

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-871-879

УДК 681.7.068

Разработка и изготовление коллимирующей волоконной сферической микролинзы для системы вывода излучения из радиофотонных компонент в оптическое волокно**Юрий Сергеевич Жидик¹✉, Анна Андреевна Шейнбергер²,
Михаил Валерьевич Степаненко³, Павел Ефимович Троян⁴**^{1,2,3,4} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация¹ zhidikyur@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7803-2086>² annasejnberger@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9816-3294>³ mikhail.v.stepanenko@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6608-5743>⁴ tpe@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7349-0536>**Аннотация**

Введение. При корпусировании фотонных интегральных схем и реализации технологии гибридной интеграции важной проблемой является обеспечение вывода оптического излучения из источника в оптоволоконный кабель. Потери при выводе оптического излучения обусловлены рассогласованием модового пятна излучения в оптоволокне и в волноводе, а также присутствующими при сборке отклонениями оптических элементов от оптимального установочного положения. В работе приведены результаты проектирования, изготовления и исследования волоконной сферической микролинзы, позволяющие решить проблему согласованного вывода оптического излучения из радиофотонных компонент в оптоволокно. **Метод.** Предложенная схема вывода оптического излучения из полупроводникового лазерного диода включает дискретную сферическую микролинзу и волоконную коллимирующую сферическую микролинзу. Волоконная сферическая микролинза диаметром 250 мкм сформирована методом дугового оплавления сегмента оптоволокна FG125LA, приваренного к оптоволокну SMF-28 и образующего на нем бессердцевинную вставку. Для определения оптимальных геометрических параметров микролинзы с целью обеспечения коллимированного пучка предложена модель с бессердцевинными вставками разной длины. Моделирование выполнено с использованием программного пакета Comsol Multiphysics. Тип пучка оптического излучения на выходе сформированной волоконной сферической микролинзы проверялся экспериментально. **Основные результаты.** Определена оптимальная конструкция коллимирующей волоконной сферической микролинзы. Экспериментальный образец коллимирующей волоконной сферической микролинзы позволил реализовать оптическую схему вывода оптического излучения и исследовать ее эффективность. **Обсуждение.** Показано, что реализованная оптическая схема позволяет увеличить эффективность передачи оптической мощности от источника к оптоволокну в два раза по сравнению со стыковым соединением. Разработанная схема вывода оптического излучения обеспечивает диапазон допустимого отклонения ее элементов от оптимального положения не менее чем на 12,8 мкм, что в два раза превышает диапазон допустимого отклонения элементов для стыкового соединения источника излучения с оптоволоком. Представленную схему вывода оптического излучения рекомендуется использовать с интегральным расширителем пучка для увеличения эффективности передачи оптической мощности.

Ключевые слова

оптоволокно, радиофотонные компоненты, оптические системы, микролинзы

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Ссылка для цитирования: Жидик Ю.С., Шейнбергер А.А., Степаненко М.В., Троян П.Е. Разработка и изготовление коллимирующей волоконной сферической микролинзы для системы вывода излучения из радиофотонных компонент в оптическое волокно // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 871–879. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-871-879

© Жидик Ю.С., Шейнбергер А.А., Степаненко М.В., Троян П.Е., 2024

Design and fabrication of collimating ball lensed fiber for the system of optical radiation output from radiophotonic components

Yury S. Zhidik¹, Anna A. Sheinberger², Mikhail V. Stepanenko³, Pavel E. Troyan⁴

^{1,2,3,4} Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation

¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 634055, Russian Federation

¹ zhidikyur@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7803-2086>

² annasejnberger@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9816-3294>

³ mikhail.v.stepanenko@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6608-5743>

⁴ tpe@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7349-0536>

Abstract

The output of optical radiation from the source into a fiber optic cable is an important problem in photonic integrated circuits packaging and implementation of hybrid integration technology. Optical radiation output losses are caused by the mismatch of the mode spot of radiation in the optical fiber and in the waveguide as well as by the deviations of optical elements from the optimal mounting position that occur during the assembly of photonic integrated circuits. This work demonstrates the design, fabrication, and investigation of a lensed optical fiber to solve the problem of coordinated output of optical radiation from radiophotonic components into the fiber. A scheme for outputting optical radiation from a semiconductor laser diode included a discrete ball microlens and a collimating lensed optical fiber. The lensed optical fiber with a lens diameter of 250 μm was formed by arc-fusing a segment of FG125LA fiber which was welded to the SMF-28 fiber to form a coreless insert. A model with coreless inserts of different lengths was proposed to determine the optimal geometrical parameters of the lensed optical fiber that provide a collimated beam of radiation at the exit of the lensed optical fiber. The modeling was performed using the Comsol Multiphysics software package. The optical radiation beam type at the output of the formed ball lensed fiber was verified experimentally. The optimal design of the collimating ball lensed fiber was determined. The fabricated experimental sample of collimating ball lensed fiber allowed to realize the optical scheme for optical radiation output and to investigate the efficiency of the scheme. The implemented optical scheme allows to increase the efficiency of optical power transmission from the source to the fiber by a factor of two compared to the butt coupling. In addition, the developed optical radiation output scheme provides the range of acceptable deviation of its elements from the optimal position by at least 12.8 μm . This value is twice as much as the range of permissible deviation of the elements for the butt connection of the radiation source with the optical fiber. The presented scheme of optical radiation output is recommended to be used with an integral beam expander to increase the efficiency of optical power transmission.

