

Элементы ввода–вывода оптического излучения для субволновых волноводов на основе поверхностей второго порядка, изготовленные методом двухфотонной лазерной литографии

И.О. Батуев,^{1,*} К.А. Смирнов,¹ И.И. Циняйкин,¹ Т.В. Мурзина,¹ А.И. Майдыковский¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 28.11.2024; после доработки 10.02.2025; подписана в печать 13.03.2025)

Элементы ввода–вывода излучения являются важным связующим звеном между устройствами пространственной волоконной оптики и фотонными интегральными схемами (ФИС). В настоящей работе методом двухфотонной лазерной литографии изготовлены спектрально широкополосные адаптеры заведения и вывода излучения для волновода, приподнятого над подложкой, и проведено сравнение с результатами численного моделирования. Экспериментально показано, что оптимальным для заведения излучения в волновод является использование адаптера полного внутреннего отражения с эллипсоидной поверхностью. Коэффициент пропускания системы из двух адаптеров в спектральном диапазоне 700–1000 нм для s-поляризованного излучения составил не менее 27%.

PACS: 42.79.Gn. УДК: 535.3

Ключевые слова: двухфотонная лазерная литография, оптические волноводы, фотонные интегральные схемы, лазерная спектроскопия.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530401](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530401)

ВВЕДЕНИЕ

Двухфотонная лазерная литография (ДФЛЛ), или лазерная печать оптически прозрачных структур с заданными параметрами и пространственным разрешением вплоть до 100 нм, является активно развивающимся направлением исследований [1, 2]. Известны работы по изготовлению методом ДФЛЛ градиентных диэлектрических структур [3, 4], микроигл [5], микролинз [6, 7], соединений между оптическими волокнами [8, 9], торцевых адаптеров для согласования модового состава излучения оптического волокна и мод планарного волновода [10, 11]. Важным преимуществом метода ДФЛЛ является возможность изготовления оптически прозрачных трехмерных структур заданной геометрии, что принципиально изменило подход к изготовлению как отдельных фотонных структур, так и их массивов и комбинаций.

Известны различные виды элементов ввода–вывода излучения в ФИС из свободного пространства: на основе дифракционных решеток, призмённых коннекторов, устройств согласования на торцах оптического волокна и проч. [12]. Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки, определяющие особенности их применения; важной характеристикой такого рода устройств является спектральный диапазон их работы и вносимые потери. При этом развитие методов изготовления адаптеров, применимых

для работы в широкой области спектра, является актуальной задачей.

Одним из вариантов конструкции элементов ввода–вывода излучения для субволновых волноводов ФИС являются адаптеры, работающие на основе эффекта полного внутреннего отражения [13, 14]. Эффективность работы таких адаптеров зависит от нескольких параметров: числовой апертуры входного лазерного пучка, расположения области его фокуса относительно элемента заведения, профиля отражающей поверхности на границе раздела сред. Конструкция адаптеров ввода–вывода на основе эффекта полного внутреннего отражения позволяет заводить (выводить) излучение в ФИС в направлении, перпендикулярном плоскости ее расположения, с помощью объектива, что значительно упрощает юстировку и позволяет использовать данную конструкцию как с планарными структурами, так и со структурами, приподнятыми над подложкой.

Ранее в наших работах была продемонстрирована возможность изготовления методом ДФЛЛ адаптера с плоской отражающей поверхностью, работающего на основе эффекта полного внутреннего отражения, для ввода–вывода излучения в расположенный над подложкой волновод длиной 20 мкм и сечением 2×2 мкм² [15, 16]. Экспериментально было показано, что коэффициент пропускания в маломодовом режиме составил 20–40% в спектральном диапазоне 700–1650 нм. Было показано, что плоская отражающая поверхность адаптера имеет области сильной утечки излучения в силу необходимости использования сильно сфокусированного пучка на входе в адаптер.

* E-mail: batuev.io18@physics.msu.ru

Одномодовый режим распространения излучения, необходимый для большинства задач интегральной фотоники, в таком волноводе реализуется при длинах волн более 3000 нм, что осложняет использование и диагностику таких структур в силу отсутствия доступных источников и детекторов излучения в этом диапазоне. В данной работе мы оптимизировали геометрию адаптеров с целью эффективной фокусировки излучения в волновод в 4 раза меньшего сечения для реализации одномодового режима распространения излучения при длинах волн более 1500 нм в волноводе сечением 1×1 мкм². Такое сечение волновода является компромиссным: при уменьшении сечения волновода возникают ограничения, связанные с возможностями метода ДФЛЛ, а именно ухудшается воспроизводимость и точность изготавливаемых структур; в сторону больших размеров длина волны отсечки первой моды смещается далеко за 1500 нм, где нет доступных источников и детекторов, а также этот спектральный диапазон не используется в современной интегральной фотонике.

