАННЫЕ МЕТОДОМ ПРЯМОГО (3 + 1)D ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА

На основе результатов, полученных при исследовании оригинальных фоточувствительных композиций, были подготовлены фотонные разветвители. Созданные методом прямого (3 + 1)D лазерного письма фотонные разветвители обладали ступенчатым (core-shell) и градиентным распределением степени конверсии, с которой связан показатель преломления, в плоскости поперечного сечения разветвителя (рис. 2). При создании структур использовался диапазон мощности фемтосекундного излучения от 1 (порог фотополимеризации) до 4 мВт. Для данного диапазона зависимость степени конверсии от мощности фемтосекундного излучения можно с достаточной точностью аппроксимировать линейной функцией. Градиентные волноведущие структуры (с Гауссовым распределением мощности LP вдоль сечения волновода) обладают профилем распределения степени конверсии близким к параболическому, а более быстрое изменение мощности излучения вблизи волновода позволяет уменьшить эффект накопления дозы поглощенного излучения. Характерные размеры сечения волнове-

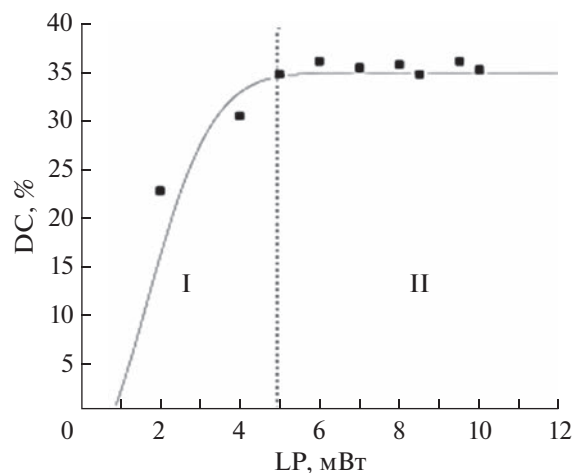


Рис. 1. График зависимости степени конверсии (DC) от мощности лазерного излучения. Сплошной линией показана экстраполяция. Пунктирной линией разделены две области I и II. Область I – значения мощности лазерного излучения для реализации (3 + 1)D лазерного письма. Область II – фотолитография с получением заданных характеристик материала.

дущих элементов разветвителя варьировались в диапазоне от 0.8 до 5 мкм, что соответствовало распространению от 0 до 4 мод излучения с длиной волны 650 нм в волноводе. Геометрия разветвителя задавалась с помощью аналитических функций, при выборе которых рассматривалось условие минимизации радиуса кривизны в местах разветвления и вблизи портов ввода/вывода излучения.

Морфология изготовленных 3D-микроструктур исследовалась с помощью методов ЛСКМ (рис. 3). Люминесцентный сигнал структур обусловлен люминесценцией молекул фотоинициатора, входящим в состав фотоконпозиции, при возбуждении ультрафиолетовым излучением. Стоит отметить, что молекулы фотоинициатора равномерно распределены по объему фоточувствительной композиции и могут сохранять информацию о дозе облучения фемтосекундным лазером благодаря деградации фотоинициатора. Исследование структур проходило в послыном режиме (Stack Mode). Поле сканирования микроскопа составляло 60.8 мкм, а шаг сканирования принимал значение 0.12 мкм вдоль латеральных направлений и 0.5 мкм вдоль аксиального направления. Непрерывная съемка многоплоскостных конфокальных изображений вдоль аксиальной оси позволяет получать трехмерные изображения фотонных разветвителей с точностью определения геометрических параметров не хуже 0.5 мкм. Селективное возбуждение люминесценции молекул фотоинициатора в составе материала фотонных разветвителей осуществлялось излучением на длине волны 458 нм, которое попадает на край полосы поглощения

