



# Исследование систем вывода излучения лазерного диода в одномодовое оптическое волокно

А. А. Шейнбергер, М. В. Степаненко, Ю. С. Жидик, С. П. Иваничко, А. В. Майкова  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Предложена система вывода оптического излучения лазерного диода на основе дискретной сферической линзы и волоконной сферической линзы. Определена чувствительность к отклонению элементов от оптимального положения для следующих систем вывода оптического излучения лазерного диода: лазерный диод – сколотое оптоволокно, лазерный диод – коническое оптоволокно, лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно, лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза. Даны рекомендации по применению данных систем в корпусировании радиофотонных модулей, включающих фотонные интегральные схемы произведенные по InP-технологии.

**Ключевые слова:** вывод оптического излучения, оптические системы, оптическая линза, коническое оптоволокно, фотонные интегральные схемы, радиофотоника

Статья получена: 17.10.2023

Статья принята: 10.11.2023

## ВВЕДЕНИЕ

При сборке любых полупроводниковых фотонных интегральных схем (ФИС) в виде радиофотонных модулей неизбежно возникают отклонения элементов оптического тракта от установленного положения, связанные с технологическими возможностями позиционирующего оборудования, усадкой клеевых фиксирующих составов и т. д. Все это приводит к нежелательным потерям оптиче-

# Study of the Systems for Laser Diode Radiation Output Into a Single-Mode Optical Fiber

A. A. Sheinberger, M. V. Stepanenko, Yu. S. Zhidik, S. P. Ivanichko, A. V. Maykova  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

An optical radiation output system of a laser diode based on a discrete ball lens and a fiber ball lens is proposed. The sensitivity of the following optical radiation output systems of a laser diode to the deviation of elements from the optimal position is determined: laser diode – cleaved optical fiber, laser diode – tapered optical fiber, laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber, laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens. The recommendations are given for the use of these systems in packaging the microwave-photonic modules including the photonic integrated circuits produced with an InP technology.

**Keywords:** optical radiation output, optical systems, optical lens, tapered optical fiber, photonic integrated circuits, microwave photonics

Article received: October 17, 2023

Article accepted: November 10, 2023

## INTRODUCTION

When assembling any semiconductor photonic integrated circuits (PIC) in the form of microwave-photonic modules, some deviations of the optical path elements from the established position inevitably occur due to the technological capabilities of the positioning equipment, shrinkage of adhesive compounds, etc. All these phenomena lead to the unwanted optical power losses [1, 2]. In this regard, when selecting a radiation output system, it is necessary to know and consider the system sensitivity to the deviation of its elements from the optimal position. The subject of study is

ской мощности [1, 2]. В связи с этим при выборе системы вывода излучения необходимо знать и учитывать чувствительность системы к отклонению ее элементов от оптимального положения. Предметом исследования стала чувствительность различных систем вывода излучения лазерного диода в одномодовое оптическое волокно к отклонению элементов оптического тракта от оптимального положения.

Известны системы вывода оптического излучения, основанные на оптических волокнах с линзой Френеля на торце. Линза Френеля обеспечивает согласование числовых апертур источника излучения и принимающего оптоволокна [3, 4]. Также для оптического соединения источника излучения с принимающим оптоволокном может использоваться цилиндрическая линза на излучающей поверхности источника [5, 6]. Недостатком подобных систем является сложность процесса формирования линз Френеля и цилиндрических линз, основанного на методе электронно-лучевой литографии или ионно-лучевого травления. К более простым в исполнении системам вывода оптического излучения относятся системы на основе оптических волокон с конусной линзой, формируемой путем химического травления и электродугового оплавления оптоволокна [6]. Известны также оптические системы на основе линз с градиентом показателя преломления (GRIN-линз) [7]. Однако из-за высокой стоимости GRIN-линз предпочтение зачастую отдается дискретным сферическим линзам [8]. Наиболее простым методом вывода оптического излучения источника является стыковое соединение сколотого оптоволокна с источником/приемником излучения [9].

Таким образом, для данного исследования были выбраны наиболее простые в реализации системы вывода оптического излучения лазерного диода: лазерный диод – сколотое оптоволокно, лазерный диод – коническое оптоволокно, лазерный диод – линза – сколотое оптоволокно, а также лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза.