Цель данной работы состоит в разработке эффективного спектрально широкополосного элемента ввода-вывода излучения для оптического субволнового волновода, проведении численного моделирования и экспериментальном исследовании спектральных свойств таких элементов, изготовленных методом ДФЛЛ. Под спектрально широкополосным адаптером авторы понимают адаптер, вносящий потери не более 50% (-3дБ) при заведении излучения в субволновой волновод в спектральном диапазоне не уже 20% от центральной длины волны работы такого адаптера.

1. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДАПТЕРОВ ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящей работе рассмотрены два типа адаптеров ввода-вывода, спроектированных на основе поверхностей вращения второго порядка, а именно эллипсоида и эллиптического параболоида (далее для краткости называемого параболоидом); для сравнения также проведен анализ работы адаптера на основе призмы полного внутреннего отражения (далее призмный адаптер). Входной адаптер (рис. 1) состоит из входного торца, элемента с поверхностью полного внутреннего отражения и призматического элемента с вершиной, переходящей в волновод; над подложкой он удерживается за счет симметрично расположенных стоек. Выходной адаптер имеет схожую структуру, а его выходной торец находится в оптическом контакте с подложкой и зафиксирован на ней.

В численных расчетах и эксперименте исследовалось распространение света в структурах, которые состояли из двух адаптеров одного типа и короткого волновода квадратного сечения 1×1 мкм² и дли-

ной 2–4 мкм, расположенного между ними и поднятого над подложкой на 8–12 мкм. Такая длина волновода позволяет в большей степени исключить его влияние на измеряемые спектральные характеристики адаптеров. Фактически короткий волновод выступает в качестве диафрагмы для определения качества фокусировки света исследуемыми адаптерами, его сечение выбиралось исходя из условия существования в волноводе единственной фундаментальной моды при длинах волн больше 1500 нм и возможностей нашей установки двухфотонной литографии, позволяющей воспроизводимо изготавливать элементы с линейными размерами от 1 мкм и более.

Трехмерный вид структур представлен на рис. 1, их названия образованы от названия используемых адаптеров: 1, а) — на основе призмных адаптеров, структура PR; 1, б) — на основе параболоидных адаптеров, структура PA; 1, в) — на основе эллипсоидных адаптеров, структура EL. В силу фундаментального свойства выбранных поверхностей полного внутреннего отражения эллипсоидные адаптеры эффективно перефокусируют излучение между фокусами, а параболоидные адаптеры эффективно фокусируют коллимированный пучок, распространяющийся вдоль оси симметрии параболы, в ее фокусе.

Эквивалентное фокусное расстояние адаптера на основе параболоида было выбрано равным 20.0 мкм. Фокусное расстояние адаптера на основе эллипсоида определяется его полуосями и составило 20.2 мкм. Угол раствора призматического элемента для всех трех типов структур, (рис. 1, вид структур сбоку) лежит в диапазоне 31°–50°. Числовая апертура выбранного волновода составляет 1.14, что соответствует раствору конуса поддерживаемого излучения в 98° (в среде фотополимера) и определяется условием полного внутреннего отражения на границе волновод (показатель преломления 1.52)–воздух. Тогда угол раствора призматического элемента должен быть не более 98°, чтобы не происходило превышение угла падения излучения на стенки волновода за критические значения. Второе требование, налагаемое на угол раствора призматического элемента, определяется выполнением условия полного внутреннего отражения для всех волновых векторов излучения, падающего на отражающую поверхность адаптера: призмы, эллипсоида или параболоида. Для каждого адаптера выбирались максимально возможные значения угла раствора призматического элемента исходя из данного требования, это позволяло сделать максимально возможный угол для конкретного фокусирующего излучения элемента и обеспечить компактность устройства. Однако, как показывают исследования [17], для задачи эффективного согласования модового состава излучения свободного пространства и волновода необходимо использовать адиабатически сужающиеся конусные элементы с малым углом раstra призматического элемента, но это приводит к существенному удлинению адаптеров, что

сложно реализовать на имеющейся установке двух-фотонной литографии, рабочее поле которой ограничено и составляет 100 мкм x 100 мкм в латеральной плоскости.

Расчет оптических спектральных характеристик предложенных структур выполнен методом конечных разностей во временной области (FDTD, пакет программного обеспечения Ansys Lumerical 2020). В качестве материала для учета дисперсии материала OptoComp® был выбран плавленый кварц с известной дисперсионной зависимостью в силу близости к составу фоторезиста, в котором преобладают наночастицы оксида кремния. Для структуры EL был выбран фокусированный пучок с гауссовым профилем и числовой апертурой 0.7, перетяжка находилась в фокусе F1 эллипсоида на торце входного адаптера (рис. 1, в). Для структуры PR использовался такой же пучок, однако перетяжка пучка находилась на входном торце волновода (рис. 1, а). Значение числовой апертуры было выбрано равным 0.7 для соответствия параметрам эксперимента и согласования с числовой апертурой волновода, равной 1.14. Для структуры PA (рис. 1, б) рассматривался коллимированный пучок (плоские волны). Спектр источника излучения был непрерывным в диапазоне 700–4400 нм.

Область моделирования выбиралась так, чтобы полностью вместить в себя рассматриваемую структуру. Пространственный шаг сетки составлял не более 10 нм. Граничные условия были заданы идеально поглощающим слоем, что соответствует уходу излучения на бесконечность.

