Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 1, с. 37 – 42

Двухфотонная лазерная печать функциональных микроструктур интегральной фотоники: волноводов, микрорезонаторов и призменных адаптеров ввода/вывода оптического излучения

А. И. Майдыковский[+1)], *Д. А. Апостолов*[+], *Е. А. Мамонов*[+*], *Д. А. Копылов*[+], *С. А. Дагесян*[+], *Т. В. Мурзина*[+*]

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

[*]*Факультет физики, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 109028 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 20 октября 2022 г.
После переработки 10 ноября 2022 г.
Принята к публикации 11 ноября 2022 г.

Разработка и оптимизация методов создания функциональных элементов микронных и субмикронных размеров для фотонных интегральных схем является одной из основных задач нанофотоники. В настоящее время активно развивается метод двухфотонной лазерной литографии (ДФЛЛ), позволяющий формировать трехмерные структуры с субволновым разрешением. В данной работе продемонстрированы результаты по развитию этого метода и показано, что использование оптимизированных схем печати, пространственной фильтрации используемого лазерного излучения, введение в полимер лазерных красителей приводит как к формированию оптически однородных и качественных объемных микрострутур с характерными особенностями вплоть до 300 нм, так и приданию им функциональных свойств. Возможности данного оптимизированного метода ДФЛЛ продемонстрированы на примере кольцевых микрорезонаторов и расположенных над подложкой оптических волноводов с призменными адаптерами ввода/вывода излучения. Оптические потери при заведении излучения в волновод на длине волны 405 нм с помощью напечатанного призменного адаптера составили не более 1.25 дБ.

DOI: 10.31857/S1234567823010044, EDN: nverov

1. Введение. Развитие методов создания качественных элементов фотоники для использования в фотонных интегральных схемах (ФИС) является актуальной научно-исследовательской задачей. В настоящее время активные и пассивные фотонные микроструктуры изготавливают преимущественно методами планарной литографии. Перспективным является переход к трехмерным фотонным структурам, которые при интегрировании в ФИС могут выполнять функции межчиповых соединений, осуществлять эффективный ввод и вывод излучения в элементы ФИС, позволят упростить топологию схем и оптических логических элементов. Аддитивные методы производства, такие как стереолитография, позволяют не только создавать принципиально новые 3D оптические элементы, но и превосходить возможности планарной литографии: в последнем случае для изготовления трехмерных структур выполняется их послойный рост, что увеличивает время изготовления фотонных чипов. Одним из наиболее перспективных видов стереофотографии является метод двухфотонной фотополимеризации, являющейся модификацией метода прямой лазерной записи (*Direct Laser Writing* – DLW-фотолитография) с существенным увеличением разрешения за счет использования эффекта двухфотонного поглощения в области перетяжки сфокусированного пучка фемтосекундного лазерного излучения [1, 2]. Возможности данного метода были продемонстрированы при изготовлении трехмерного фотонного кристалла яблоновит [3] с линейными размерами элементарных структурных элементов не более 300 нм, реализации эффективного соединения фотонных чипов и устройств ввода/вывода излучения [4, 5], изготовления широкополосного поляризационного делителя пучка и ротатора поляризации излучения [6]. Важными элементами интегральных фотонных схем являются микрорезонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) – прозрачные диэлектрические структуры, имеющие осевую или центральную симметрию (торы, кольца, сферы, квадраты, пятиугольники и.т.д.) [7]. Наличие добротных резонаторных мод позволяет использовать такие микроструктуры в качестве фильтров [8, 9], микролазеров с оптической [10, 11] или электриче-

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

ской накачкой [12, 13], сенсоров [14–16], модуляторов [17], а также позволяет усиливать нелинейно-оптические эффекты за счет пространственной локализации электромагнитного поля вблизи их поверхности. Интерес также представляет изготовление металл-диэлектрических наноструктур, где за счет большей локализации поля возможно эффективное управление светом. Такой подход был развит в работе [18] где было показано, что объединение методики двухфотонной лазерной литографии и электронно лучевой литографии позволяет изготавливать трехмерные металл-диэлектрические гибридные метаматериалы.