В связи с необходимостью корпусирования и сборки в виде радиофотонных модулей чипов ФИС электрооптического модулятора на InP, изготовленных коллективом авторов [10], возникла необходимость определение оптимального из вариантов конструкции системы вывода оптического излучения лазерного диода. Были исследованы различные конструкции систем вывода излучения лазерного диода в одномодовое оптическое волокно (лазерный диод – сколотое оптоволокно;

the sensitivity of various systems for laser diode radiation output into a single-mode optical fiber to the deviation of optical path elements from the optimal position.

There are well-known optical radiation output systems based on the optical fibers with a Fresnel lens at the end. The Fresnel lens ensures that the numerical apertures of the radiation source and the receiving optical fiber are matched [3, 4]. Moreover, a cylindrical lens on the emitting surface of the source can be applied to optically connect the radiation source to the receiving optical fiber [5, 6]. The disadvantage of such systems is complexity of the formation process for Fresnel lenses and cylindrical lenses, based on the electron beam lithography method or ion beam etching method. The simpler optical radiation output systems include various systems based on the tapered optical fibers made by chemical etching and electric arc melting of the optical fiber [6]. Some optical systems based on the lenses with a refractive index gradient (GRIN lenses) are also well-known [7]. However, due to the high cost of GRIN lenses, the discrete ball lenses often become the preferred option [8]. The simplest method for the optical radiation output from the source is a butt joint between a cleaved optical fiber with a radiation source/receiver [9].

Thus, for this study, the easiest systems for optical radiation output from a laser diode have been selected: laser diode – cleaved optical fiber, laser diode – tapered optical fiber, laser diode – lens – cleaved optical fiber, as well as laser diode – discrete ball lens – ball fiber lens.

Due to the need to package and assemble the PIC electrooptic modulator chips using InP produced by a team of authors [10] in the form of microwave-photonic modules, it has become necessary to determine the optimal design option for the laser diode optical radiation output system. Various designs of the systems for laser diode radiation output into a single-mode optical fiber were investigated (laser diode – cleaved optical fiber; laser diode – tapered optical fiber; laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber; laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens) following by the development of requirements to the optical path assembling process for the semiconductor photonic integrated circuits when they were packaged in the form of microwave-photonic modules.

To determine the sensitivity of laser diode optical radiation output systems to the deviation of their elements from the optimal position, the radiation source (laser diode) and radiation receiving elements



лазерный диод – коническое оптоволокно; лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно; лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза) и выработаны требования к процессу сборки оптического тракта полупроводниковых фотонных интегральных схем при их корпусировании в виде радиофотонных модулей.

Для определения чувствительности систем вывода оптического излучения лазерного диода к отклонению их элементов от оптимального положения источник излучения (лазерный диод) и элементы, принимающие излучение (сколотое оптоволокно, коническое оптоволокно, оптоволокно с волоконной сферической линзой), помещались на микропозиционеры. С помощью микропозиционеров варьировалось положение элементов по трем осям и углам поворота. В каждом положении измерялась оптическая мощность излучения, собранного принимающим элементом. Оптимальным считалось положение элементов, обеспечивающее наибольшую оптическую мощность, собираемую принимающим оптоволокном. Далее определялась чувствительность к отклонению элементов от оптимального положения как диапазон отклонения оптического элемента, в пределах которого наблюдалось падение собираемой оптической мощности не более чем на 50% от максимальной.

Была предложена система вывода оптического излучения лазерного диода на основе дискретной сферической линзы и волоконной сферической линзы. Определена чувствительность к отклонению элементов от оптимального положения для следующих систем вывода оптического излучения лазерного диода: лазерный диод – сколотое оптоволокно, лазерный диод – коническое оптоволокно, лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно, лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза.

В качестве критерия, определяющего оптимальное положение излучателя и принимающего устройства, выбран диапазон допустимого отклонения принимающего элемента. Было установлено превосходство системы вывода оптического излучения на основе дискретной сферической линзы и волоконной сферической линзы над иными исследованными устройствами вывода оптического излучения по выбранному критерию. Даны рекомендации по использованию систем вывода оптического излучения лазерного диода для минимизации потерь оптической мощности

(cleaved optical fiber, tapered optical fiber, optical fiber with a fiber ball lens) were placed on the micropositioners. The micropositioners were used to change the position of elements along three axes and rotation angles. At each position, the optical radiation power obtained by the receiving element was measured. The optimal position of the elements was a position providing the greatest optical power obtained by the receiving optical fiber. Further, sensitivity to the deviation of elements from the optimal position was determined as the range of the optical element deviation within which there was a drop in the obtained optical power by no more than 50% of the maximum value.