Рассчитанные спектры коэффициента пропускания (T) трех структур для p - и для s -поляризованного излучения, падающего на вход структур, представлены на рис. 2. Видно, что наименьшее пропускание T в коротковолновом диапазоне спектра демонстрирует структура PR на основе призмы полного внутреннего отражения. Тенденция к снижению пропускания наблюдается в длинноволновом диапазоне для всех трех типов структур и обусловлена ростом диаметра перетяжки на торце волновода с увеличением длины волны. Почти в два раза большее пропускание в области длин волн $\lambda = 0.7$ мкм наблюдается в расчетных спектрах для структур EL и PA. Оптимальным представляется именно структура EL с эллипсоидными адаптерами, демонстрирующая (i) максимальное значение T во всем спектральном диапазоне для обеих линейных поляризаций падающего излучения и (ii) относительно слабую зависимость T от длины волны света.

На рис. 3 продемонстрировано рассчитанное распределение логарифма относительной интенсивности в структурах EL (3, а), PA (3, б) и PR (3, в). Общая схема хода лучей такова: входное излучение сверху попадает в заводящий адаптер (слева), отражается от поверхности раздела сред и, распространяясь вдоль оси y , попадает в волновод; после выхода из волновода излучение вновь испытывает отражение и выходит вниз из выводящего адаптера

(справа). В верхнем правом углу для каждой структуры показано распределение относительной интенсивности в поперечном сечении волновода (черным контуром выделены его границы). Видно, что для всех трех структур пучок внутри волновода обладает профилем, близким к гауссову.

На рис. 3 возможно определить причины потерь излучения при распространении света в структурах, наблюдая области с высокой относительной интенсивностью вне структур. Первая такая область располагается ниже заводящего адаптера (левая нижняя часть рисунка); потери в этой области связаны с невыполнением условий полного внутреннего отражения для части пучка. Вторая область располагается на входном торце волновода (центр рисунка), где вследствие большого диаметра сформированной перетяжки и неточностей позиционирования излучение рассеивается на волноводе и выходит за пределы структуры. Этот вид потерь особенно заметен в структуре PR на рис. 3, в. Третья область располагается правее выводящего адаптера (правая центральная часть рисунка), причины потерь в этой области также обусловлены невыполнением условий полного внутреннего отражения для части пучка.

Уменьшение потерь, связанных с нарушением условий полного внутреннего отражения, возможно путем корректировки отражающих поверхностей адаптеров и ограничено числовой апертурой входящего излучения. Потери на входном адаптере связаны в том числе с эффектом Гуса–Хенхен, что важно учесть при оптимизации дизайна структур.

2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Метод ДФЛЛ для изготовления адаптеров ввода–вывода излучения

Структуры были изготовлены методом ДФЛЛ на экспериментальной установке, подробно описанной в [15]. Отметим только наиболее значимые моменты. Источником излучения накачки являлся титан-сапфировый лазер TIF-DP фирмы ООО «Авеста-Проект» с прямой диодной накачкой [18], длиной волны 780 нм, длительностью импульсов 70 фс, частотой следования импульсов 80 МГц. Далее дифрагированный на кристалле акустооптического модулятора пучок попадал на пространственный фильтр, совмещенный с телескопом, для выделения основной гауссовой моды. Позиционирование его перетяжки в латеральной плоскости образца проводилось с использованием гальваносканера D1105 Sino-Galvo и 4f-системы. Наконец, излучение фокусировалось в перетяжку в области построения модели иммерсионным объективом Nikon Plan APO VC 60x/1.4NA, закрепленным на однокоординатном пьезотрансляторе для точного задания вертикального положения перетяжки относительно покровного стекла. «Грубое» трехмерное позициони-