Keywords

optical fiber, radiophotonic components, optical systems, microlenses, lensed fiber

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project FEWM 2024-0004.

For citation: Zhidik Yu.S., Sheinberger A.A., Stepanenko M.V., Troyan P.E. Design and fabrication of collimating ball lensed fiber for the system of optical radiation output from radiophotonic components. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 871–879 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-871-879

Введение

В современной радиофотонике при корпусировании фотонных интегральных схем и реализации технологии гибридной интеграции важной задачей, требующей решения, является обеспечение вывода оптического излучения из источника в оптоволоконный кабель [1]. При этом вывод оптического излучения сопровождается потерями, обусловленными рассогласованием модового пятна излучения в оптоволокне и в волноводе по размеру и форме [2, 3]. Также причиной потерь оптической мощности являются возникающие при сборке отклонения оптических элементов от установленного положения, связанные с ограниченными технологическими возможностями позиционирующего оборудования, усадкой клеевых фиксирующих составов и т. д. [4, 5].

Для минимизации оптических потерь при выводе излучения источника в оптоволокно используются специальные устройства, которые обеспечивают согласование между оптоволокном и источником излучения по числовым апертурам и диаметрам поля моды.

Известны дискретные устройства вывода излучения, например линзы с градиентом показателя преломления (GRIN-линзы), обеспечивающие ввод лазерного излучения в оптоволокно с эффективностью до 81 % [6, 7]. Однако в связи с высокой стоимостью GRIN-линз предпочтение зачастую отдается дискретным сферическим линзам. Эффективность ввода излучения из лазерного диода в одномодовое оптоволокно с использованием фокусирующей дискретной сферической микролинзы может достигать 90 % [8–10].

Существенный недостаток дискретных устройств ввода/вывода излучения — трудность юстировки. Исключить или упростить юстировку может использование волоконных сферических микролинз, которые представляют собой единую конструкцию с оптоволокном. Такие волоконные сферические микролинзы формируются путем фотополимеризации на торцевом конце оптоволокна светочувствительных материалов или оплавлением торцевого конца оптоволокна дугвым разрядом, нитью накала, лазером или пламенем газовой горелки [11–13]. Фокусирующие волоконные

сферические микролинзы позволяют улучшить согласование между лазером и оптоволоконном в три-пять раз по сравнению со стыковым соединением лазера и сколотого оптоволоконна и обеспечивают эффективность ввода излучения выше 90 % [14, 15]. Однако при таком подходе эффективность ввода излучения чувствительна к отклонению волоконной сферической микролинзы. Предполагается, что применение волоконной сферической микролинзы в составе коллимирующей оптической системы позволит обеспечить достаточно высокую эффективность ввода излучения при низкой чувствительности системы к отклонению ее элементов.

Таким образом, целью настоящей работы является расчет оптимальных геометрических размеров волоконной сферической микролинзы для вывода излучения из полупроводникового лазерного диода, а также изготовление и исследование системы вывода оптического излучения из источника излучения в оптоволоконно на основе изготовленной волоконной сферической микролинзы. Предлагаемая к реализации система для вывода оптического излучения лазерного диода должна состоять из дискретной сферической микролинзы и коллимирующей волоконной сферической микролинзы, сформированной на торце принимающего излучения оптоволоконна.

Разработка коллимирующей волоконной сферической микролинзы

Предлагаемая конструкция волоконной сферической микролинзы представляет собой микролинзу, сформированную методом дугового оплавления оптоволоконна на вставке бессердцевинного (многомодового) оптоволоконна, присоединенной к сегменту одномодового оптоволоконна (рис. 1, *a*). Бессердцевинная вставка в данной конструкции выполняет две функции. Во-первых, в случае оплавления одномодового оптоволоконна SMF-28 образуется сплав сердцевинной, обладающей показателем преломления 1,4679, и оболочки оптоволоконна с 1,46. Это приводит к невозможности контроля и воспроиз-

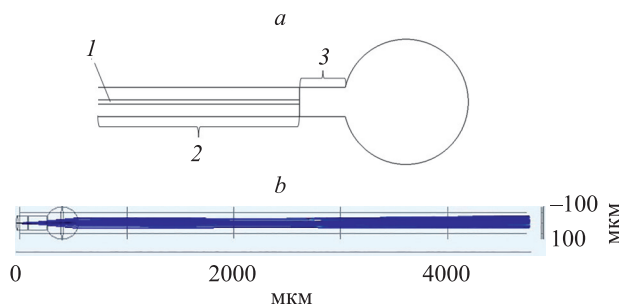


Рис. 1. Схематичное изображение сформированной на бессердцевинной вставке волоконной сферической микролинзы (*a*) и внешний вид ее расчетной модели (*b*):

1 — сердцевина одномодового оптоволоконна; 2 — одномодовое оптоволоконно; 3 — бессердцевинная вставка

Fig. 1. Schematic representation of a spherical microlens formed on a coreless fiber insert (*a*) and the appearance of its computational model (*b*): 1 — core of single-mode optical fiber; 2 — single-mode optical fiber; 3 — coreless fiber insertion

водимости результирующего показателя преломления формируемой микролинзы. В случае оплавления бессердцевинной вставки многомодового оптоволоконна с однородным показателем преломления он полностью определяет показатель преломления формируемой микролинзы. Во-вторых, длина бессердцевинной вставки определяет фокусное расстояние линзы и, соответственно, тип пучка: расходящийся, сходящийся или коллимированный. Диаметр пучка излучения на выходе из линзы, в свою очередь, определяется диаметром линзы. Таким образом, основными геометрическими параметрами разрабатываемой волоконной сферической микролинзы являются длина бессердцевинной вставки и диаметр линзы.