Таким образом, перспективным является развитие метода двухфотонной лазерной литографии (ДФЛЛ) для изготовления 3D микрорезонаторов МШГ, в том числе активированных люминесцирующими частицами или веществами. Необходимым направлением развития данной области является изготовление модулей фотонных устройств, сочетающих микроволноводы и активные микрорезонаторы, при минимизации оптических потерь связанных с утечкой излучения в подложку.

В данной работе приведены результаты по оптимизации метода ДФЛЛ для повышения качества изготовления оптических микроструктур, волноводов и связанных с ними микрорезонаторов. Выполнены сравнительные исследования структур, изготовленных в рамках стандартного и оптимизированного подходов ДФЛЛ. Показано, что предложенная методика ДФЛЛ позволяет изготавливать в том числе волноводы, приподнятые над подложкой на специально сконструированных оптических призменных адаптерах, а также представлена методика формирования комбинированных активных и пассивных фотонных микроструктур.

2. Экспериментальные результаты.

2.1. Методика эксперимента. Изготовление микроструктур методом ДФЛЛ проводилось на экспериментальной установке, описание которой приведено в работе [7]. Источником излучения накачки являлся лазер на титанате сапфира Tif-DP фирмы ООО "Авеста" с прямой диодной накачкой [19], длиной волны излучения 780 нм, длительностью импульса 76 фс и частотой повторения импульсов 80 МГц. Лазерное излучение проходило через акустооптический модулятор, телескоп 5x, совмещенный с пространственным фильтром основной поперечной гауссовой моды лазерного пучка, затем попадало на гальваносканер D1105 Sino-Galvo, который был использован для позиционирования перетяжки лазерного пучка в латеральной плоскости рабочего объема. Гальваносканер находился в фокусе входной линзы телескопа 2x, а входная апертура иммерсионного объектива (Nikon Plan APO VC 60x/1.4NA) – в фокусе выходной линзы телескопа 2x. Позиционирование перетяжки лазерного излучения в полимере вдоль оптической оси осуществлялось перемещением объектива пьезотранслятором в диапазоне 40 мкм. "Грубое" позиционирование подложки с полимером по 3-м осям осуществлялось с помощью шаговых двигателей. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

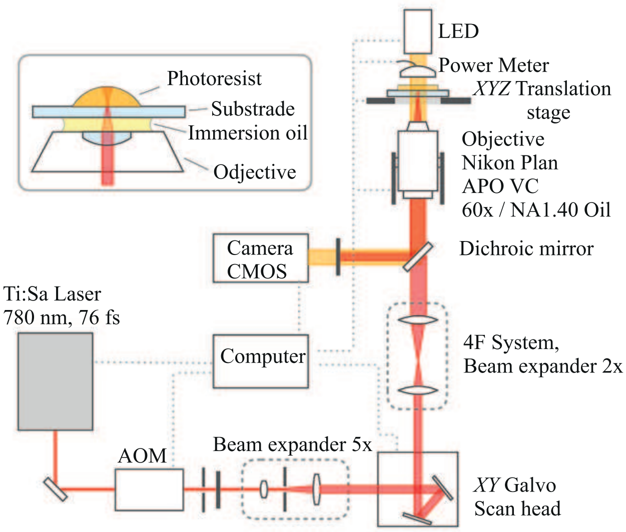

Рис. 1. (Цветной онлайн) Принципиальная схема экспериментальной установки для ДФЛЛ. Красным цветом отображен ход пучка накачки, желтым – канал подсветки. В качестве накачки использовано излучение титан-сапфирового лазера Tif-DP ООО "Авеста", АОМ – акустооптический модулятор