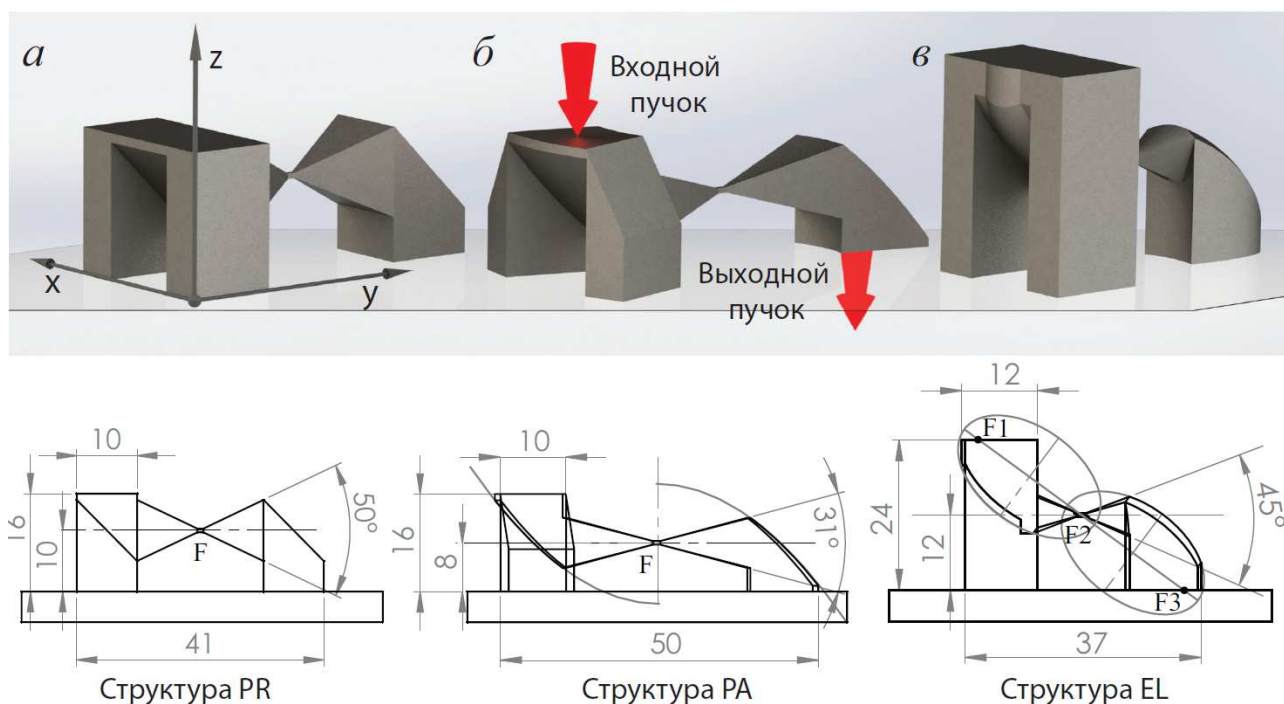


Рис. 1. Трехмерные модели исследуемых структур: *а* — структура PR с двумя призмными адаптерами; *б* — структура PA с двумя параболическими адаптерами; парабола серого цвета показывает образующую параболического параболоида, где *F* — фокус эллиптического параболического параболоида, в этой точке фокусы входного/выходного адаптеров совпадают; *в* — структура EL с двумя эллипсоидными адаптерами; эллипс серого цвета показывает образующую поверхности эллипсоида, у которого *F1* — положение фокуса на входе, *F3* — на выходе адаптера и *F2* — совмещенные фокусы двух эллипсоидов. Для всех структур слева расположен входной адаптер, пучок падает сверху, справа — выходной адаптер, пучок выходит вниз (стрелками для структуры PA указано направление распространения света). Нижние основания адаптеров располагаются на стеклянной подложке толщиной 170 мкм. В нижней части рисунка на чертежах представлен вид сбоку, размеры указаны в микрометрах

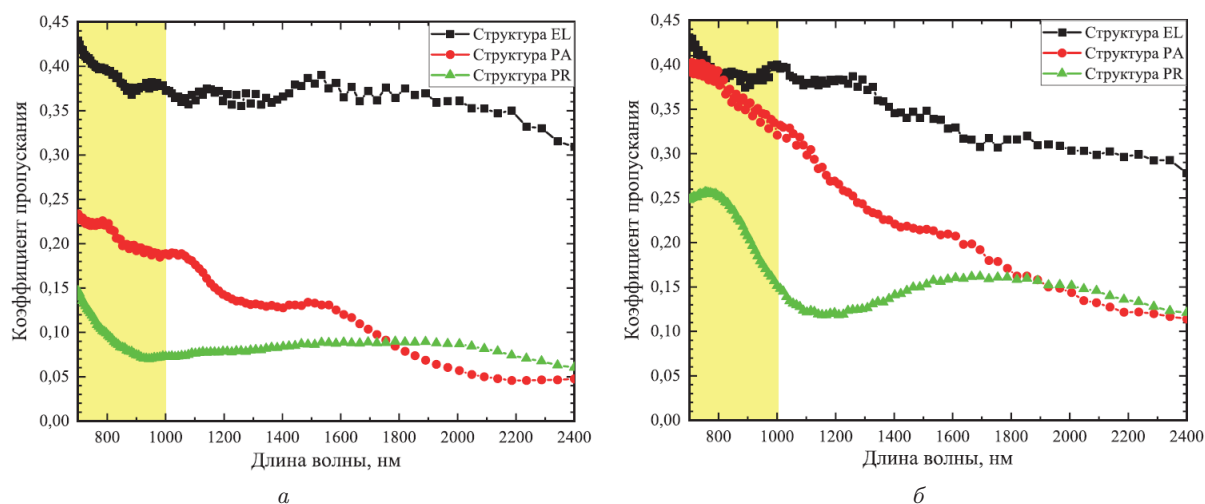


Рис. 2. Рассчитанные спектры пропускания трех структур для (*а*) *p*- и (*б*) *s*-поляризованного излучения, падающего на вход структуры. Здесь структура EL состоит из двух эллипсоидных зеркал полного внутреннего отражения, структура PA — из двух параболических зеркал полного внутреннего отражения, структура PR — из двух призм полного внутреннего отражения; все адаптеры соединены между собой волноводом. Желтыми прямоугольниками выделена спектральная область, в которой проводились экспериментальные измерения коэффициента пропускания таких структур

