Письма в ЖЭТФ, том 120, вып. 12, с. 924 – 929

Спектральные свойства трехмерных волноводных структур, изготовленных методом двухфотонной лазерной литографии

А. И. Майдыковский[+1)], *А. С. Андросов*[*], *Д. О. Апостолов*[+], *К. А. Смирнов*[+], *И. О. Батуев*[+], *Т. В. Мурзина*[+]

[+]*Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

[*]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.
После переработки 11 ноября 2024 г.
Принята к публикации 12 ноября 2024 г.

Развитие метода двухфотонной лазерной литографии для создания оптических элементов с характерными размерами в единицы микрометров является актуальной задачей. В данной работе представлены результаты изготовления методом двухфотонной лазерной литографии из гибридного фоторезиста OrmoComp® оптических волноводов микронного диаметра, оптически не связанных с подложкой и совмещенных с системой ввода–вывода оптического излучения, основу которых составляют призменные адаптеры полного внутреннего отражения. Рассчитаны и измерены спектры пропускания всей структуры (адаптер входной–волновод–адаптер выходной) и показано, что коэффициент пропускания в маломодовом режиме составляет 20–40 % в спектральном диапазоне 700–1650 нм. Согласно расчетам, основной механизм потерь в такой структуре определяется сильным рассеянием в зоне перехода конусной части адаптера в волновод из-за сложной структуры оптического поля, нарушением режима полного внутреннего отражения на призмах из-за высокой угловой апертуры фокусируемого пучка излучения. Показана необходимость учета эффекта Гуса–Хенкен при проектировании элементов сопряжения.

DOI: 10.31857/S0370274X24120157, EDN: JQUUTW

1. Введение. Развитие и оптимизация методов создания элементов интегральной фотоники, фотонных интегральных схем (ФИС), уменьшение их размеров и повышение качества привлекают постоянно высокое внимание исследователей. Для изготовления таких структур используются преимущественно методы литографии, такие как фотолитография, ионно-лучевая и электронно-лучевая литография, фемтосекундная лазерная литография [1, 2], нанопечатная и так называемая "мягкая" литография [3, 4]. В последние два десятилетия активно развивается метод двухфотонной лазерной литографии (ДФЛЛ), или direct laser writing [5, 6], основанный на прямой (безмасочной) лазерной печати структур в фоторезисте, реализующей высокое быстродействие, хорошее качество структур с субмикронным пространственным разрешением и позволяющей формировать не только планарные, но и трехмерные [7–9] структуры. В работе [10] авторы использовали ДФЛЛ для создания двухуровневых волноводных соединителей с целью расширения возможностей планарной технологии создания ФИС. Платформа на базе микролинзовых адаптеров и микроконнекторов для эффективного заведения света в оптическое многожильное волокно была разработана и реализована в работе [11] на базе коммерчески доступного прибора ДФЛЛ. Более того, разрешение ДФЛЛ может быть улучшено за счет избирательного тушения флуоресценции [12]. В обзорах последних лет [8, 9] приведены примеры ДФЛЛ-микроструктур с типичными размерами в десятки и сотни микрометров, обеспечивающие достаточный функционал для их применения в устройствах интегральной фотоники. Изготовить массив функциональных микролинз, работающих в рентгеновском диапазоне, удалось совместив ДФЛЛ с последующим пиролизом [13].

В то же время метод ДФЛЛ пока не получил коммерческого применения для формирования оптических субмикроструктур, что связано с большим числом технологических особенностей процесса, требующих дополнительного изучения. Сложной задачей является развитие способов формирования в одном цикле ДФЛЛ связанных элементов ФИС, таких, например, как эффективные (с низкими потерями) волноводы и системы заведения–вывода оптического излучения. Данный вид исследований находится на стыке науки и технологии и требует тщательного подбора параметров лазерной печати и анализа свойств изготавливаемых структур. Ранее наш коллектив начал развивать данный метод и был до-

[1)]e-mail: anton@shg.ru

стигнут ряд результатов по формированию функциональных микроструктур с характерными размерами в единицы и десятки микрометров, нанонитей с диаметром в несколько сотен нанометров, а также ДФЛЛ печати в одной структуре активных и пассивных элементов [14, 15].