В качестве основного материала для изготовления микроструктур был использован гибридный фотополимер OrmoComp® с показателем преломления 1.520 производства Micro Resist Technology, в состав которого входит фотоинициатор Дифенил (2, 4, 6-триметилбензоил) фосфин оксид. Для формирования микроструктур методом ДФЛЛ фотополимер в количестве 5 мкл наносился на покровное стекло толщиной 170 мкм, согласованной с иммерсионным объективом. С целью получения активных [20] микроструктур мы добавляли в OrmoComp® краситель кумарин-1 (7-диэтиламино-4-метилкумарин) в концентрации 0.36 моль/л, который также выступал в роли фотоинициатора полимеризации [21], что снижало порог полимеризации по мощности на порядок. Краситель кумарин-1 растворяли в проявителе OrmoDev®, состоящем из метилизобутилкетона и изопропанола. Полученный раствор смешивался с фотополимером OrmoComp® в соотношении 1:1 по объему для лучшего растворения красителя. При использовании композиции с красителем, после нанесения на покровное стекло она выдерживалась при температуре 60 °C в течении 60 минут для выпаривания проявителя OrmoDev®. Скорость печати составляла 500 мкм/с, при мощности лазерного излучения 31 мВт для чистого полимера OrmoComp®, и 3 мВт для смеси полимера с красителем кумарин-1, что, в соответствии с проведенными калибровочными экспериментами, позволяло получать фотополимеризованные структуры с максимальным разрешением. Приведенные значения мощности измерены на входе гальваносканера. Оптические потери в установке от гальваносканера до покровного стекла составляли 50 %. Цифровая 3D-модель для печати формировалась в программе трехмерного проектирования Solidworks, затем готовилась для вывода на печать с помощью программы Simplify3D, модель разбивалась на слои, параллельные подложке с однонаправленной штриховкой лазерной перетяжкой в каждом слое. В процессе тестовых измерений были определены параметры шага между слоями 100 нм, и шаг штриховки 70 нм, что соответствует примерно 1/3 от линейных размеров вокселя. При таких параметрах печати, удавалось получить приемлемую геометрическую стабильность изготовленных оптических микроструктур. После процесса печати структуры проявлялись в проявителе OrmoDev®.

2.2. Тестирование методики ДФЛЛ – подвешенные полимерные нити. Для определения максимального разрешения созданной экспериментальной установки были изготовлены тестовые структуры в виде полимерных нитей на пьедесталах, их СЭМ изображения приведены на рис. 1. Использовался полимер OrmoComp® с красителем кумарин-1 с концентрацией 0.36 моль/л. Данные структуры состояли из двух пьедесталов с основанием 4×10 мкм^2 и высотой 10 мкм. Между пьедесталами за один проход лазерного пучка в полимере формировалась перемычка при различной скорости движения перетяжки и мощности излучения. В напечатанной серии определялись параметры печати для достижения минимального размера вокселя в нашей установке, оптимальная скорость движения перетяжки составила 500 мкм/с, мощность – 1.5 мВт на выходе из объектива.

Размеры определялись по данным СЭМ изображений. На панелях a и b рис. 2 приведены изображения структур, изготовленных в отсутствие и при наличии пространственного фильтра основной поперечной гауссовой моды лазерного пучка. В первом случае минимально достижимые поперечные размеры нити (ширина и высота) составляют 660×690 нм, тогда как использование пространственного фильтра позволяет их уменьшить до 250×325 нм. Таким образом показано, что оптимизация размера и пространственной формы пучка накачки позволяют значительно уменьшить размер полимеризуемой области. В свою очередь это позволяет улучшить качество формируемых полимерных структур различной формы.