Для реализации предлагаемой системы вывода излучения из источника в оптоволоконно требуется разработка коллимирующей волоконной сферической микролинзы (рис. 1, *a*). С целью определения геометрических параметров микролинзы для обеспечения коллимированного типа пучка были построены модели волоконных сферических микролинз диаметром 300 мкм с бессердцевинными вставками разной длины. Моделирование проводилось при помощи программного пакета Comsol Multiphysics, принцип работы которого основан на описании физических процессов системами дифференциальных уравнений в частных производных. Внешний вид модели приведен на рис. 1, *b*.

Математическое описание модели основано на законах геометрической оптики. Пучки излучения представлялись как совокупность лучей. Для каждой моделируемой микролинзы были построены траектории распространения лучей, на основании которых определены углы расходимости (сходимости) пучка.

В общем случае траектория луча описывалась обыкновенными дифференциальными уравнениями 1-го порядка:

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = -\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{q}},$$

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{k}},$$
(1)

где \mathbf{k} — волновой вектор; t — время; ω — угловая частота; \mathbf{q} — координата.

Для областей с неизменным показателем преломления данные уравнения имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = 0;$$

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = -\frac{c\mathbf{k}}{n|\mathbf{k}|},$$

где n — показатель преломления среды; c — скорость света.

Уравнения (1) справедливы только в областях, которые находятся на расстоянии от точечного источника излучения, в несколько раз превышающем значение длины волны.

На выходе из точечного источника излучения начальное направление лучей задано таким образом, чтобы пучок имел форму конуса с вершиной в источнике.

Начальные значения компонентов волнового вектора определены в соответствии со следующими выражениями:

$$k_x = \frac{\omega n}{c} \sin\theta \cos\varphi;$$

$$k_y = \frac{\omega n}{c} \sin\theta \sin\varphi;$$

$$k_z = \frac{\omega n}{c} \cos\theta,$$

где θ — угол, принимающий значения от 0 до заданного угла расходимости пучка (относительно оси конуса).

На границе двух сред волновой вектор пересчитан по закону Снеллиуса и определен угол падения луча на границу раздела двух сред по следующему соотношению:

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_i \mathbf{n}_s}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{n}_s|}\right),$$

где \mathbf{n}_i — единичный вектор, сонаправленный лучу; \mathbf{n}_s — единичный вектор, направленный по нормали к границе раздела сред.

На границе между двумя изотропными непоглощающими средами с показателями преломления n_1 и n_2 преломленный луч распространяется в направлении \mathbf{n}_t , заданном следующими соотношениями:

$$\mathbf{n}_t = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{n}_i + \left(-\frac{n_1}{n_2} \cos\theta_i + \cos\theta_t\right) \mathbf{n}_s;$$

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_i\right).$$

Для отраженных лучей, образующихся на границе раздела двух сред, в свою очередь справедливо:

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2\mathbf{n}_s \cos\theta_i.$$

Моделирование проводилось для длины волны излучения 1,31 мкм. В качестве прототипа одномодового оптоволоконно выбрано оптоволоконно марки SMF-28. Угол расходимости пучка излучения, входящего в оптоволоконно, принят равным 6,3°. Длина сегмента одномодового оптоволоконно в модели задана — 100 мкм (при длине прототипа около 1 м). Выбор данного значения обусловлен необходимостью минимизации времени расчета и основан на предположении, что лучи одина-

ково распространяются по всей длине одномодового оптоволоконно с малыми потерями. Все смоделированные волоконные линзы имели диаметр 300 мкм и отличались друг от друга длиной бессердцевинной вставки l . Параметры бессердцевинной вставки соответствовали в дальнейшем использованному в работе многомодовому оптоволоконно FG125LA (Thorlabs, Германия) с показателем преломления 1,444 при длине волны измерения 1550 нм. Для каждой смоделированной линзы был определен угол сходимости пучка излучения и тип пучка. Результаты представлены в табл. 1.

Согласно результатам моделирования, линза диаметром 300 мкм является коллимирующей при длине бессердцевинной вставки 180 мкм. Следовательно, для реализации системы вывода оптического излучения требуется изготовить волоконную сферическую микролинзу с данной длиной бессердцевинной вставки.

Изготовление волоконной сферической микролинзы

Формирование волоконной сферической микролинзы выполнено методом дугового оплавления. Оплавление торца оптоволоконно дуговым разрядом осуществляется при помощи станции формирования линз LFS-01-0100 (3SAE, США). Суть метода показана на рис. 2.