При разработке ФИС неизбежно возникает вопрос эффективного заведения излучения в волновод, что может быть реализовано с использованием ряда хорошо известных методов. Самым простым, на первый взгляд, является так называемый торцевой ввод излучения, однако он требует наличия свободного, хорошо обработанного торца волновода, а также точной оптомеханики для прецизионного позиционирования элементов оптической схемы. Популярный решеточный метод имеет ограниченную спектральную полосу работы, однако он эффективен для заведения излучения под нормалью к плоскости решетки с помощью высокоапертурного объектива. В то же время перспективной является задача изготовления в одном цикле печати волноводов, оптически не связанных с подложкой, ввод и вывод излучения в которые производится с помощью элементов сопряжения (адаптеров).

В данной работе предложен и реализован метод ДФЛЛ для изготовления маломодовых волноводов, сопряженных с элементами ввода–вывода излучения в направлении нормали к плоскости подложки; оптические свойства такой системы изучены экспериментально и на основе численного моделирования.

2. Методика эксперимента. Структуры, исследованные в данной работе, изготовлены методом ДФЛЛ по методике, описанной в [14, 15]. Здесь отметим только наиболее важные моменты. Источником излучения накачки в установке ДФЛЛ являлся титан-сапфировый лазер TIF-DP фирмы ООО "Авеста-Проект" с прямой диодной накачкой [16] (длина волны излучения 780 нм, длительность импульсов 70 фс, частота следования 80 МГц). Излучение лазера проходило через акустооптический модулятор, используемый для быстрого включения/выключения лазерного пучка. Далее с помощью пространственного фильтра, совмещенного с телескопом, выделялась основная гауссова мода и лазерное излучение попадало в систему позиционирования перетяжки в латеральной плоскости образца, состоящую из гальваносканера D1105 Sino-Galvo и $4f$-системы. Затем излучение фокусировалось на образец с помощью иммерсионного объектива Nikon Plan APO VC 60x/1.4NA, закрепленного на однокоординатном пьезотрансляторе для точного позиционирования перетяжки оптического пучка в объеме фоторезиста в направлении нормали к поверхности подложки. "Грубое" трехмерное позиционирование образца относительно перетяжки лазерного луча осуществлялось с помощью трансляторов, управляемых шаговыми двигателями. Для изготовления микроструктур использовался гибридный фоторезист OrmoComp® производства "Micro resist technology GmbH"; в твердом состоянии его показатель преломления равен 1.515 (для $\lambda = 656$ нм) [17], т.е. очень близок к показателю преломления покровного стекла SCHOTT D 263 $n_{\mathrm{glass}} = 1.5204$ (для $\lambda = 656$ нм), использованного в качестве подложки. Фоторезист наносился в количестве 5 мкл на покровное стекло толщиной 170 мкм, и далее выдерживался при температуре 60 °C в течение 60 мин. Скорость движения лазерной перетяжки в процессе печати составляла 500 мкм/с при мощности излучения в зоне фоторезиста порядка 10 мВт. Для предотвращения утечек излучения в подложку изготавливались волноводы, приподнятые над подложкой, структура которых аналогична предложенной ранее [15].

3D-модель микроструктур формировалась в программе Solidworks, а затем в программе Simplify3D разбивалась на слои, параллельные плоскости подложки, с однонаправленной "штриховкой" лазерной перетяжкой в каждом слое. Оптимальные значения шага между слоями (100 нм) и шага штриховки (70 нм) были определены из тестовых измерений. По завершении печати микроструктуры проявлялись в проявителе OrmoDev.

Описанный метод ДФЛЛ был использован в данной работе для изготовления серии трехмерных волноводов длиной 20 мкм и с диаметром до 2 мкм, поднятых над подложкой с помощью призменных адаптеров ввода–вывода излучения на высоту 10 мкм; использованная в работе схема микроструктур описана в [14]. Изображения структур в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) приведены на рис. 1; реализована печать прямых и изогнутых волноводов, свободно расположенных над подложкой, либо с промежуточной опорой (рис. 1c, d). О высоком качестве печати свидетельствуют четкие границы структур и их хорошая воспроизводимость в серии. Призменные адаптеры ввода – вывода излучения, помимо своего основного функционала, обеспечивали расположение волноводов над подложкой на высоте 10 мкм, что резко снижало потери оптического излучения в структуре.