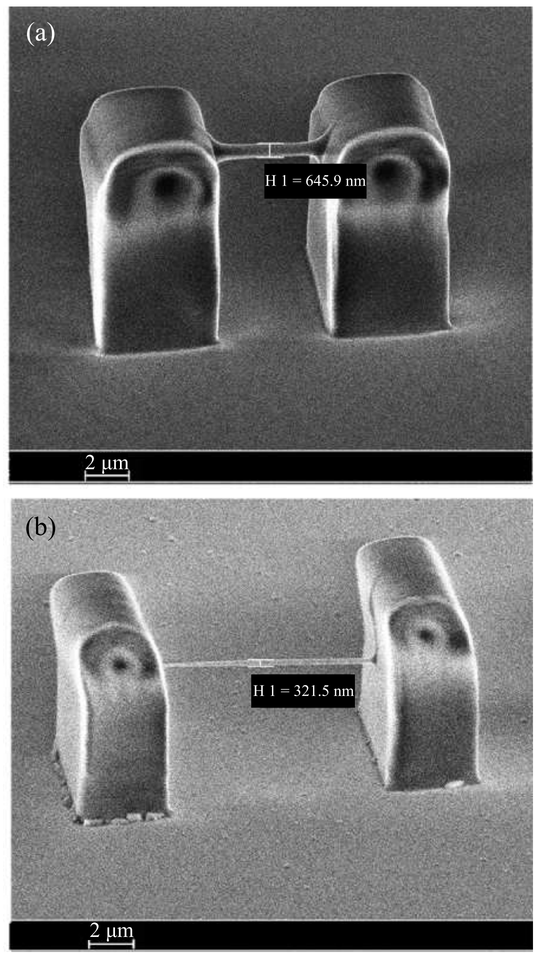

Рис. 2. СЭМ изображение калибровочной структуры, состоящей из двух пьедесталов и перемычки (нити) между ними длиной 10 мкм, напечатанной в один проход движения перетяжки лазерного излучения: (a) – в отсутствие пространственного фильтра в пучке накачки, поперечные размеры нити (ширина и высота) составили 660×690 нм; (b) – в присутствии пространственного фильтра, поперечные размеры нити 250×325 нм

2.3. Оптические волноводы и микрорезонаторы. Одной из основных задач при создании ФИС является минимизация оптических потерь, возникающих за счет утечки излучения в подложку, имеющих место из-за близости показателя преломления полимера $n_p = 1.520$ и стеклянной подложки $n_s = 1.523$. Если для микрорезонаторов это ограничение можно обойти использованием достаточно большой высоты микроструктуры [22], то для волноводов данный эффект существенно снижает их эффективность. Одним из способов решения данной проблемы является расположение элементов ФИС над подложкой [23, 24] с опорой на вспомогательные элементы.

Была создана структура, представленная на рис. 3, реализующая систему волновод с призменными адаптерами, в которой входящий и выходящий световые пучки сонаправлены; размеры структуры в микрометрах приведены на рисунке. Для заведения и выведения излучения из волновода в структуре коннектора использованы дополнительные элементы в форме тетраэдров. Было определено, что оптимальной траекторией движения лазерной перетяжки является параллельная "штриховка" поперек волновода в каждом слое при печати волновода, это позволяет избежать сильных искажений и деформации полимеризованного волновода. Определение потерь в напечатанной структуре проводилось на экспериментальной установке по микроскопии, фокусировка излучения на входной торец призмы осуществлялась объективомMitutoyo M Plan Apo 100x/0.7NA, сбор излучения с выходной призмы осуществлялся таким же объективом с противоположной стороны. Оптические потери такой структуры на длине волны 405 нм при использовании волновода с диаметром 2 мкм составили 1.25 дБ на один призменный адаптер, что является сравнимым значением для адаптеров на основе дифракционных решеток, значение потерь в которых, как правило [25], лежит в диапазоне 1.2 дБ [26]-5.1 дБ [27] для телекоммуникационного диапазона длин волн. При этом эффективность реализованных призменных коннекторов слабо зависит от конкретной длины волны, и угла падения излучения, чего невозможно достичь для адаптеров на базе дифракционных решеток.

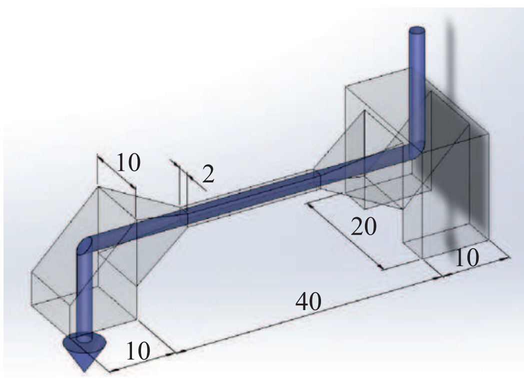

Рис. 3. (Цветной онлайн) Трехмерная модель волновода с призменными адаптерами заведения/выведения излучения, размеры структуры приведены в микрометрах, синим цветом показан ход лазерного излучения. Высота структуры 16 мкм

Также отметим, что данная схема призменных адаптеров заведения/выведения оптического излучения совместима со структурами из различных материалов, в том числе с оптическим волокном.