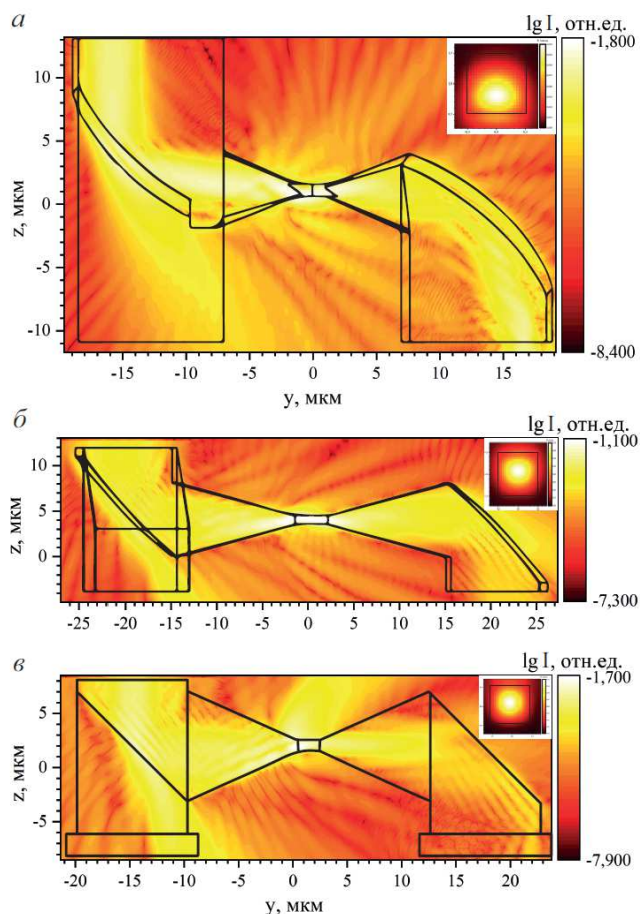


Рис. 3. Рассчитанное распределение логарифма относительной интенсивности для s -поляризованного входного излучения с длиной волны 1500 нм, представлено сечение вдоль срединной плоскости в (а) структуре EL, (б) структуре PA, (в) структуре PR. В верхнем правом углу каждого рисунка показано распределение относительной интенсивности в поперечном сечении волновода, черным контуром выделены границы волновода

рование перетяжки лазерного пучка для реализации ДФЛЛ осуществлялось транслятором, управляемым шаговыми двигателями.

Для изготовления структур использовался фоторезист OrmoComp[®] фирмы «Micro Resist Technology GmbH» с показателем преломления отвержденного фоторезиста 1.52 на длине волны 590 нм [19], что близко к показателю преломления покровных стекол Precision Cover Glasses (1.52 для длины волны 656 нм) толщиной 170 мкм, используемых в качестве подложек. Печать проводилась в капле фоторезиста объемом около 5 мкл, при этом скорость движения перетяжки в латеральной плоскости составляла 1250 мкм/с, мощность излучения в области полимеризации 15 мВт. По завершению печати образец проявлялся последовательно в пропанол-2 и проявителе OrmoDev[®]. Модели микроструктур для печати были созданы в программе Solidworks 2021.

На рис. 4 представлены изображения в сканиру-

ющем электронном микроскопе (СЭМ) (4, а) и оптическом микроскопе (4, б–г) изготовленных микроструктур, состоящих из двух адаптеров одного типа и волновода между ними, аналогичных структурам, рассмотренным в численных расчетах методом FDTD. Видно, что параметры, заложенные при моделировании, с хорошей точностью совпадают с размерами изготовленных структур.

2.2. Экспериментальная установка для определения оптических свойств изготовленных структур

Измерения спектров пропускания проводились на установке конфокальной оптической микроскопии в диапазоне длин волн 700–1000 нм, ограниченном областью перестройки сигнального канала параметрического фемтосекундного генератора света TOPOL-1050-C ООО «Авеста-Проект» (длительность импульса 130–200 фс, максимальная мощность на входе в структуру не превышала 5 мВт), что соответствует пиковой мощности не более 500 Вт. Данный источник оптического излучения обладает высоким качеством пучка и большим диапазоном спектральной перестройки, что важно в проводимых измерениях. Оценим влияние эффекта самовоздействия света на искажение измеряемых спектральных зависимостей, вызванное использованием фемтосекундного источника света по сравнению с непрерывным. Материал фоторезиста OrmoComp[®] по своему составу близок к плавленому кварцу, так как в своем составе содержит преимущественно наночастицы кварца, нелинейный показатель которого в исследуемом спектральном диапазоне составляет примерно $n_2 = 10^{-20}$ м²/Вт. Интенсивность света в зоне фокусировки излучения на торец волновода сечением 1 мкм×1 мкм будет порядка $I = 5 \times 10^{14}$ Вт/м², что даст добавку в показатель преломления в локальной области не более $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$, что мы можем сравнить с отклонением формы фокусирующей поверхности структуры на уровне 1 нм на характерных линейных масштабах порядка 100 мкм. Поэтому можем считать проявление эффекта самовоздействия пренебрежимо малым в изучаемых структурах по сравнению с эффектом Гуса–Хенхен, где эффективное положение отражающей поверхности адаптеров смещено относительно реальной поверхности на величины, сравнимые с длиной волны света.