3. Спектры пропускания системы адаптеры + волновод. Измерение спектральной зависимости пропускания волновода проводилось с использованием в качестве источника линейно-

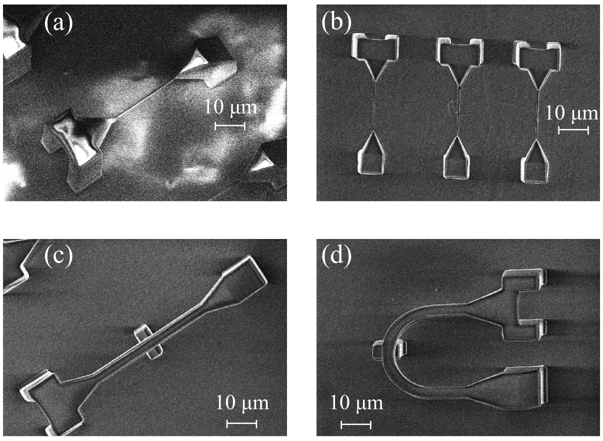

Рис. 1. СЭМ изображения изготовленных методом ДФЛЛ оптических волноводов, приподнятых над поверхностью подложки на призменных адаптерах: (a) – волновод длиной 20 мкм и диаметром 2 мкм с призменными адаптерами; (b) – серия волноводов диаметром 1–2 мкм; (c) – волновод с дополнительной промежуточной поддержкой; (d) – изогнутый волновод с поддержкой

поляризованного излучения параметрического фемтосекундного генератора TOPOL-1050-C фирмы ООО "Авеста-Проект" с перестраиваемой длиной волны излучения в диапазоне 700–1000 нм и 1100–2400 нм и длительностью импульса 130–200 фс в зависимости от длины волны; для контроля поляризации зондирующего излучения использовался двойной ромб Френеля, дополнительный контроль ориентации плоскости поляризации зондирующего излучения обеспечивался призмой Глана–Тейлора, расположенной непосредственно перед фокусирующим объективом. При проведении измерений спектра пропускания s- или p-поляризованное излучение заводилось в структуру при помощи объектива Mitutoyo M Plan APO 100x/0.7NA, формирующего перетяжку на входном торце волновода. Прошедший через волновод лазерный пучок коллимировался вторым аналогичным объективом и фокусировался тубусной линзой на диафрагму, которая выделяла сигнал с выходного адаптера волновода из области диаметром 20 мкм; измерение мощности выходного и референсного каналов проводилось одновременно с помощью двух интегрирующих сфер Thorlabs S145C на основе InGaAs фотодиода (рабочий диапазон 700–1700 нм). Сканирование спектральных зависимостей проводилось с шагом 5 нм по длине волны сигнального канала параметрического генератора света, подстройка положения пучка относительно входного адаптера проводилась в середине спектральных диапазонов на максимум пропускания структур. Измеренные спектры пропускания системы адаптеры + волновод нормировались на спектральную зависимость мощности прошедшего излучения для покровного стекла без волноводной структуры при идентичной конфигурации экспериментальной установки.

На рисунке 2a представлен набор изображений волновода с адаптерами в конфокальном микроскопе при заведении p-поляризованного излучения накачки во входной призменный адаптер (расположенный на рисунке слева) и регистрацией общей картины рассеяния излучения при длинах волн накачки: 700, 800, 1105, 1188 нм. Модовая картина излучения видна на выходе из призменного адаптера (на рисунке справа). Для излучения с длинами волн 1105 и 1188 нм наблюдаются две моды, при меньших длинах волн модовая структура становится сложнее и менее однородной. Схожая картина модового состава излучения наблюдалась при заведении в структуру s-поляризованного излучения. Максимум пропускания такие адаптеры демонстрировали при смещении пучка на входном адаптере приблизительно на 2 мкм от центра основания призмы в сторону наружного края, т.е. при $x \approx 3$ мкм (см. рис. 2a), при этом выходной пучок также был смещен от центра основания призмы в сторону наружного края. Данная особенность связана с проявлением эффекта Гуса–Хенкен при полном внутреннем отражении от грани призменного адаптера. Стоит отметить, что одномодовый режим в представленном волноводе реализуется в диапазоне длин волн 2800–3400 нм.

Полученные спектральные зависимости пропускания структуры (рис. 2b) указывают на относительно высокую эффективность представленных 3D волноводных структур в рассмотренном диапазоне длин волн: их максимальный коэффициент пропускания приближается к 43 % при 850 нм. При этом спектр пропускания имеет осциллирующую зависимость, что связано с изменением модового состава излучения, распространяющегося по волноводу, при сканировании по длине волны.