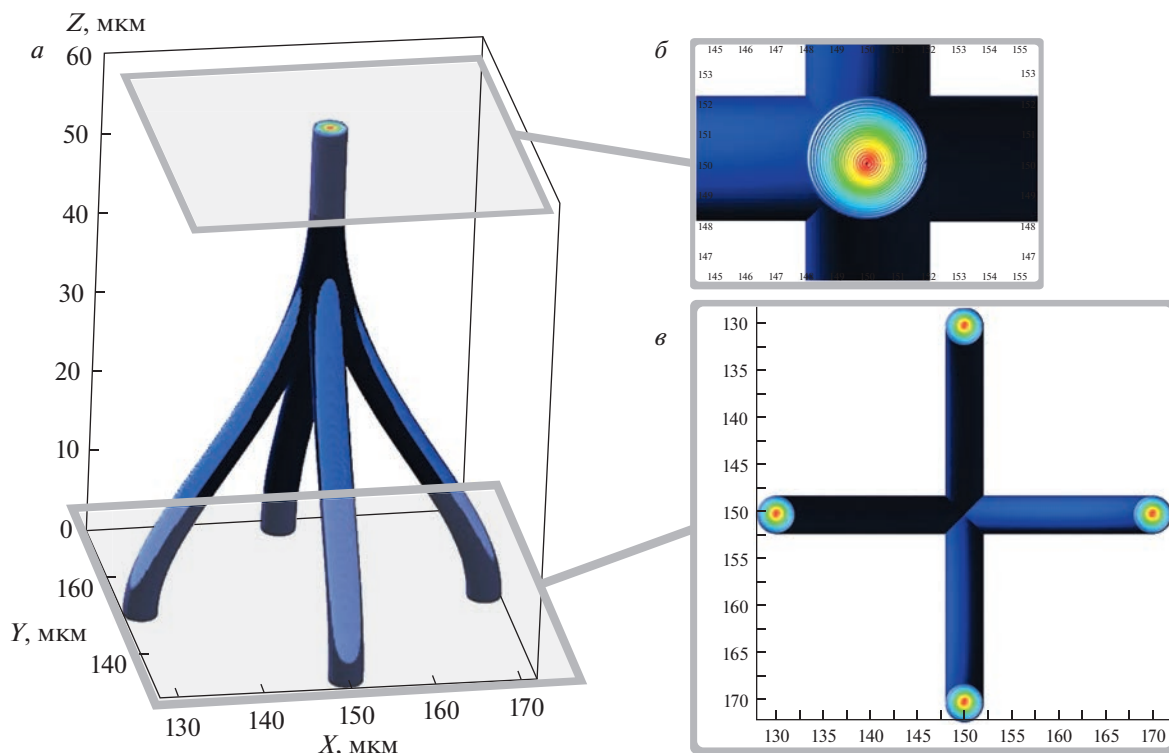


Рис. 2. Модель фотонного разветвителя, созданного прямым (3 + 1)D лазерным письмом: изометрическая проекция (а); сечение входной части 3D-микроструктуры (б); сечение выходной части структуры (в). Псевдоцветами показано распределение мощности лазерного излучения в пространстве — темный (красный) соответствует мощности 4 мВт, светлый (синий) — 1 мВт.