Для формирования волоконной сферической микролинзы торец вертикально закрепленного оптоволоконно пошагово пододвигается к зоне нагрева. Зона нагрева служит пространство между тремя электродами. После каждого шага в зоне нагрева зажигается дуговой разряд, который оплавляет торец оптоволоконно. Под действием силы поверхностного натяжения расплавленный материал оптоволоконно образует сферическую каплю (линзу). При помощи камеры, встроенной в установку, автоматически определяется диаметр полученной капли. В случае, если диаметр не достиг требуемого значения, оптоволоконно снова пододвигается к зоне нагрева на один шаг и цикл повторяется. Если требуемый диаметр достигнут, цикл останавливается. В настоящей

Таблица 1. Результаты моделирования волоконных сферических микролинз

Table 1. Simulation results of fiber ball microlenses

Длина бессердцевинной вставки l , мкм	Угол сходимости, град	Тип пучка
110	-1,58	расходящийся
150	-0,36	расходящийся
180	0	коллимированный
200	0,29	сходящийся
220	0,57	сходящийся

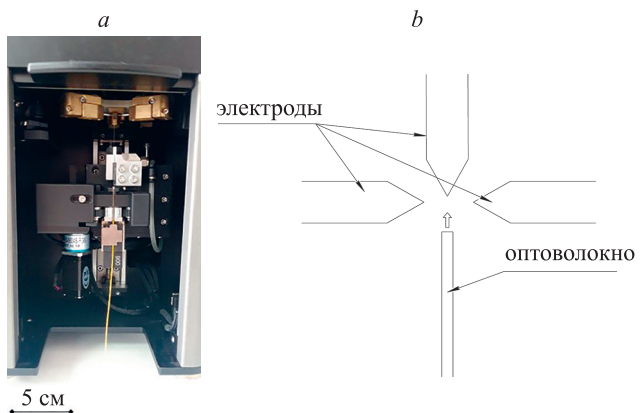


Рис. 2. Установка формирования волоконных сферических линз (а) и схематическое изображение устройства оплавления оптоволоконно (б)

Fig. 2. Lens forming station (a) and schematic representation of fiber fusion device (b)

работе при формировании всех сферических микролинз мощность разряда составляла 110 Вт, а длительность импульса — 1,5 с. Данный режим был экспериментально определен как оптимальный.

Для образования бессердцевинной вставки между одномодовым оптоволоком и волоконной сферической микролинзой к одномодовому оптоволокну SMF-28 с использованием автоматического сварочного аппарата для оптоволокну Mini 4S+ (FiberFox, Корея) предварительно приваривался сегмент многомодового (бессердцевинного) оптоволокну FG125LA. Волоконная микролинза формировалась на свободном торце приваренного сегмента. Длина сегмента многомодового оптоволокну L , необходимая для формирования определенной длины бессердцевинной вставки, рассчитывалась следующим образом:

$$L = l + D + l_1,$$

где l — необходимая длина вставки, определяемая путем моделирования линзы; D — диаметр линзы; l_1 — запас длины, учитывающий уход некоторой части материала оптоволокну на формирование линзы.

Параметр l_1 имеет определенное значение для каждого диаметра линзы и был определен экспериментально.

Технология изготовления волоконной сферической линзы включает в себя следующие операции.

1. Снятие с оптоволокну защитного покрытия термическим стриппером.
2. Очистка оптоволокну от клея изопропиловым спиртом.
3. Формирование ровного скола на торце оптоволокну электронным скальвателем для оптических волокон.
4. Проведение контроля качества скола на торце оптоволокну оптическим микроскопом. Качественным считается ровный бездефектный скол на торце волокна. При обнаружении дефекта на торце оптоволокну осуществляется его повторный скол.
5. Сварка очищенного сколотого одномодового оптоволокну с сегментом очищенного сколотого многомодового (бессердцевинного) оптоволокну произвольной длины автоматическим сварочным аппаратом. На рис. 3 представлена фотография области сварки, выполненная при помощи исследовательского металлографического микроскопа DM2700 M (Leica, Германия).
6. Формирование ровного скола сегмента многомодового оптоволокну на расстоянии L от места сварки для обеспечения требуемой длины бессердцевинной вставки.
7. Формирование сферической волоконной линзы с необходимым диаметром при помощи станции формирования сферических линз.
8. Проведение контроля качества линзы, измерение ее диаметра и смещения центра линзы относительно центральной оси оптоволокну.

В результате применения описанной технологии была изготовлена волоконная сферическая микролинза диаметром 300 мкм. В связи с ограниченной точностью скальвирования бессердцевинной вставки полученная

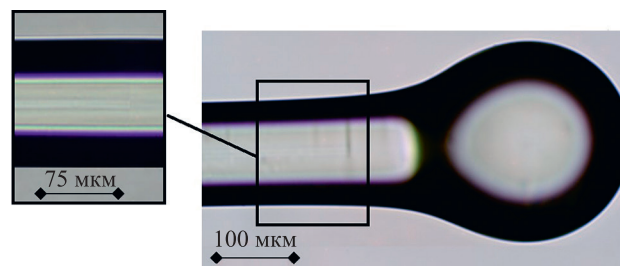


Рис. 3. Фотография волоконной сферической микролинзы, сформированной на свободном торце с бессердцевинной вставкой (на выноске приведено увеличенное изображение места сварки одномодового и многомодового оптоволокну)

Fig. 3. Photography of a fiber ball microlens formed on a free end with a coreless insert (an enlarged image of the place of welding of single-mode and multimode optical fibers is shown in the inset)

линза имела длину вставки 210 мкм вместо требуемых 180 мкм. Для экспериментальной проверки типа изготовленной волоконной сферической микролинзы (собирающая, рассеивающая или коллимирующая) использовалась измерительная установка, представленная на рис. 4.