Эксперимент был дополнен численными расчетами, выполненными методом FDTD в программе Ansy Lumerical 2020; был проведен расчет распределения оптического поля в разных слоях структуры и получен спектр ее пропускания с учетом особенностей прохождения излучения в адаптерах и волноводе. На рисунке 3a представлена 3D модель волноводной структуры, визуализированная в этой программе. Структура представляет собой систему из двух призм, соединенных пирамидальными адаптерами с волноводом прямоугольного сечения с раз-

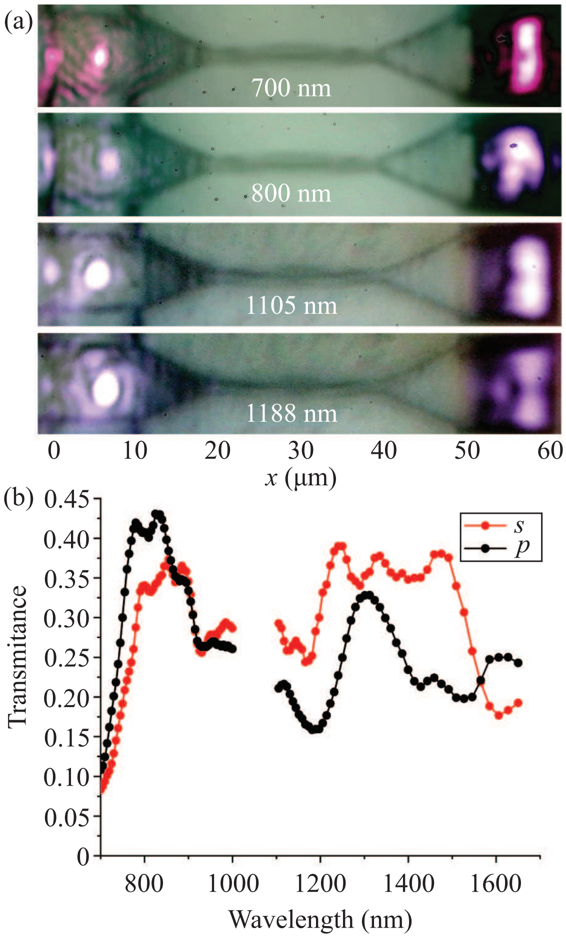

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Изображения в установке конфокальной микроскопии, демонстрирующее пропускание свет через систему волновод + адаптеры для p-поляризованного излучения на 4-х различных длинах волн. Световое пятно слева – излучение накачки, преломленное на входном призменном адаптере при фокусировке объективом Mitutoyo M Plan Apo 100x/0.7NA. Световое пятно справа – излучение, прошедшее через волновод и вышедшее через адаптер в сторону собирающего объектива Mitutoyo Plan Apo 100x/0.7NA. (b) – Измеренные спектры пропускания системы адаптеры + волновод для p- и s-поляризованного излучения

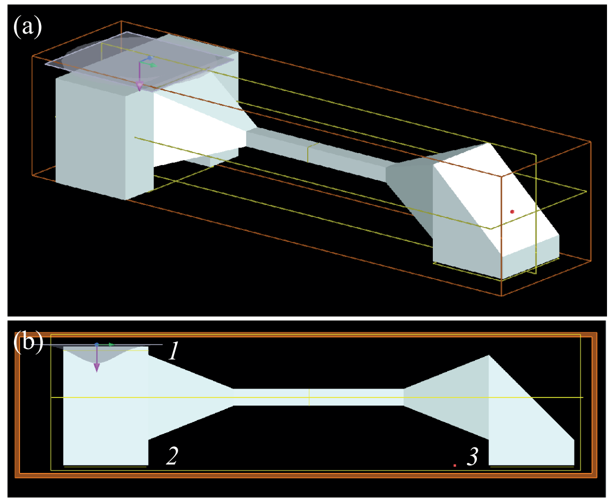

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – 3D модель волноводной структуры, визуализированная в программе Ansy Lumerical 2020. Излучение накачки падает сверху на адаптер, расположенный слева, отражается от наклонной грани призмы, фокусируется на торец волновода, проходит его и, отражаясь вниз от призменного адаптера, расположенного справа, выходит в сторону монитора *3*. (b) – Вид сбоку 3D модели волновода; цифрами указано расположение мониторов, которые показывают распределение интенсивности входного пучка (*1*), преломленного на первой призме пучка (*2*) и прошедшего через волноводную структуру (*3*) соответственно