В соответствии с данной схемой методом ДФЛЛ были изготовлены активные волноводы, оптически несвязанные с подложкой, из полимера OrmoComp® с красителем кумарин-1. На Рисунке 4 приведено оптическое изображение фотолюминесценции (ФЛ) такого волновода с диаметром 2 мкм, регистрация изображения проводилась в спектральном диапазоне 450–600 нм. Излучение накачки с длиной волны 405 нм фокусировалось на призменный оптический коннектор (на рис. 3 справа), которое возбуждало ФЛ красителя. Спектр фотолюминесценции красителя кумарин-1 имеет максимум на длине волны 439 нм в полимере OrmoComp®. Наличие красителя в структуре позволяет визуализировать распространение излучения накачки – в данном случае оно успешно проходит через коннектор, заводится в волновод и переходит в принимающую призму, причем сравнимая яркость ФЛ в заводящей и выводящей призмах указывает на хорошую прозрач-

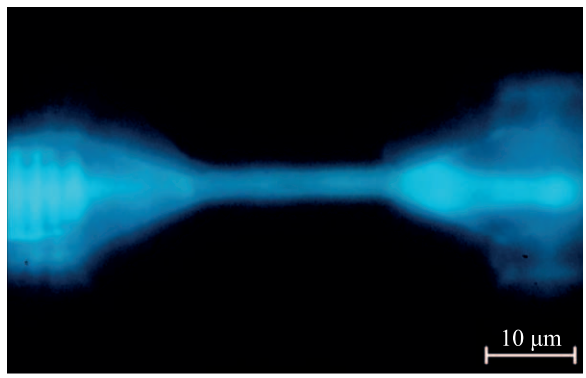

Рис. 4. (Цветной онлайн) Оптическое изображение в спектральном диапазоне 450–600 нм волновода при распространении лазерного излучения с длиной волны 405 нм, фокусируемого в призму, расположенную на рисунке справа. Материал структуры – OrmoComp® с красителем кумарин-1 в концентрации 0.36 моль/л

ность структуры. Пространственная модуляция излучения флуоресценции на торце выводной призмы связана с неоднородностью ДФЛЛ печати и соответствующей неоднородностью распределения красителя в материале призмы.

Описанный выше метод ДФЛЛ изготовления призменных коннекторов и волноводов, отделенных от подложки, был затем использован для формирования тестовых структур на основе связанного кольцевого резонатора и волновода. На рисунке 5 приведено СЭМ изображение волновода с диаметром около 2 мкм, расположенного на высоте 10 мкм над поверхностью подложки, с описанной выше призменной системой заведения/выведения излучения, и полого цилиндра с внешним диаметром 10 мкм, боковая поверхность которого отстоит от волновода на расстояние приблизительно 1 мкм; длина волновода составляет 20 мкм. Волновод изготовлен из материала OrmoComp®, тогда как резонатор активирован красителем кумарин-1. ДФЛЛ печать такой структуры проводилась в два этапа: вначале наносился слой чистого полимера OrmoComp® и печаталась структура подвешенного волновода, затем незасвеченная часть полимера удалялась с помощью проявителя OrmoDev®. На следующем этапе на подложку с волноводом наносился OrmoComp® с красителем, высушивался в течении 60 мин и печатался микрорезонатор таким образом, чтобы обеспечить требуемый зазор между ним и волноводом.