В качестве источника оптического излучения применен полупроводниковый лазер с волоконным выходом 1782A-NM-100-02-FC-PM (Emcore, США) 5, обеспечивающий выходную мощность оптического излучения длиной волны 1550 нм на уровне 100 мВт. Для обеспечения стабильности генерации излучения у данного лазера реализована обратная связь с контроллером управления. Сформированная на оптическом волокне коллимирующая волоконная сферическая микролинза была состыкована с волоконным выходом лазера посредством коннектора FC. Выводящая из лазера излучение волоконная сферическая микролинза 2 и принимающее излучение оптоволокну марки SMF-28 с ровным сколом 4 помещались на микропозиционеры наноразмерной точности MAX607/M и MAX609/M (Thorlabs, США) 6, позволяющие изменять положения данных оптических элементов по осям x , y и z с точностью не хуже 10 нм, а также регулировать их углы поворота. Величина мощности оптического излучения, собранного принимающим оптоволоком с ровным сколом, измерялась измерителем оптической мощности PM20CH (Thorlabs, США) 7.

Для проверки типа изготовленной сферической микролинзы сколотое оптоволокну, принимающее излучение, устанавливалось на расстоянии h от оптоволокну с микролинзой. Далее расстояние h пошагово изменялось, и при каждом шаге фиксировалось значение оптической мощности, собираемое принимающим оптоволоком. Для каждого значения расстояния h положение сколотого оптоволокну по осям y и z подстраивалось до достижения максимальной возможной оптической мощности, фиксируемой измерителем мощности. На рис. 5 приведена зависимость улавливаемой принимающим сколотым оптоволоком оптической мощности, нормированной на максимальную излучаемую лазером оптическую мощность (η), при его отдалении от сферической микролинзы.

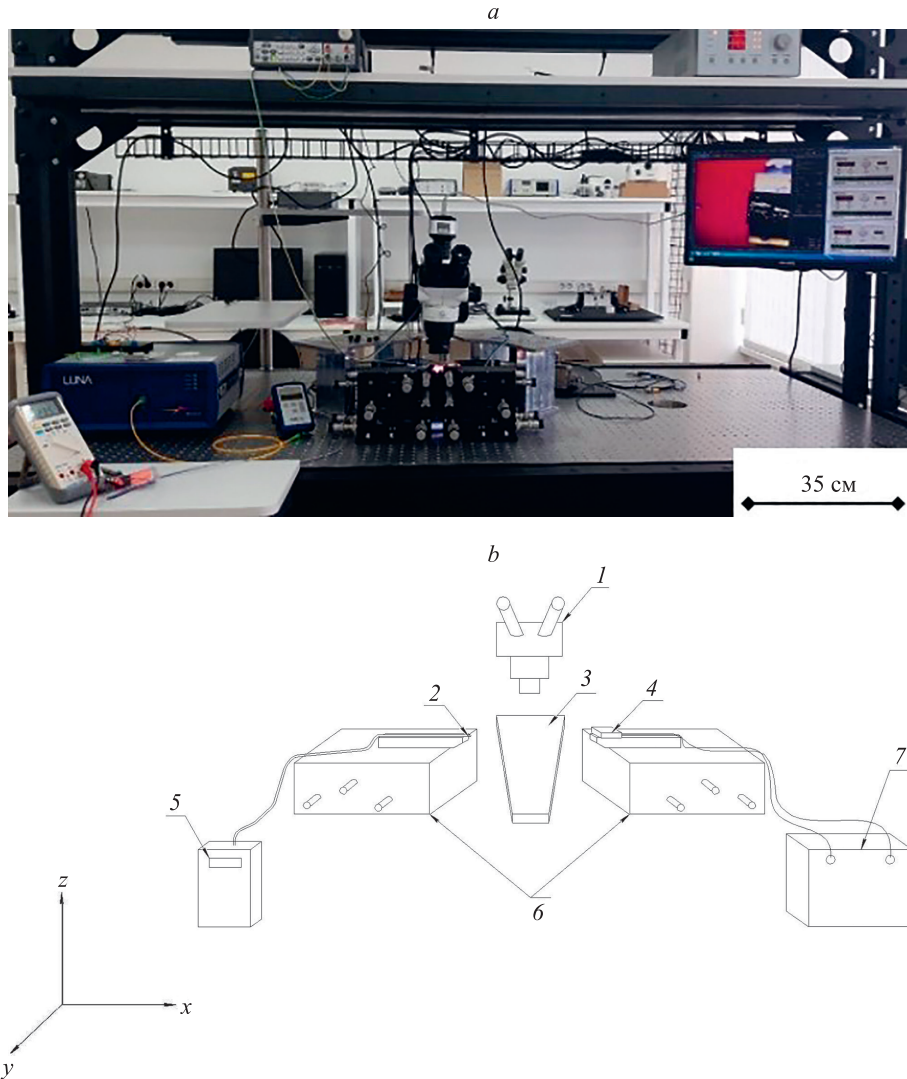


Рис. 4. Фотография исследовательской установки для оптических измерений (*a*) и ее схематическое изображение (*b*): 1 — оптический микроскоп; 2 — элемент системы, выводящий излучение из лазера; 3 — предметный столик; 4 — элемент системы, принимающий излучение; 5 — лазер; 6 — микропозиционеры; 7 — измеритель оптической мощности
Fig. 4. Photograph of the research installation for optical measurements (*a*) and its schematic representation (*b*): 1 — optical microscope; 2 — system element that outputs radiation from the laser; 3 — slide; 4 — system element that receives radiation; 5 — laser; 6 — micropositioners; 7 — optical power meter