мерами $20 \times 2 \times 2$ мкм. Фиолетовая стрелка указывает направление распространения падающего излучения, голубая стрелка обозначает его поляризацию (рис. 3a). Оранжевый параллелепипед ограничивает область моделирования, желтые прямоугольники обозначают мониторы наблюдения, строящие пространственное распределение интенсивности (рис. 3a). Было рассмотрено заведение в систему сходящегося оптического пучка с параметрами, реализованными в эксперименте.

На рисунке 3b представлена та же структура, вид сбоку. Следует отметить, что монитор 2 при наличии волновода во всем диапазоне длин волн показывал ненулевое значение мощности изучения, прошедшего через первую призму, тогда как в теории призма должна обеспечивать полное внутреннее отражение. Можно предположить, что наличие прошедшего излучения связано с использованием высокоапертурного объектива при заведении излучения в систему: поскольку пучок падающего излучения сходится очень быстро, на расстояниях порядка размера самой структуры (адаптера), то появляются компоненты пучка, распространяющиеся под углами, для которых условие полного внутреннего отражения не выполняется.

Рассчитанные спектры пропускания приведены на рис. 4a. В области коротких длин волн коэффициент пропускания всей структуры составляет 30–40 %, затем он постепенно уменьшается до ≈ 20 % в окрестности длины волны 1600 нм; при этом пропускание s-поляризованного изучения выше, что соответствует данным эксперимента. Снижение пропускания в длинноволновой области спектра может быть связано с малым сечением волновода, сопоставимым с длиной волны света λ.

На рисунке 4b представлено распределение квадрата напряженности электрического поля световой

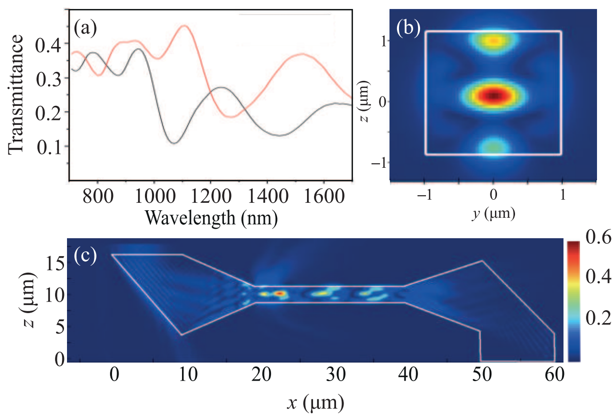

Рис. 4. (Цветной онлайн) Результаты моделирования методом FDTD системы волновод + адаптеры. (a) – Графики коэффициента пропускания системы волновод + адаптеры для *s*- (красные символы) и *p*-поляризованного (черные символы) излучения. (b) – Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении волновода на длине волны 1105 нм для *p*-поляризованного излучении. Белым контуром отмечено сечение волновода. (c) – Распределение интенсивности излучения вдоль волновода на длине волны 1105 нм при *p*-поляризованном излучении на входе (на рисунке слева). Белым контуром отмечены границы структуры

волны в поперечном сечении волновода вблизи его середины для $\lambda = 1105$ нм. Видно, что в данном случае реализуется трехмодовый режим распространения излучения. Это также наблюдается на продольном сечении волновода (см. рис. 4c), отражающем неоднородное распределение поля: видны области его локализации, соответствующие маломодовому режиму распространения излучения. В области входного адаптера видна утечка излучения через призму при $x = 10$ мкм, а также в области перехода конуса в волновод при $x = 20$ мкм (см. рис. 4c).

4. Заключение. Таким образом, в данной работе продемонстрированы возможности ДФЛЛ по формированию трехмерных волноводных систем, состоящих из призменных адаптеров ввода и вывода оптического излучения и (прямого или искривленного) волновода, расположенного между ними и поднятого над подложкой приблизительно на 10 микрон. Экспериментальные спектры пропускания показывают, что данные структуры обладают достаточно высоким пропусканием (20–40 %) в широком спектральном диапазоне, что определяет возможность их использования для эффективного и простого заведения излучения в волноводы, используемые для построения ФИС, а также обеспечения оптической связи с такими элементами интегральной фотоники, как дисковые или кольцевые оптические резонаторы, фотонные кристаллы, и проч. Выполненные расчеты оптических свойств данного вида трехмерных волноводных структур находятся в соответствии с экспериментальными результатами и предсказывают возможность их применения в более длинноволновой части спектра.

