

УДК 535.8

3D-МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

© 2024 г. Д. А. Колымагин^{1,*}, А. И. Проходцов^{1,2}, Д. А. Чубич¹, Р. П. Матитал¹, А. В. Казанцева¹,
Д. П. Емельянов¹, В. В. Ковалюк^{2,3}, А. Г. Витухновский^{1,4}, Г. Н. Гольцман^{3,5}

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук», Москва, Россия

⁵Общество с ограниченной ответственностью «Российский квантовый центр», Москва, Россия

*E-mail: kolymagin@phystech.edu

Поступила в редакцию 15.07.2024

После доработки 19.08.2024

Принята к публикации 30.08.2024

Изучены спектральные зависимости созданных методом двухфотонной полимеризации 3D-микроструктур для ввода излучения в диапазоне от 1480 до 1640 нм в фотонные интегральные схемы и выполнено сравнение их параметров с дифракционными решетками.

Ключевые слова: двухфотонная фотополимеризация, прямая (3+1)D лазерная запись, фотонные интегральные схемы, соединители, 3D микроструктуры

DOI: 10.31857/S0367676524120254, **EDN:** EUKZUT

ВВЕДЕНИЕ

Оптические технологии и развитие фотонных интегральных схем (ФИС-PIC) произвели революцию в области создания недорогих и высокопроизводительные компонент для устройств передачи и обработки больших объемов данных [1,2] и манипулирования микрочастицами на микроскопических масштабах [3]. Несмотря на все преимущества, совместимость ФИС с оптоволоконными компонентами все еще относительно ограничена. Данные ограничения в основном являются результатом большого несоответствия размеров оптических волокон и планарных фотонных волноводов. Из-за этого ввод и вывод излучения в ФИС с большой эффективностью по-прежнему остается актуальной проблемой. Для решения этой проблемы обычно применяется один из двух типов соединения: «торцевое» соединение, при котором оптоволокна соединяются с волноводами ФИС с торцевой стороны чипа [4]; и «вертикальное» соединение, при котором излучение падает почти перпендикулярно поверхности ФИС и с помощью специальной структуры направляется в волновод ФИС [5]. При «торцевом»

соединении требуется реализация прецизионного совмещения оптоволокон и торцов волноводов ФИС, чтобы обеспечить высокую эффективность соединения. «Вертикальное» соединение, как правило, обладает менее строгими ограничениями по точности совмещения, но может накладывать существенные ограничения на тип падающего излучения. Наиболее распространенной реализацией такого соединения являются дифракционные решетки [6]. Такое соединение обладает преимуществом относительно простотой реализации литографического процесса изготовления и морфологической характеризации структур. С другой стороны, простейшие формы этих структур по своей природе чувствительны к поляризации и длине волны, и для уменьшения влияния этих ограничений требуется тщательное проектирование дизайна структуры.

В данной работе предложена реализация «вертикального» соединения посредством 3D-микроструктур для ввода излучения в фотонные чипы. Также посредством данных структур можно выводить излучение из системы. Наиболее эффективным методом для создания 3D-микроэлементов ФИС является

аддитивный метод двухфотонной фотополимеризации (Direct Laser Writing — DLW-фотолитография). Данный метод основан на иницииации фотохимической реакции двухфотонной фотополимеризации (Two Photon Polymerization — TPP), вызванной эффектом двухфотонного поглощения (Two Photon Absorption — TPA) вблизи перетяжки сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения [7]. С помощью метода DLW-фотолитографии создаются фотонные микроструктуры, важные для практических применений: устройства на основе массива микролинз [8]; фазовые маски для изменения волнового фронта [9]; соединения фотонных чипов и устройства ввода излучения в чип [10, 11]; фотонные разветвители на их основе [12].

Нами были созданы 3D-микроструктуры для ввода излучения в ФИС. Эффективность 3D-микроструктур для заведения излучения в фотонные чипы была исследована на основе данных пропускания излучения ФИС в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 нм.