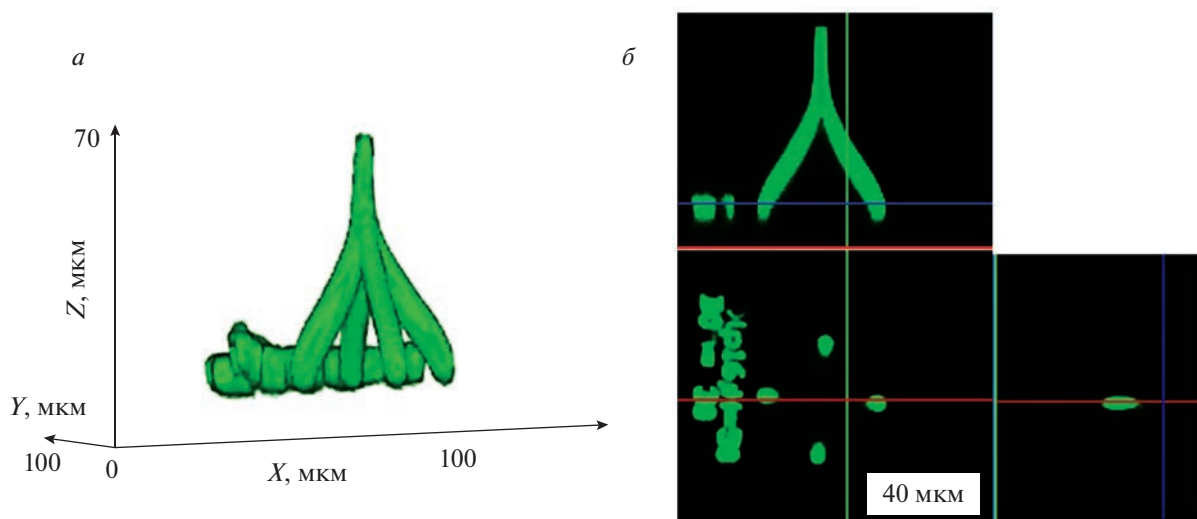


Рис. 3. 3D-изображение фотонного разветвителя, полученное с помощью ЛСКМ: изометрическая проекция (а); сечения микроструктуры вдоль заданных плоскостей (б).

фотоинициатора. Такое нерезонансное возбуждение позволяет уменьшить влияние возбуждающего излучения ЛСКМ на 3D-структуру.

Исследования фотонных разветвителей проводились с помощью специального оптического стенда (рис. 4а). Данный стенд был создан на ос-

нове оптического микроскопа и лазерного сканирующего конфокального микроскопа. При исследовании структур проводилось измерение пропускания выходов создаваемых фотонных разветвителей по изображениям, получаемым с камеры микроскопа. Измерение пропускания

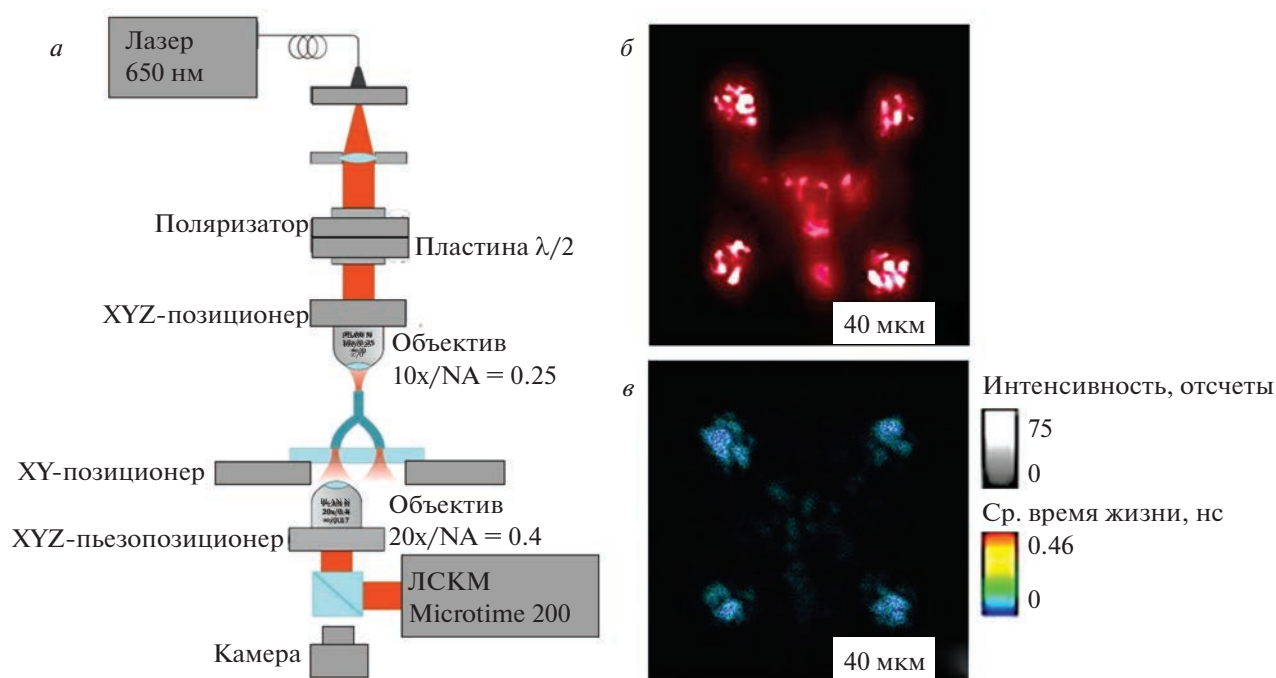


Рис. 4. Оптическая схема стенда для измерения пропускания создаваемых фотонных разветвителей (а). Изображение разделения излучения с длиной волны 650 нм на четыре пучка, полученное на камере стенда (б). Изображение портов вывода излучения фотонного разветвителя, полученное с помощью конфокального микроскопа (в).