Заметим, что в работе использован наиболее простой вид адаптеров с плоской заводящей поверхностью призмы, для которого, очевидно, проявляются различные негативные эффекты, зависящие от длин волн проходящего излучения; к их числу следует отнести частотно-зависимое распределение оптического поля в адаптере, параметры его фокусировки в волновод, рассеяние в области сопряжения конусной части адаптера и волновода, зависимость параметров полного внутреннего отражения от формы адаптера и длины волны излучения. Вопрос оптимизации параметров адаптеров, использующих эффект полного внутреннего отражения для волноводных структур, требует отдельного исследования.

Авторы выражают благодарность Дагесяну С.А. за помощь в получении СЭМ изображений микроструктур.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант #24-42-02009. Эксперименты были выполнены с использованием оборудования, предоставленного по программе развития МГУ имени М. В. Ломоносова соглашение #126 от 01/03/2022.

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

1. I. V. Dyakonov, I. A. Pogorelov, I. B. Bobrov, A. A. Kalinkin, S. S. Straupe, S. P. Kulik, P. V. Dyakonov, and S. A. Evlashin, Phys. Rev. Appl. **10**, 044048 (2018).
2. A. Kalinkin, M. Saygin, A. Abroskin, I. Radchenko, S. Straupe, and S. Kulik, Appl. Phys. B **122**, 09 2016.
3. A. Pimpin and W. Srituravanich, Engineering Journal **16**, 37 (2012).
4. E. Sharma, R. Rathi, J. Misharwal, B. Sinhmar, S. Kumari, J. Dalal, and A. Kumar, Nanomaterials **12**(16), 2754 (2022).
5. S. Kawata, H.-B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, Nature **412**, 697 (2001).
6. A. Selimis, V. Mironov, and M. Farsari, Microelectronic Engineering **132**, 01 2014.
7. И. Шишкин, К. Самусев, М. Рыбин, М. Лимонов, Р. Киян, Ч. Чичков, Ю. Кившарь, П. Белов, Физика твердого тела **56**(11), 2097 (2014).

8. V. Harinarayana and Y. Shin, Optics & Laser Technology **142**, 107180 (2021).
9. A. Jaiswal, C.K. Rastogi, S. Rani, G. P. Singh, S. Saxena, and S. Shukla, iScience **26**(4), 106374 (2023).
10. 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, J. Phys. D: Appl. Phys. **53**(35), 355102 (2020).
11. A. Pisarenko, R. Zvagelsky, D. Kolymagin, B. Katanchiev, A. Vitukhnovsky, and D. Chubich, Optik **201**, 163350 (2020).
12. A. G. Vitukhnovsky, D. A. Chubich, S. P. Eliseev, V. V. Sychev, D. A. Kolymagin, and A. S. Selyukov, Journal of Russian Laser Research **3**(4), 375 (2017).
13. M. I. Sharipova, T. G. Baluyan, K. A. Abrashitova, G. E. Kulagin, A. K. Petrov, A. S. Chizhov, T. B. Shatalova, D. Chubich, D. A. Kolymagin, A. G. Vitukhnovsky, V. O. Bessonov, and A. A. Fedyanin, Opt. Mater. Express **11**(2), 371 (2021).
14. А. Майдыковский, Д. Апостолов, Е. Мамонов, Д. Копылов, С. Дагесян, Т. Мурзина, Письма в ЖЭТФ **117**(1–2), 37 (2023).
15. A. Maydykovskiy, E. Mamonov, N. Mitetelo, S. Soria, and T. Murzina, JETP Lett. **115**(5), 261 (2022).
16. D. A. Kopylov, M. N. Esaulkov, I. I. Kuritsyn, A. O. Mavritskiy, B. E. Perminov, A. V. Konyashchenko, T. V. Murzina, and A. I. Maydykovskiy, Laser Phys. Lett. **15**(4), 045001 (2018).
17. Micro resist technology GmbH. [Online]. Available: http://www.microresist.de/produkt/ormocomp/ (2024).