МЕТОДЫ

DLW-фотолитография

Для формирования полимерных 3D-микроструктур для ввода/вывода излучения использовали метод DLW-фотолитографии, реализованный на базе коммерческой установки Nanoscribe Professional (Nanoscribe, Германия). Реакцию двухфотонной фотополимеризации инициировали фемтосекундным лазерным излучением с частотой повторения 80 МГц на длине волны 780 нм. Излучение фокусировали

высокоапертурным планапохроматическим $63\times$ объективом с числовой апертурой $NA = 1.4$ (Zeiss, Германия). Для DLW-литографии использовали негативный фоторезист для двухфотонной фотополимеризации Nanoscribe Ip-Dip (Nanoscribe, Германия). Полученные образцы проявляли в ацетате монометилового эфира пропиленгликоля (PEGMA) в течение 25 мин и в изопропиловом спирте (IPA) — 5 мин.

Морфология

Для исследования морфологии структур и получения карты люминесценции использовали конфокальный микроскоп LSM 510 Meta (Zeiss, Германия) с масляным иммерсионным $40\times$ объективом с числовой апертурой $NA=1.3$ (Zeiss, Германия) [13]. Возбуждение люминесценции осуществляли аргоновым лазером с длиной волны 458 нм. Для морфологического исследования 3D-микроструктур использовали режим покадрового сканирования и получения Z-стека планарных карт люминесценции. При сканировании размер точечной диафрагмы для конфокальной схемы составлял 100 мкм.

Стенд пропускания

Для определения эффективности ввода излучения в ФИС измеряли спектры пропускания ФИС со структурами для ввода излучения. Спектры пропускания измеряли с помощью экспериментальной установки на основе перестраиваемого в диапазоне от 1480 до 1640 нм лазерного источника излучения (рис. 1). Посредством массива оптических волокон излучение направляли на исследуемую структуру,

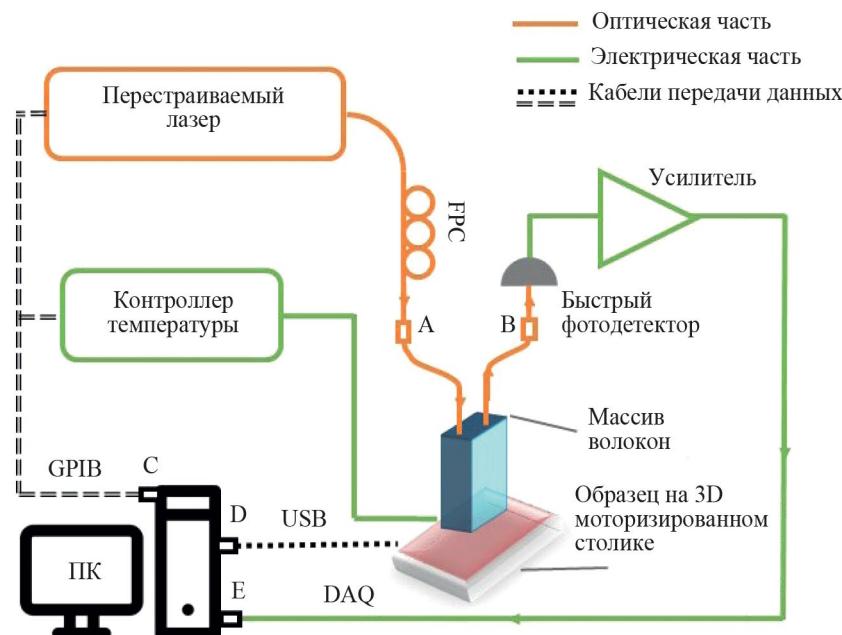


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для измерения спектра пропускания. Синим цветом, показан путь оптических волокон, серым, электрический, черным, удаленное управление лазером.

закрепленную на подвижном столике с XY-пьезо-подвижками, и регистрировали на выходе фотодетектором. Для достижения максимальной мощности на фотодетекторе, исследуемую структуру позиционировали с помощью XY-пьезоподвижек, а также с помощью изменения высоты массива волокон.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами был разработан дизайн 3D-микроструктур для ввода/вывода излучения в фотонные чипы, который состоял из трех частей: 1) верхняя часть в виде сегмента сферы, выполняющая роль линзы, согласованной с используемым в работе оптоволокном с числовой апертурой $NA = 0.2$; 2) адиабатический переход от круглого сечения волноведущей части к прямоугольному сечению; 3) полимерный конус (тейпер) для конвертации излучения из полимерной структуры в планарный волновод из нитрида кремния.