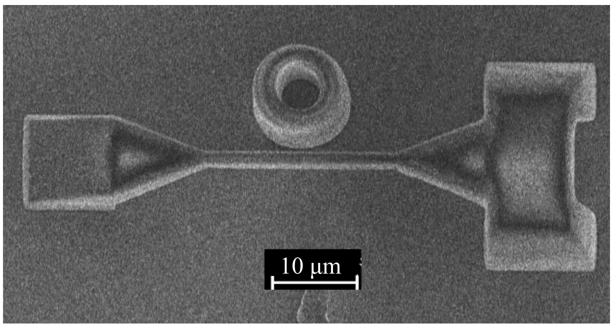

Рис. 5. СЭМ изображение волновода, расположенного на высоте 10 мкм над подложкой, с призменной системой заведения/выведения излучения, и полого цилиндра с диаметром 10 мкм, внешняя боковая поверхность которого отстоит от волновода на 1 мкм. Скорость печати 500 мкм/с

На рисунке 6a показано оптическое изображение структуры волновод и активный микрорезонатор; в данном эксперименте структура одновременно освещается белым светом и светом ультрафиолетового диода на длине волны 365 нм, который вызывает флуоресценцию красителя кумарин-1 в полимере OrmoComp®, из которого состоит только микрорезонатор. На рисунке 6b приведено изображение этой же структуры при подсветке только УФ диодом. В этом случае на фотографии не видно призменных коннекторов и волновода, материал которых не содержит краситель, люминесцирующий под действием УФ излучения. В то же время, наблюдается яркий сигнал ФЛ кумарина-1 в области микрорезонатора и выход этого излучения из выводящего коннектора, расположенного на рисунке 6 справа, что указывает на реализацию оптической связи волновода и оптического микрорезонатора. Отсутствие сигнала ФЛ в области коннектора, расположенного с другой стороны от микрорезонатора, связано с его конструкцией - выходящее из него излучение направляется преимущественно в сторону от детектора (см. рис. 3), поэтому его детектируемая интенсивность много меньше. Аналогичные результаты получены для целого набора структур волновод и активный микрорезонатор с разными параметрами. Таким образом, показана эффективность предложенной методики ДФЛЛ для изготовления комбинированных активных и пассивных фотонных микроструктур.

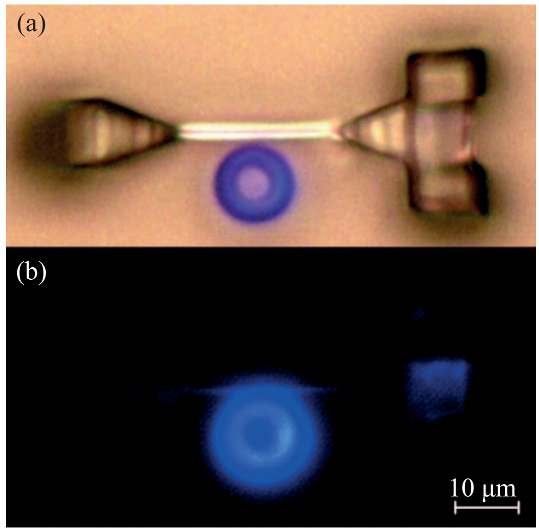

Рис. 6. (Цветной онлайн) Оптическое изображение волновода и расположенного рядом полого цилиндра диаметром 10 мкм при подсветке: (a) – галогеновой лампой (белый свет) и УФ диодом (длина волны излучения 365 нм); и (b) – только УФ диодом. Материал волновода: чистый полимер OrmoComp®; материал полого цилиндра – OrmoComp® с красителем кумарин-1

3. Заключение. Таким образом, в данной работе представлены результаты по развитию метода двухфотонной лазерной печати с помощью излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера из гибридного фотополимера OrmoComp®, активированного красителем кумарин-1. На основе анализа ряда структур, таких как свободно расположенные волноводы, системы волновод и кольцевой микрорезонатор, показано, что использование пространственного фильтра гауссовой моды приводит к возрастанию качества напечатанных микроструктур: достигается уменьшение радиуса закруглений, формирование более четких краев структуры и возрастание ее однородности. Функциональные возможности метода для печати элементов интегральной фотоники продемонстрированы на примере связанных пассивного волновода, поднятого над подложкой, и кольцевого резонатора, активированного красителем. Созданы призменные микроадаптеры ввода/вывода излучения в/из волновода с потерями не более 1.25 дБ на адаптер.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 20-52-7819 и Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина”.