Анализ полученной экспериментальной зависимости показал, что пучок оптического излучения на

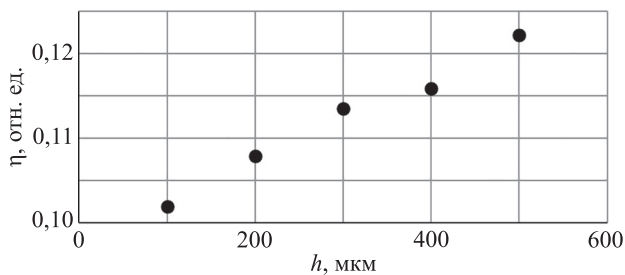


Рис. 5. Изменение улавливаемой сколотым торцом оптоволокна оптической мощности при его отдалении от сферической микролинзы
Fig. 5. Variation of optical power captured by the cleaved end of the optical fiber as it moves away from the ball microlens

выходе из микролинзы является сходящимся (при приближении к микролинзе). Формирование изготовленной и исследуемой сферическими микролинзами именно сходящегося пучка оптического излучения может быть связано как с отклонением полученной конечной длины бессердцевинной вставки относительно результатов моделирования, так и с отличием длины волны оптического излучения, на которой проводились данные исследования. Однако достаточно слабая зависимость собираемой оптической мощности от расстояния между волоконной сферической микролинзой и принимающим оптоволокном в пределах фокусного расстояния сферической микролинзы свидетельствует о пренебрежимо малом угле сходимости излучения. Следовательно, пучок на выходе из волоконной сферической микролинзы может считаться близким к коллимированному.

**Реализация системы вывода
оптического излучения на основе волоконной
сферической микролинзы**

На основе подготовленной по разработанной технологии волоконной сферической микролинзы была предложена система вывода оптического излучения из полупроводникового лазерного диода. Оптическая система состоит из дискретной сферической микролинзы и волоконной сферической микролинзы (рис. 6). Дискретная сферическая микролинза сформирована на основе оптоволокна FG125LA методом дугового оплавления с диаметром 250 мкм.

Важными параметрами системы вывода оптического излучения из источника в оптоволокно являются эффективность передачи оптической мощности и диапазон допустимого отклонения элементов системы от установленного положения. В данном случае эффективность передачи оптической мощности, которую обеспечивает оптическая система, это отношение оптических мощностей, поступившей в оптоволокно и на выходе источника излучения. Диапазон допустимого отклонения элементов системы от установленного положения определялся как диапазон отклонения оптического элемента, в пределах которого наблюдалось падение собираемой оптической мощности не более чем на 1 дБ относительно максимальной. В табл. 2 представлены экспериментально определенные значения эффективности передачи оптической мощности и диапазон допустимого отклонения элементов системы от установленного положения для предложенной оптической системы и для стыкового соединения лазера со сколотым оптоволокном.

При исследовании предлагаемой системы вывода оптического излучения использовалась исследовательская установка (рис. 4). Волоконная сферическая

микролинза подсоединялась к измерителю оптической мощности через оптический коннектор на сегменте оптоволокна и размещалась на одном из микроманипуляторов (рис. 4, б). Источник излучения — полупроводниковый чип лазерного диода OL3502M-2C1,2,3,4 (NeoPhotonics Corporation, США), обеспечивающий выходную мощность оптического излучения длиной волны 1310 нм не менее 13 мВт с углом расхождения лучей 20–40° — размещался на втором микроманипуляторе 2 (рис. 4, б). Дискретная сферическая микролинза размещалась на предметном столике MBT616D/M (Thorlabs, США) 3 (рис. 4, б). Для сравнения аналогичное исследование было проведено для стыкового соединения сколотого оптоволокна с источником излучения. Результаты оценки диапазона допустимого отклонения элементов исследуемых оптических систем вывода оптического излучения, а также эффективность передачи оптической мощности (нормированной на паспортное значение выходной оптической мощности лазера) приведены в табл. 2. Результаты представлены для оптимального положения принимающего элемента по оси *x* (рис. 4).

Исходя из результатов проведенного исследования, предлагаемая оптическая система лазер–линза–линзованное оптоволокно более чем в два раза превосходит стыковое соединение по эффективности передачи оптической мощности. Однако стоит отметить, что существуют оптические системы, обеспечивающие большие значения эффективности передачи оптической мощности [16]. При этом данная система обладает диапазоном допустимого отклонения волоконной линзы не менее 12,8 мкм, что в два раза больше, чем минимальное значение для стыкового соединения. Следовательно, использование данной системы уменьшает оптические потери, связанные отклонением радиофотонных компонент от оптимального положения при их монтаже

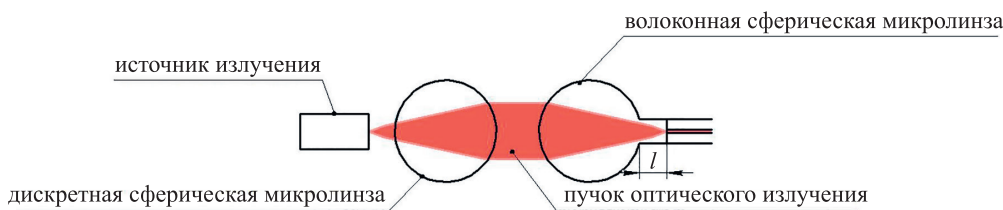


Рис. 6. Предлагаемая система вывода оптического излучения
Fig. 6. Proposed optical output system