При создании модели 3D-микроструктур для ввода/вывода оптического излучения в ФИС было рассмотрено влияние эффекта полного внутреннего отражения для оптимизации параметров модели, а также учтены геометрические размеры микроструктуры для создания структуры методом прямого (3+1)D лазерного письма в рамках одного литографического (объемного) поля. Для дизайна 3D-микроструктур для ввода/вывода оптического излучения в ФИС рассматривали сферические сегменты толщиной не меньше 1 мкм, и волноведущие части с характерными размерами сечения не меньше 0.5 мкм. Для упрощения расчета структуры использовали адиабатический переход от круглого сечения к прямоугольному в виде сегмента кольца с переменным сечением. Для оценок параметров оптимальных для распространения излучения в 3D-структуре использовали значение коэффициента преломления, равное 1.5, соответствующее показателю преломления экспонированного фотополимера [14]. Угол полного внутреннего отражения для границы фотополимер-воздух равен 41.3°. Это значение в дальнейшем было использовано для оценки связи высоты структуры и размера апертуры. В процессе проведенных оценок было установлено, что для достижения наименьших потерь радиус закругления адиабатического перехода от круглого сечения волноведущей части к прямоугольному сечению должен быть примерно равен диаметру апертуры верхней части в виде сегмента сферы, выполняющего роль линзы. Длина полимерного тейпера для конвертации излучения из полимерной структуры в планарный волновод из нитрида кремния была выбрана равной 50 мкм. На основе разработанного дизайна и выполненных расчетов были подготовлены шаблоны структур 3D-микроконнекторов ввода/вывода оптического излучения в ФИС с квазистационарным переходом от круглого сечения волноведущей части с апертурой большей от 50 до 100 мкм к прямоугольному сечению 0.5×1 мкм². Далее

была выполнена оптимизация параметров структуры: дистанции между планарными слоями печати от 100 до 400 нм; высоты от 50 до 100 мкм и апертуры — от 18 до 35 мкм (рис. 2).

Тестовый чип для сравнения эффективности структур для ввода/вывода излучения в ФИС был изготовлен на подложке, состоящей из кремния, оксида кремния и нитрида кремния, методами фотолитографии с помощью негативных фоторезистов. На данном чипе было подготовлено два типа структур: 1) дифракционные решетки, совмещенные с планарным волноводом; 2) выходы для 3D-коннекторов, совмещенные с планарным волноводом (рис. 3а). На макетах с выходами для 3D-коннекторов были созданы структуры для ввода/вывода излучения в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 нм, с вариацией параметров: высоты (от 50 до 100 мкм) и апертуры (от 18 до 35 мкм) (рис. 3б). Для обоих типов структур были проведены исследования эффективности ввода/вывода излучения.

Морфология 3D-микроструктур для ввода/вывода оптического излучения в ФИС исследовалась методами лазерной конфокальной микроскопии (рис. 4). В ходе исследований были определены величины дистанций смещения 3D-коннекторов относительно планарных волноводов, которые принимали значение не более 0.3 мкм. Также, в рамках морфологических исследований было выявлено, что микроструктуры с высотой от 75 до 100 мкм были сильно деформированы за счет эффекта усадки полимера, при котором все незафиксированные подложкой участки полимера сжимались на величину порядка 10 %. В результате

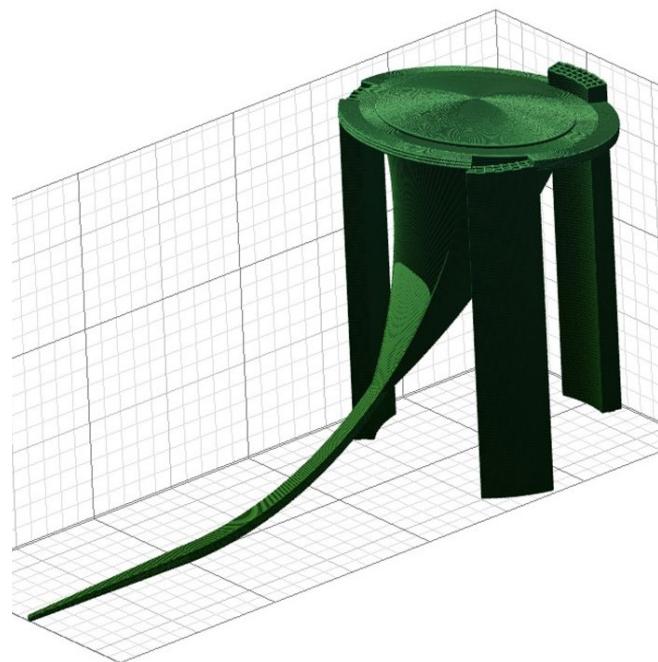


Рис. 2. Модель 3D-коннекторов, подготовленная в программном обеспечении DeScribe.