1. S. Kawata, H.-B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, Nature **412**, 697 (2001).
2. S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata, Opt. Lett., **22**(2), 132 (1997).
3. I.I. Shishkin, M.V. Rybin, K.B. Samusev, M.F. Limonov, R.V. Kiyan, B.N. Chichkov, Y.S. Kivshar, and P.A. Belov, JETP Lett. **99**(9), 531 (2014).
4. A.G. Vitukhnovskya, R.D. Zvagelskya, D.A. Kolymagina, A.V. Pisarenkoa, and D.A. Chubicha, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **84**(7), 927 (2020).
5. H. Gao, G.F.R. Chen, P. Xing, J.W. Choi, H.Y. Low, and D.T.H. Tan, Adv. Opt. Mater. **8**(18), 2000613 (2020).
6. P.-I. Dietrich, M. Blaicher, I. Reuter, M. Billah, T. Hoose, A. Hofmann, C. Caer, R. Dangel, B. Offrein, U. Troppenz, W. Freude, and C. Koos, Nature Photon. **12**, 241 (2018).
7. A. Maydykovskiy, E. Mamonov, N. Mitetelo, S. Soria, and T. Murzina, JETP Lett. **115**(5), 261 (2022).
8. S.P. Vyatchanin, M.L. Gorodetskii, and V.S. ll’chenko, Journal of Applied Spectroscopy **56**, 182 (1992).
9. A.A. Savchenkov, W. Liang, A.B. Matsko, V.S. Ilchenko, D. Seidel, and L. Maleki, Opt. Lett. **34**(9), 1318 (2009).
10. X. Wang, Q. Liao, Q. Kong, Y. Zhang, Z. Xu, X. Lu, and H. Fu, Angewandte Chemie International Edition **53**(23), 5863 (2014).
11. A.P. Tarasov, A.S. Lavrikov, L.A. Zadorozhnaya, and V.M. Kanevsky, JETP Lett. **115**(9), 502 (2022).
12. K.H. Li, Y.F. Cheung, W.Y. Fu, and H.W. Choi, Appl. Phys. Lett. **119**(10), 101106 (2021).
13. M. Fujita, A. Sakai, and T. Baba, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **5**(3), 673 (1999).
14. F. Vollmer and S. Arnold, Nat. Methods **5**(7), 591 (2008).
15. G. Guan, S. Arnold, and M. V. Otugen, AIAA J. **44**(10), 2385 (2006).
16. 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, Adv. Opt. Mater. **7**(20), 1900602 (2019).
17. D. Venkatakrishnarao, M. A. Mohiddon, N. Chandrasekhar, and R. Chandrasekar, Adv. Opt. Mater. **3**(8), 1035 (2015).
18. I. Staude, M. Decker, M.J. Ventura, C. Jagadish, D.N. Neshev, M. Gu, and Y. S. Kivshar, Adv. Mater. **25**(9), 1260 (2013).
19. 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).
20. G.O. Dias, O. Lecarme, J. Cordeiro, E. Picard, and D. Peyrade, Microelectronic Engineering **257**, 111751 (2022).
21. F. Dumur, Eur. Polym. J. **163**, 110962 (2022).
22. N.B. Tomazio, L.D. Boni, and C.R. Mendonca, Sci. Rep. **7**(1), 1 (2017).
23. R.M.R. Adao, T.L. Alves, C. Maibohm, B. Romeira, and J.B. Nieder, Opt. Express **30**(6), 9623 (2022).
24. S. Zhang, S.-J. Tang, S. Feng, Y.-F. Xiao, W. Cui, X. Wang, W. Sun, J. Ye, P. Han, X. Zhanga, and Y. Zhang, Adv. Opt. Mater. **7**(20), 1900602 (2019).
25. L. Cheng, S. Mao, Z. Li, Y. Han, and H. Y. Fu, Micromachines **11**(7), 666 (2020).
26. X. Chen, C. Li, C.K.Y. Fung, S.M.G. Lo, and H.K. Tsang, IEEE Photonics Technol. Lett. **22**(15), 1156 (2010).
27. D. Taillaert, F.V. Laere, M. Ayre, W. Bogaerts, D.V. Thourhout, P. Bienstman, and R. Baets, Jpn. J. Appl. Phys. **45**(8A), 6071 (2006).