осуществлялось следующим образом: 1) лазерное излучение фокусировалось на подложку, на которой был создан фотонный разветвитель, на некотором расстоянии от 3D-структуры с целью определения потока излучения попадающего на образец; 2) с помощью XYZ-позиционера вводный порт фотонного разветвителя совмещался с фокусом объектива, при этом вторым объективом фиксировалось изображение, получаемое в области портов вывода излучения (рис. 4б); 3) анализ изображений и оценка пропускания посредством нахождения отношения потока излучения выходящего из структуры к потоку падающему на образец. Также на данном стенде проводились конфокальные исследования морфологии для выявления корреляции между максимумами интенсивности пропускания и положениями портов вывода излучения разветвителя (рис. 4в). Потери при взаимодействии света и 3D-микроструктуры составили 16%. Измеренные потери включали в себя как потери при введении излучения в структуру с помощью объектива микроскопа, так и потери при делении потока излучения. В ходе экспериментов было показано деление излучения с длиной волны 650 нм на четыре пучка с распределением интенсивностей по каналам $21 \pm 2\%$.

Представленный подход создания фотонных разветвителей позволяет создавать эффективные структуры в трехмерном пространстве с субмикронным разрешением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод прямого (3 + 1)D лазерного письма позволяет реализовать литографию 3D-структур с субмикронным разрешением. Преимуществом данного метода является простота технической реализации (с точки зрения требований к классу чистоты и отсутствие необходимости реализации вакуума), а также меньшая стоимость установок для реализации данного подхода изготовления функциональных фотонных структур (по сравнению с сопоставимыми установками для электронной литографии, фотолитографии в глубоком ультрафиолете, эпитаксии). Метод прямого (3 + 1)D лазерного письма важен при создании таких элементов как: фазовые маски, фотонные межсоединения и волноводные структуры со ступенчатым (core-shell) и градиентным показателем преломления и малыми оптическими потерями.

В рамках реализации метода прямого (3 + 1)D лазерного письма исследована фоточувствительная композиция на основе фотоинициатора 4Met-BAC. Для данной фоточувствительной композиции показано наличие диапазона мощностей фемтосекундного излучения от 1 до 5 мВт, для которого свойства полимерного материала зависят от мощности лазерного излучения во время литографии. Созданы волноводы со ступенчатым (core-shell) и градиентным показателем преломления, а также методом лазерной конфокальной ска-

нирующей микроскопии исследована морфология полученных структур. Для фотонных разветвителей проведены первичные эксперименты и получена визуализация разделения излучения с длиной волны 650 нм на четыре пучка. Также, благодаря совмещению измерительного стенда с конфокальным микроскопом, показана корреляция между световыми пучками и портами вывода излучения.

Продemonстрированный подход создания фотонных 3D-микроструктур обладает значительным потенциалом для создания гибридных систем, сочетающих стандартные планарные чипы и полимерные волноводные микроструктуры.