Таблица 2. Результаты исследования двух оптических систем вывода оптического излучения из лазерного диода
Table 2. Research results of two optical systems for outputting optical radiation from a laser diode

Параметр	Оптическая система	
	предложенная оптическая система лазер–дискретная сферическая микролинза–волоконная сферическая микролинза	оптическая система лазер–сколотое оптоволокно
Допустимый диапазон отклонения по оси <i>y</i> , мкм	12,8	6,8
Допустимый диапазон отклонения по оси <i>z</i> , мкм	24,6	6,4
η , отн. ед.	0,3	0,14

в корпус. Значительное различие между диапазонами допустимого отклонения по осям y и z говорит о выраженной эллиптической форме пучка. Однако для согласования формы пучка с круглой формой поля моды в сердцевине оптоволокна может использоваться интегральный расширитель пучка, который преобразует эллиптическую форму пучка в сферическую.

Заключение

Изложенные в работе подходы по разработке коллимирующей волоконной сферической микролинзы диаметром 300 мкм и ее изготовлению методом дугового оплавления бессердцевинного оптоволокна с остаточной длиной бессердцевинной вставки на уровне 180 мкм позволили сформировать на ее основе эффективную систему вывода оптического излучения из полупроводникового лазерного диода. Предложенная система из полупроводникового лазерного диода состояла из дискретной сферической микролинзы диаметром

250 мкм и разработанной коллимирующей волоконной сферической микролинзы приваренной бессердцевинной вставкой к оптическому одномодовому волокну SMF-28. Разработанная система вывода оптического излучения позволяет повысить эффективность вывода излучения более чем в два раза по сравнению со стыковым соединением оптоволокна с источником излучения. При этом система обладает диапазоном допустимого отклонения элементов не менее 12,8 мкм. Эффективность ввода излучения в оптоволокно и чувствительность системы к отклонению ее элементов по оси y может быть улучшены путем увеличения диаметра обеих микролинз системы. Однако имеющаяся технология изготовления волоконных сферических микролинз методом дугового оплавления оптоволокна не позволяет с достаточной воспроизводимостью изготавливать линзы диаметром более 300 мкм. Таким образом, эффективность вывода излучения в дальнейшем будет повышаться за счет использования интегрального расширителя пучка.

Литература

1. Fibre Optic Communication / ed. by V. Herbert, G. Norbert. Springer Cham, 2017. 847 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42367-8>
2. Silicon-Based Photonics / ed. by E. Kasper, J. Yu. Jenny Stanford Publishing, 2020. 340 p.
3. Manolatu C., Haus H.A. Passive Components for Dense Optical Integration. New York: Springer New York, 2002. 170 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0855-7>
4. Jing Z., Ramana P.V., Hon-Shing J.L., Qingxin Z., Chandrappan J., Wei T.C., Chinq J.M., Liang C.T.W., Lee K.D. Design and characterization of taper coupler for effective laser and single-mode fiber coupling with large tolerance // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. V. 20. N 16. P. 1375–1377. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.926819>
5. Cheung Y.M., Yiu C.H. Simulation of the alignment sensitivity on the coupling efficiency of a ball-lens capped TO-can laser diode source into a single-mode fiber // Proc. of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging. 2002. 2002. P. 197–203. <https://doi.org/10.1109/emap.2002.1188837>
6. Mao J., Sheng H., Zhou C. A fiber coupling system based on the GRIN lens for use in all-fiber lidars // Journal of Russian Laser Research. 2012. V. 33. N 2. P. 186–195. <https://doi.org/10.1007/s10946-012-9272-0>
7. Joshi A., Becker D., Datta S. High-power handling, ultra-fast, GRIN lens-coupled photodetectors // Proceedings of SPIE. 2008. V. 6975. P. 69750R. <https://doi.org/10.1117/12.778485>
8. Zhang F., Zheng Y., Lu S., Luo D., Duan J. Coupling efficiency between ball lens capped laser diode chip and single mode fiber // Optik. 2018. V. 157. P. 497–502. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.076>
9. Fadhali M., Saktioto, Zainal J., Munajat Y., Ali J., Rahman R. Analysis of efficiency and misalignment tolerances in laser diode pigtailling using single ball lens // Journal of Applied Sciences Research. 2007. V. 3. N 12. P. 1778–1787.
10. Al-Azzawi A. Photonics: Principles and Practices. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2017. 968 p.
11. Фокина М.И., Собещук Н.О., Денисюк И.Ю. Исследование процессов формирования полимерного микроэлемента на торце оптического волокна в условиях значительного ингибирующего влияния кислорода на процесс // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 3. P. 69–75.
12. Идрисов Р.Ф. Повышение эффективности ввода лазерного излучения в волоконно-оптический световод с помощью согласующих микролинз // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 22. С. 148–152.
13. Zheng W. Optic lenses manufactured on fiber ends // Proc. of the 2015 Optoelectronics Global Conference (OGC). 2015. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ogc.2015.7336855>