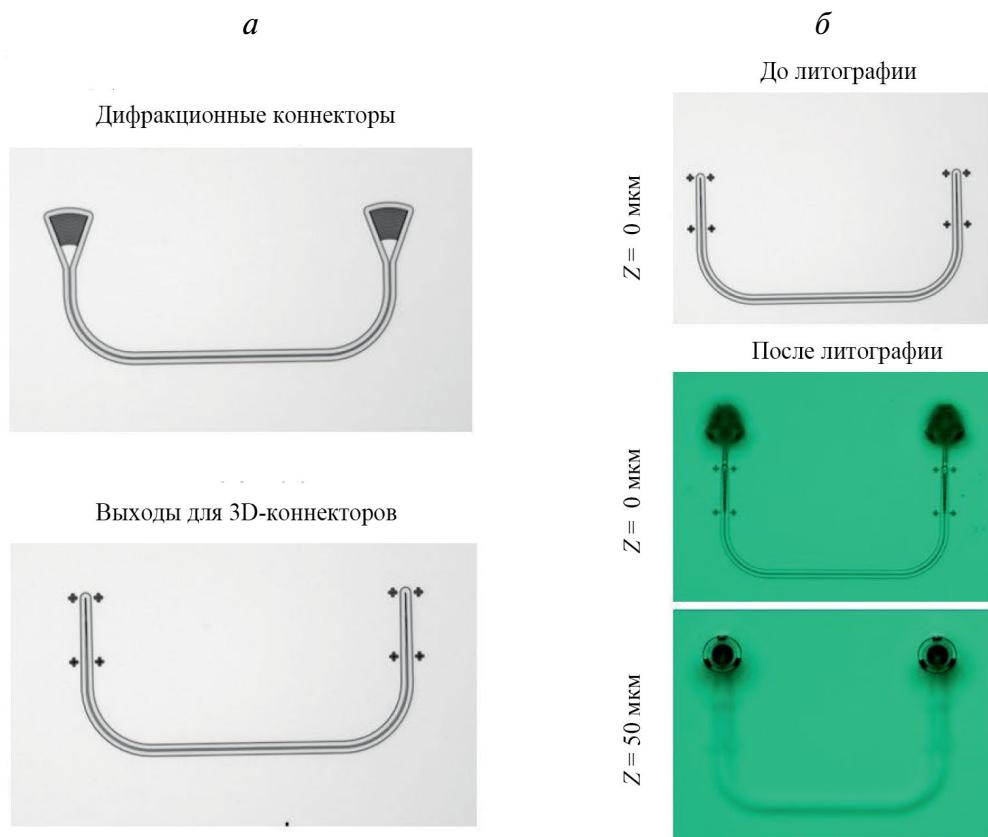


Рис. 3. Изображения фрагментов чипа для исследования эффективности ввода оптических коннекторов, полученные с помощью методов оптической микроскопии. Изображения дифракционных коннекторов и входов для 3D-микроструктур до поведения DLW-фотолитографии (*а*). Изображения выходов для 3D коннекторов до и после прямого (3+1) D лазерного письма (*б*).