Спектры пропускания измерялись следующим образом. Лазерное излучение фокусировалось с помощью объектива Mitutoyo M Plan Apo 100x/0.7NA на входной торец адаптера в случае исследования структур EL и на торец волновода в случае исследования структур PR или объективом Plan Apo 20x/0.1NA на входной торец адаптера при исследовании структуры PA для получения низкоапертурного пучка. Излучение после выходного адаптера собиралось вторым объективом Plan Apo 100x/0.8NA и направлялось через тубусную лин-

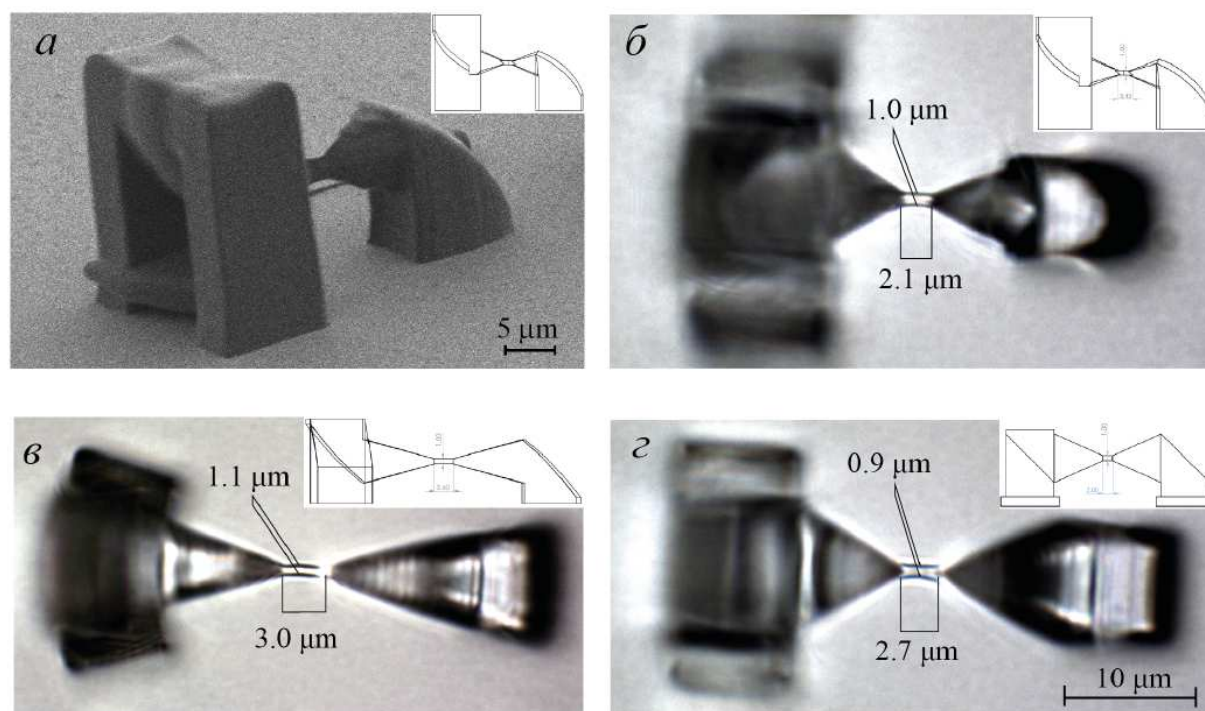


Рис. 4. *a* — СЭМ изображение структуры EL; *б* — изображение оптической микроскопии структуры EL, вид сверху; *в* — изображение оптической микроскопии структуры РА, вид сверху; *г* — изображение оптической микроскопии структуры РР, вид сверху. В верхнем правом углу каждого изображения приведено схематическое изображение каждой из структур, вид сбоку. Указаны параметры волновода, располагающегося между адаптерами

зу на вход интегрирующей сферы Thorlabs S145C, где с помощью диафрагмы диаметром 2 мм, соответствующей области диаметром 20 мкм в фокальной плоскости объектива, производилось пространственное выделение сигнала на выходе адаптера. В процессе регистрации спектра пропускания происходила автоматическая перестройка параметрического генератора света с шагом 5 нм с одновременной регистрацией прошедшей через структуру интенсивности света. Для учета спектральных особенностей оптических параметров установки от длины волны проводилась нормировка сигнала, прошедшего через структуру, на интенсивность излучения, прошедшего через чистую стеклянную подложку.