References

1. Fibre Optic Communication. Ed. by V. Herbert, G. Norbert. Springer Cham, 2017, 847 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42367-8>
2. Silicon-Based Photonics. Ed. by E. Kasper, J. Yu. Jenny Stanford Publishing, 2020, 340 p.
3. Manolatu C., Haus H.A. Passive Components for Dense Optical Integration. New York, Springer New York, 2002, 170 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0855-7>
4. Jing Z., Ramana P.V., Hon-Shing J.L., Qingxin Z., Chandrappan J., Wei T.C., Chinq J.M., Liang C.T.W., Lee K.D. Design and characterization of taper coupler for effective laser and single-mode fiber coupling with large tolerance. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, vol. 20, no. 16, pp. 1375–1377. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.926819>
5. Cheung Y.M., Yiu C.H. Simulation of the alignment sensitivity on the coupling efficiency of a ball-lens capped TO-can laser diode source into a single-mode fiber. Proc. of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging, 2002, 2002, pp. 197–203. <https://doi.org/10.1109/emap.2002.1188837>
6. Mao J., Sheng H., Zhou C. A fiber coupling system based on the GRIN lens for use in all-fiber lidars. Journal of Russian Laser Research, 2012, vol. 33, no. 2, pp. 186–195. <https://doi.org/10.1007/s10946-012-9272-0>
7. Joshi A., Becker D., Datta S. High-power handling, ultra-fast, GRIN lens-coupled photodetectors. Proceedings of SPIE, 2008, vol. 6975, pp. 69750R. <https://doi.org/10.1117/12.778485>
8. Zhang F., Zheng Y., Lu S., Luo D., Duan J. Coupling efficiency between ball lens capped laser diode chip and single mode fiber. Optik, 2018, vol. 157, pp. 497–502. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.076>
9. Fadhali M., Saktioto, Zainal J., Munajat Y., Ali J., Rahman R. Analysis of efficiency and misalignment tolerances in laser diode pigtailling using single ball lens. Journal of Applied Sciences Research, 2007, vol. 3, no. 12, pp. 1778–1787.
10. Al-Azzawi A. Photonics: Principles and Practices. Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2017, 968 p.
11. Fokina M.I., Sobeschuk N.O., Denisjuk I.Yu. Analysis of polymeric microelement formation on optical fiber end under significant inhibiting influence of oxygen on photopolymerization process. Journal of Instrument Engineering, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 69–75. (in Russian)
12. Idrisov R.F. Increasing the efficiency of laser radiation input into a fiber-optic light guide using matching microlenses. Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike, 2016, no. 22, pp. 148–152. (in Russian)
13. Zheng W. Optic lenses manufactured on fiber ends. Proc. of the 2015 Optoelectronics Global Conference (OGC), 2015, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ogc.2015.7336855>

14. Méndez A.M., Morse T.F. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Academic Press, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369406-5.X5000-0>
15. Milenko K., Fuglerud S.S., Aksnes A., Ellingsen R., Hjelme D.R. Optimization of SERS sensing with micro-lensed optical fibers and Au nano-film // *Journal of Lightwave Technology*. 2020. V. 38. N 7. P. 2081–2085. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2958128>
16. Шейнбергер А.А., Степаненко М.В., Жидик Ю.С., Иваничко С.П., Майкова А.В. Исследование систем вывода излучения лазерного диода в одномодовое оптическое волокно // *Фотоника*. 2023. Т. 17. № 7. С. 526–541. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.526.538>
14. Méndez A.M., Morse T.F. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Academic Press, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369406-5.X5000-0>
15. Milenko K., Fuglerud S.S., Aksnes A., Ellingsen R., Hjelme D.R. Optimization of SERS Sensing with micro-lensed optical fibers and Au nano-film. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, no. 7, pp. 2081–2085. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2958128>
16. Sheinberger A.A., Stepanenko M.V., Zhidik Yu.S., Ivanichko S.P., Maykova A.V. Study of the systems for laser diode radiation output into a single-mode optical fiber. *Photonics Russia*, 2023, vol. 17, no. 7, pp. 526–541. (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.526.538>

Авторы

Жидик Юрий Сергеевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация, [sc 56369631000](https://orcid.org/0000-0001-7803-2086), <https://orcid.org/0000-0001-7803-2086>, zhidikyur@mail.ru

Шейнбергер Анна Андреевна — младший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9816-3294>, annasejnberger@gmail.com

Степаненко Михаил Валерьевич — научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 57201195430](https://orcid.org/0000-0002-6608-5743), <https://orcid.org/0000-0002-6608-5743>, mikhail.v.stepanenko@tusur.ru

Троян Павел Ефимович — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 6603012821](https://orcid.org/0000-0002-7349-0536), <https://orcid.org/0000-0002-7349-0536>, tpe@tusur.ru

*Статья поступила в редакцию 06.08.2024
Одобрена после рецензирования 20.09.2024
Принята к печати 15.11.2024*

Authors

Yury S. Zhidik — PhD, Leading Researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scientific Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 634055, Russian Federation, [sc 56369631000](https://orcid.org/0000-0001-7803-2086), <https://orcid.org/0000-0001-7803-2086>, zhidikyur@mail.ru

Anna A. Sheinberger — Junior Researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9816-3294>, annasejnberger@gmail.com

Mikhail V. Stepanenko — Scientific Researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 57201195430](https://orcid.org/0000-0002-6608-5743), <https://orcid.org/0000-0002-6608-5743>, mikhail.v.stepanenko@tusur.ru

Pavel E. Troyan — D.Sc., Professor, Leading Researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 6603012821](https://orcid.org/0000-0002-7349-0536), <https://orcid.org/0000-0002-7349-0536>, tpe@tusur.ru

*Received 06.08.2024
Approved after reviewing 20.09.2024
Accepted 15.11.2024*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»