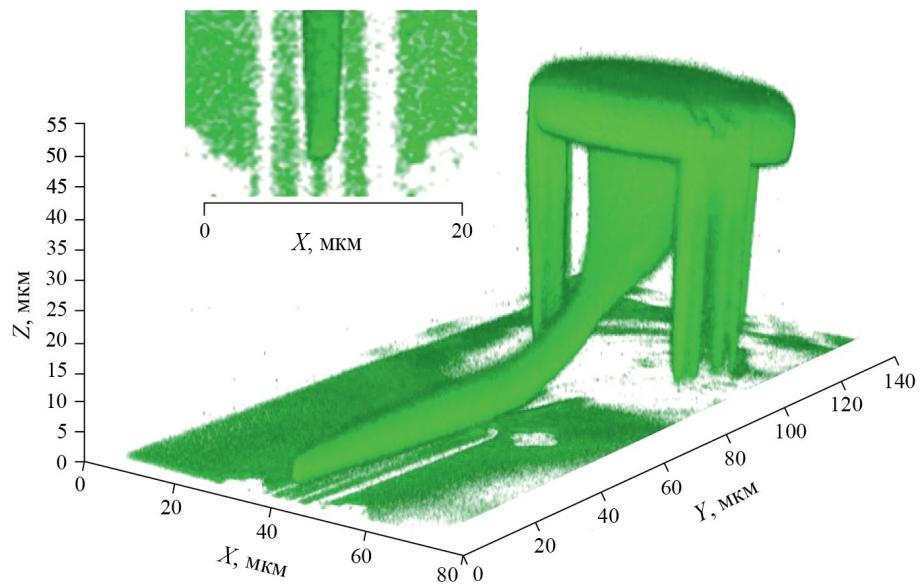


Рис. 4. Изображение с конфокального микроскопа созданных 3D структур.

деформации нарушалась заданная геометрия (выпрямление закругленного участка 3D-коннектора), что существенно влияло на эффективность ввода/вывода излучения 3D-микроструктур.

Эффективность 3D-микроструктур для ввода/вывода оптического излучения в ФИС была исследована с помощью оптического измерительного стенда. Было установлено, что наилучшим пропусканием обладали структуры с высотой 50 мкм, которые были меньше подвергнуты эффекту усадки, описанному выше. Также в ходе исследований пропускания 3D-коннекторов было проведено сравнение эффективности 3D-микроструктур и дифракционных решеток в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 нм (рис. 5). Для изготовленных 3D-микроструктур для ввода/вывода оптического излучения в ФИС максимальная эффективность была сопоставима с эффективностью дифракционных коннекторов. Разница пропускания в 1.5 раза определена для прохождения излучения через две структуры и существенно зависит от положения массива оптоволокон относительно подложки. Представленные спектры были получены при положении массива оптоволокон на расстоянии порядка 100 мкм от поверхности тестового чипа ФИС. В результате проведенных исследований было показано, что эффективность ввода/вывода 3D-коннекторов слабо зависит от длины волны падающего излучения по сравнению с дифракционными коннекторами. Развитый подход в перспективе позволит создавать эффективные элементы ФИС для ввода/вывода излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были созданы 3D-микроструктуры для ввода/вывода излучения в ФИС методом DLW-фотолитографии. Показано, что наименьшее влияние эффекта усадки полимера наблюдается для структур (подготовленного дизайна) с высотой не более 50 мкм. Морфология созданных структур была исследована методами сканирующей конфокальной микроскопии. Изучено пропускание 3D-микроструктур ввода/вывода излучения. Изменение эффективности ввода излучения в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 нм меняется не более чем на 30 %, а максимальная эффективность ввода излучения полученных структур превосходит эффективность дифракционных решеток более чем в 1.5 раза.

На основе предложенного в данной работе подхода могут быть созданы высокоэффективные спектрально не селективные элементы для ввода излучения с мягкими требованиями к точности совмещения оптоволокна и ФИС. Ослабление требований к точности совмещения оптоволокна и ФИС позволит использовать системы на основе ФИС не только при комнатных условиях, но и в условиях использования с криостатом. Такие системы в перспективе могут быть использованы как для создания высокопроизводительные компонент для устройств передачи и обработки больших объемов данных, так и для квантовых технологий.

Исследования 3D-микроструктур для заведения излучения в фотонные чипы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда

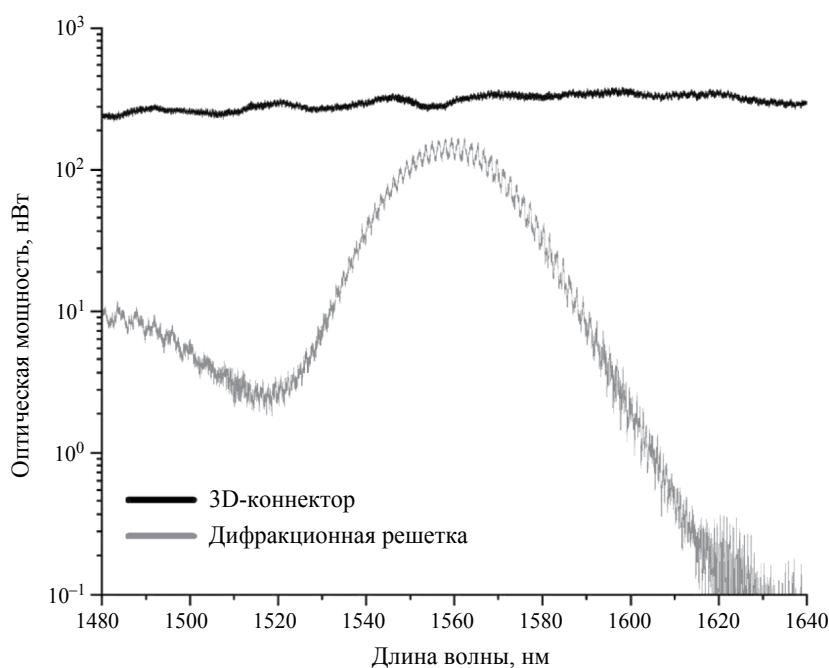


Рис. 5. Графики пропускания коннекторов. Серая кривая пропускание волновода с решеткой. Чёрная — волновода с двумя изготовленными 3D коннекторами для ввода/вывода излучения.

(проект № 22-79-10153). Разработка технологий прямого лазерного письма выполняется в соответствии с Соглашением о предоставлении из федерального бюджета субсидии № 075-03-2024-117/8 от 23 мая 2024 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jalali B., Fathpour S.* // *J. Lightwave Technol.* 2006. V. 24. P. 4600.
2. *Мусорин А.И., Шорохов А.С., Чежегов А.А. и др.* // УФН. 2023. Т. 193. № 12. С. 1284; *Musorin A.I., Shorokhov A.S., Chezhegov A.A. et al.* // *Phys. Usp.* 2023. V. 66. No. 12. P. 1211.
3. *Бессонов В.О., Розанов А.Д., Федянин А.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2024. Т. 119. № 3—4. С. 257; *Bessonov V.O., Rozanov A.D., Fedyanin A.A.* // *JETP Lett.* 2024. V. 119. No. 4. P. 261.
4. *Mu X., Wu S., Cheng L., Fu H.Y.* // *Appl. Sciences.* 2020. V. 10. P. 1538.
5. *Marchetti R., Lacava C., Carroll L. et al.* // *Photon. Res.* 2019. V. 7. No. 2. P. 201.
6. *Cheng L., Mao S., Li Z. et al.* // *Micromachines.* 2020. V. 11. P. 666.
7. *Camposeo A., Persano L., Farsari M. et al.* // *Adv. Opt. Mater.* 2019. V. 7. No. 1. Art. No.1800419.
8. *Matital R.P., Kolymagin D.A., Pisarenko A.V. et al.* // *Phys. Wave Phenom.* 2023. V. 31. No. 4. P. 217.
9. *Деменев А.А., Ковалчук А.В., Полушкин Е.А., Шаповал С.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 212; *Demenev A.A., Kovalchuk A.V., Polushkin E.A., Shapoval S.Yu.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 2. P. 159.
10. *Gehring H., Eich A., Schuck C., Pernice W.H.* // *Opt. Letters.* 2019. V. 44. No. 20. P. 5089.
11. *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.
12. *Колымагин Д.А., Чубич Д.А., Шербаков Д.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 12. С. 1695; *Kolymagin D.A., Chubich D.A., Shcherbakov D.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. No. 12. P. 1779.
13. *Matital R.P., Kolymagin D.A., Chubich D.A. et al.* // *J. Sci. Adv. Mater. Dev.* 2022. V. 7. No. 2. Art. No. 100413.
14. *Schmid M., Ludescher D., Giessen H.* // *Opt. Mater. Express.* 2019. V. 9. No. 12. P. 4564.

3D microstructures for introducing radiation into photonic integrated circuits

D. A. Kolymagin^{1,*}, A. I. Prokhodtsov^{1,2}, D. A. Chubich¹, R. P. Matital¹, A. V. Kazantseva¹, D. P. Emelyanov¹, V. V. Kovalyuk^{2,3}, A. G. Vitukhnovsky^{1,4}, G. N. Goltsman^{3,5}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141700 Russia*

²*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia*

³*HSE University, Moscow, 101000 Russia*

⁴*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

⁵*Russian Quantum Center, Skolkovo, 143025 Russia*

*e-mail: kolymagin@phystech.edu

One of the ways to implement high-performance data transmission and processing systems is photonic integrated circuits with improved optical input. The work examines the spectral dependences of 3D microstructures created by two-photon polymerization for inputting radiation in the range from 1480 to 1640 nm into photonic integrated circuits and makes a comparison with diffraction gratings.

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