На рис. 5 представлены спектры пропускания s-поляризованного излучения (вектор напряженности электрического поля направлен вдоль оси x , рис. 1, *a*), падающего на входной адаптер, измеренные на выходе для трех структур с адаптерами разных видов. Максимальное пропускание демонстрирует структура EL, для которой коэффициент составляет около 30% и в среднем возрастает с увеличением длины волны. Структура РА демонстрирует спад пропускания от 25% в коротковолновой области спектра до 16% в окрестности длины волны 1000 нм. Наименьшим пропусканием обладают структуры на основе призмных адаптеров, для которых пропускание не превышает 4% во всем исследованном спектральном диапазоне. Слабый рост пропускания с увеличением длины волны

для структур EL и PR может быть связан с уменьшением вклада рассеяния на неоднородностях напечатанных структур. Также были проведены измерения спектров пропускания адаптера РА при заведении высокоапертурного пучка, а также коллимированного пучка в адаптер EL, но коэффициенты пропускания в таком случае составили единицы процентов, что подтверждает сильную зависимость эффективности разработанных адаптеров от структуры пучка на входе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложены и изготовлены методом ДФЛЛ два типа адаптеров ввода-вывода излучения для субволнового волновода, построенные на основе поверхности эллипсоида или эллиптического параболоида, работающей в режиме полного внутреннего отражения. Были изготовлены структуры, состоящие из двух конфокально совмещенных адаптеров, соединенных коротким волноводом. Как уже упоминалось выше, малая длина волновода была выбрана для минимизации влияния его волноводных свойств на измеряемые спектральные характеристики адаптеров. Спектральные зависимости пропускания таких структур в диапазоне длин волн 700–1000 нм продемонстрировали хорошее качественное согласие с результатами численного моделирования.

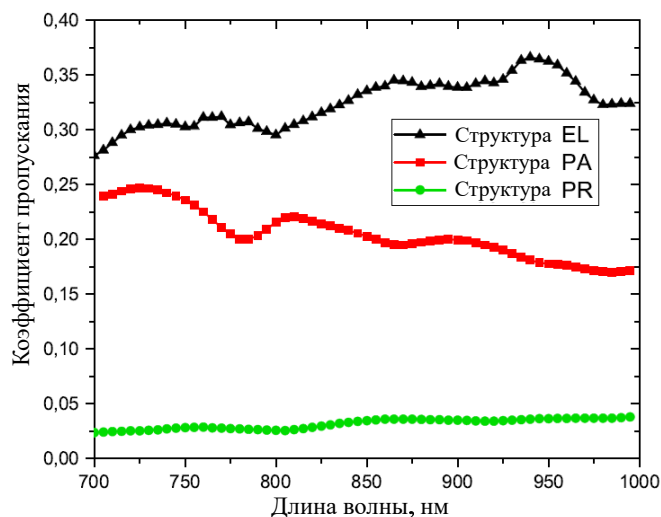


Рис. 5. Спектры пропускания трех структур с адаптерами разных типов (указаны на рисунке), измеренные для s -поляризованного излучения на входе в структуру

Полученные экспериментальные результаты подтверждают исходное предположение, что для сфокусированного входного пучка оптимальным является использование системы из эллипсоидных адаптеров. При этом расчетный коэффициент пропускания в диапазоне 700–2400 нм для высокоапертурного s -поляризованного излучения для структуры на базе эллипсоидного адаптера составил 40%–27%; для низкоапертурного или коллимированного входного пучка максимальное пропускание достигается при использовании системы из параболоидных адаптеров, в этом случае коэффициент пропускания варьируется от 40% до 11% в том же спектральном диапазоне.

Представленные в работе спектры пропускания приведены для системы из двух адаптеров одного типа, поэтому коэффициент пропускания одного адаптера можно оценить из следующих соображений. Коэффициент пропускания всей структуры $T = T_{a1} \times T_w \times T_{a2}$, где T_{a1} , T_{a2} — коэффициенты пропускания входного и выходного адаптера, T_w — коэффициент пропускания волновода между адаптерами. Полагая $T_{a1} = T_{a2} = T_a$ и принимая коэффициенты пропускания независимыми друг от друга, можно оценить коэффициент пропускания

одного адаптера как $T_a = \sqrt{T/T_w}$. Полагая $T_w = 1$ в идеальном случае, мы считаем, что короткий волновод не вносит потерь и можно оценить нижнюю границу значения коэффициента пропускания одного адаптера как $T_a = \sqrt{T}$. Спектральный диапазон эффективной работы одного адаптера определяется областью спектра, в которой коэффициент пропускания составляет более 50% (соответствует 25% для структуры из двух адаптеров). Для эллипсоидного адаптера спектральная ширина такой области в эксперименте для s -поляризованного излучения составила не менее 35% для центральной длины волны 850 нм, в то время как для известных решетчатых адаптеров заведения излучения в волновод спектральная область их эффективной работы составляет не более 3% от центральной длины волны [20, 21].