Исследования и создание фотонных разветвителей на основе волноводных структур проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10153). Разработка технологий прямого лазерного письма выполняется в соответствии с соглашением о предоставлении из федерального бюджета субсидии № 075-02-2022-1672. Технологические особенности, выявленные в процессе исследований, были учтены при разработке уникального российского 3D-литографа с превышением дифракционного предела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Son G., Han S., Park J. et al. // *Nanophotonics*. 2018. V. 7. No. 12. P. 1845.
2. Pao Y.H., Rentzepis P.M. // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 6. No. 5. P. 93.
3. Sun H.B., Kawata S. // In: *NMR. 3D Analysis. Photopolymerization*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 169.
4. Витухновский А.Г., Звагельский Р.Д., Колымагин Д.А. и др. // *Опт. и спектроск.* 2019. Т. 126. № 1. С. 63; Vitukhnovsky A.G., Zvagelsky R.D., Kolymagin D.A. et al. // *Opt. Spectrosc.* 2019. V. 126. No. 1. P. 54.
5. Gehring H., Eich A., Schuck C., Pernice W.H.P. // *Opt. Lett.* 2019. V. 44. No. 20. P. 5089.
6. Lindenmann N., Dottermusch S., Goedecke M.-L. et al. // *J. Light. Technol.* 2015. V. 33. No. 4. P. 755.
7. Витухновский А.Г., Звагельский Р.Д., Колымагин Д.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84. № 7. С. 927; Vitukhnovsky A.G., Zvagelsky R.D., Kolymagin D.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020. V. 84. No. 7. P. 760.
8. Schumann M., Buckmann T., Gruhler N. et al. // *Light. Sci. Appl.* 2014. V. 3. No. 6. Art. No. e175.
9. Schell A.W., Kaschke J., Fischer J. et al. // *Sci. Reports*. 2013. V. 3. P. 1577.
10. Moughames J., Porte X., Larger L. et al. // *Opt. Mater. Express*. 2020. V. 10. No. 11. P. 2952.
11. Lindenmann N., Balthasar G., Hillerkuss D. et al. // *Opt. Express*. 2012. V. 20. No. 16. P. 17667.
12. Billah M.R., Blaicher M., Hoose T. et al. // *Optica*. 2018. V. 5. No. 7. P. 876.
13. Dietrich P.-I., Blaicher M., Reuter I. et al. // *Nature Photonics*. 2018. V. 12. No. 4. P. 241.
14. Atabaki A.H., Moazeni S., Pavanello F. et al. // *Nature*. 2018. V. 556. No. 7701. P. 349.
15. Stojanović V., Ram R. J., Popović M. et al. // *Opt. Express*. 2018. V. 26. No. 10. P. 13106.
16. Selvaraja S.K., Sethi P. // *Emerging Waveguide Technology*. 2018. V. 95. P. 458.
17. Dong P., Chen Y.K., Duan G.H., Neilson D.T. // *Nanophotonics*. 2014. V. 3. No. 4–5. P. 215.
18. Chen L., Doerr C.R., Chen Y.K. // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. No. 4. P. 469.
19. Gao L., Huo Y., Zang K. et al. // *Sci. Reports*. 2015. V. 5. No. 1. Art. No. 15794.
20. Staude I., Schilling J. // *Nature Photonics*. 2017. V. 11. No. 5. P. 274.
21. Moughames J., Porte X., Thiel M. et al. // *Optica*. 2020. V. 7. No. 6. P. 640.
22. Dottermusch S., Busko D., Langenhorst M. et al. // *Opt. Lett.* 2019. V. 44. No. 1. P. 29.
23. Shcherbakov D.A., Kolymagin D.A., Matital R.P. et al. // *J. Russ. Laser Res.* 2023. V. 44. P. 47.
24. Porte X., Dinc N.-U., Moughames J. et al. // *Optica*. 2021. V. 8. No. 10. P. 1281.
25. Zhiganshina E.R., Arsenyev M.V., Chubich D.A. et al. // *Eur. Polym. J.* 2022. V. 162. Art. No. 110917.
26. Dorkenoo K., Van Wonderen A.J., Bulou H. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. No. 12. P. 2474.
27. Schmid M., Ludescher D., Giessen H. // *Opt. Mater. Express*. 2019. V. 9. No. 12. P. 4564.

Waveguide structures and photon splitters fabricated by direct (3 + 1)D laser writing

D. A. Kolymagin^{a, *}, D. A. Chubich^a, D. A. Shcherbakov^a, R. M. Pattia^a, A. V. Gritsenko^{a, b},
A. V. Pisarenko^a, I. V. Dushkin^a, A. G. Vitukhnovskiy^{a, b}

^aMoscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141700 Russia

^bLebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: kolymagin@phystech.edu

The problem of high-performance systems for the big data transmission and processing fabrication determines the importance of creating hybrid photonic integrated circuits with complex architecture. We studied of three-dimensional photonic waveguide structures created by direct (3 + 1)D laser writing, with the aim of adding such structures to photonic integrated circuits.

Keywords: two-photon photopolymerization, direct (3 + 1)D laser writing, photonic integrated circuits, 3D microstructures