По результатам численного моделирования были выдвинуты предположения о двух основных механизмах потерь излучения в структурах. Первый из них связан с нарушением условий полного внутреннего отражения для части геометрически широкого входного пучка. Вторым очевидным механизмом является рассеяние излучения на входе в волновод. Стоит отметить интересную особенность предложенных адаптеров на основе эллипсоида и параболоида: у них в приближении геометрической оптики отсутствуют хроматические aberrации, вызванные дисперсией показателя преломления, но при этом присутствуют aberrации, связанные с зависимостью величины эффекта Гуса–Хенхен от длины волны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №24-42-02009. Эксперименты выполнены с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ имени М.В. Ломоносова (Соглашение № 126 от 01/03/2022). Изображения изготовленных структур в сканирующем электронном микроскопе были получены с использованием оборудования Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

[1] Wang H., Zhang W., Ladika D. et al. // *Advanced Functional Materials*. **33**, N 39. 2214211 (2023).
 [2] Jaiswal A., Rastogi C.K., Rani S. et al. // *Science*, **26**, N 4. 106374 (2023).
 [3] Gomez-Reino C., Perez M.V., C. Bao // Springer Science & Business Media, (2012). ISBN 3662047411, 9783662047415
 [4] Aparin M., Baluyan T., Sharipova M. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **87**, N 6. 710 (2023).

[5] Faraji Rad Z., Prewett P.D., Davies G.J. // *Microsystems & nanoengineering*, **7**, N 1. 71 (2021).
 [6] Pisarenko A., Zvagelsky R., Kolymagin D. et al. // *Optik*. **201**. 163350 (2020).
 [7] Petrov A.K., Bessonov V.O., Abrashitova K.A. et al. // *Opt. Express*. **25**, N 13. 14173 (2017).
 [8] Baghdasaryan T., Vanmol K., Thienpont H. et al. // *Journal of Physics: Photonics*. **3**, N 4. 045001 (2021).
 [9] Vanmol K., Tuccio S., Panapakkam V. et al. // *Optics and Laser Technology*. **112**. 292 (2019).

- [10] Vanmol K., Baghdasaryan T., Vermeulen N. et al. // *Opt. Express*. **28**, N 24. 36 147 (2020).
- [11] Yu J., Bai Z., Zhu G. et al. // *Opt. Express*. **28**, N 25. 38 127 (2020).
- [12] Tamir T. // *Integrated Optics*. Т. Tamir, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975. Pp. 83–137.
- [13] Gehring H., Blaicher M., Hartmann W. et al. // *APL Photonics*. **4**, N 1. 010801. (2019).
- [14] Yu S., Zuo H., Sun X. et al. // *Journal of Lightwave Technology*. **38**, N 13. 3358 (2020).
- [15] Майдыковский А., Апостолов Д., Мамоннов Е.А. et al. // *JETP Letters*. **117**, N 1. 32 (2023).
- [16] Майдыковский А.И., Андросов А.И., Апостолов Д.О. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. **120**, № 12. 924 (2024).
- [17] Fritze M., Knecht J., Bozler C. et al. // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. **21**, N 6. 2897 (2003).
- [18] Kopylov D.A., Esaulkov M.N., Kuritsyn I.I. et al. // *Laser Physics Letters*. **15**, N 4. 045001 (2018).
- [19] «Ormocomp features» <https://www.microresist.de/en/produkt/ormocomp/>.
- [20] Luo X., Mi G., Li Y., Chu T. // *Opt. Lett.* **47**, N 7. 1622 (2022).
- [21] Zemtsov D.S., Zhigunov D.M., Kosolobov S.S. et al. // *Opt. Lett.* **47**, N 13. 3339 (2022).

Light coupling devices for subwavelength waveguides based on second order surfaces manufactured by two-photon laser lithography

I. O. Batuev^a, K. A. Smirnov, I. I. Tsiniiaikin, T. V. Murzina, A. I. Maydykovskiy

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^a batuev.io18@physics.msu.ru

Light input/output devices are essential for coupling between bulk and fiber optical devices and photonic integrated circuits (PIC). In this work, broadband couplers for optical waveguides lifted from the surface, were fabricated by two-photon laser lithography, and comparison with numerical modeling was conducted. It was demonstrated experimentally that the ellipsoid-based coupler is optimal for coupling light with the waveguide. Average transmittance of a system of two adapters in the spectral range 700-1000 nm for s-polarized radiation amounted to at least 27

PACS: 42.79.Gn

Keywords: two-photon laser lithography, optical waveguides, subwavelength waveguides, photonic integrated circuits, laser spectroscopy.

Received 28 November 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Батуев Илья Олегович — магистр 2 г/о; тел.: (495)939-36-69, e-mail: batuev.io18@physics.msu.ru.
2. Смирнов Кирилл Александрович — магистр 2 г/о; тел.: (495)939-36-69, e-mail: smirnov.ka19@physics.msu.ru.
3. Илья Иванович Циняйкин — мл. науч. сотрудник; тел.: (495)939-39-88, e-mail: ii.tcinayaykin@physics.msu.ru.
4. Майдыковский Антон Игоревич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495)939-36-69, e-mail: anton@shg.ru.
5. Мурзина Татьяна Владимировна — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495)939-36-69, e-mail: mur@shg.ru.