A laser diode optical output system based on a discrete ball lens and a fiber ball lens was proposed. The sensitivity to the deviation of elements from the optimal position was determined for the following systems for optical radiation output from a laser diode: laser diode – cleaved optical fiber, laser diode – tapered optical fiber, laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber, laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens.

The range of permissible deviation of the receiving element was selected as a criterion that determines optimal position of the emitter and the receiving device. The superiority of the optical radiation output system based on a discrete ball lens and a fiber ball lens over other optical radiation output devices being studied according to the selected criterion was established. The recommendations were given on the use of systems for optical radiation output from a laser diode to minimize the optical power losses in the photonic integrated circuits during their assembly in the form of microwave-photonic modules and operation.

## THE SYSTEMS FOR OPTICAL RADIATION OUTPUT FROM A LASER DIODE UNDER STUDY

The study was performed in relation to the following optical output systems: laser diode – cleaved optical fiber (Fig. 1a), laser diode – tapered optical fiber (Fig. 1b), laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber (Fig. 1c) and laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens (Fig. 1d).

A semiconductor laser diode of the OL3502M-2C1,2,3,4 series was selected as a source of optical radiation (NeoPhotonics Corporation). Its spot shape and the beam divergence angle met the operating requirements of most PICs produced using an InP technology. The laser diode applied had the following specifications: optical output power of at

в фотонных интегральных схемах при их сборке в виде радиофотонных модулей и эксплуатации.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Исследование проводилось для следующих систем вывода оптического излучения: лазерный диод – скелотое оптоволокно (рис. 1a), лазерный диод – коническое оптоволокно (рис. 1b), лазерный диод – дискретная литая линза – скелотое оптоволокно (рис. 1c) и лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза (рис. 1d).

В качестве источника оптического излучения был выбран полупроводниковый лазерный диод серии OL3502M-2C1,2,3,4 (NeoPhotonics Corporation), форма пятна и угол расходимости лучей которого соответствуют требованиям эксплуатации большинства ФИС, произведенных по InP-технологии. Используемый лазерный диод обладает следующими характеристиками: выходная мощность оптического излучения не менее 13 мВт, длина волны излучения – 1310 нм, угол расхождения лучей 20° по одной оси и 40° по другой. Во всех рассматриваемых системах использовалось оптоволокно марки SMF-28.

### Система лазерный диод – скелотое оптоволокно

В системе лазерный диод – скелотое оптоволокно оптическое излучение из лазерного диода выводится непосредственно в скелотое оптоволокно. Данная система является наиболее простой с точки зрения реализации [11]. Под скелотым оптоволоконном подразумевается одномодовое, скелотое под прямым углом, оптоволокно с гладким торцом без антиотражающего покрытия. Недостатком данной системы являются большие потери оптической мощности при выводе излучения лазерного диода. Это связано с отсутствием согласования числовых апертур скелотого оптоволокна и полупроводникового лазерного диода [12].

### Система лазерный диод – коническое оптоволокно

Коническое оптоволокно представляет собой оптоволокно с коническим проксимальным (входным) концом. Коническая форма проксимального конца обеспечивает согласование значений числовой апертуры источника излучения и принимающего оптоволокна [13]. В данном случае исследовалось коническое оптоволокно Raysung Photonics Inc с углом вершины конуса 90°.

least 13 mW, radiation wavelength of 1310 nm, beam divergence angle of 20° along one axis and 40° along the other one. All systems under consideration used SMF-28 optical fiber.

### Laser diode – cleaved optical fiber system

In the laser diode – cleaved optical fiber system, optical radiation from the laser diode is transferred directly into the cleaved optical fiber. This system is the simplest one in terms of implementation [11]. The cleaved optical fiber means a single-mode, normally cleaved, smooth-end optical fiber without any antireflection coating. The disadvantage of this system includes the large loss of optical power when outputting laser diode radiation. This is due to the lack of matching between the numerical apertures of the cleaved optical fiber and the semiconductor laser diode [12].

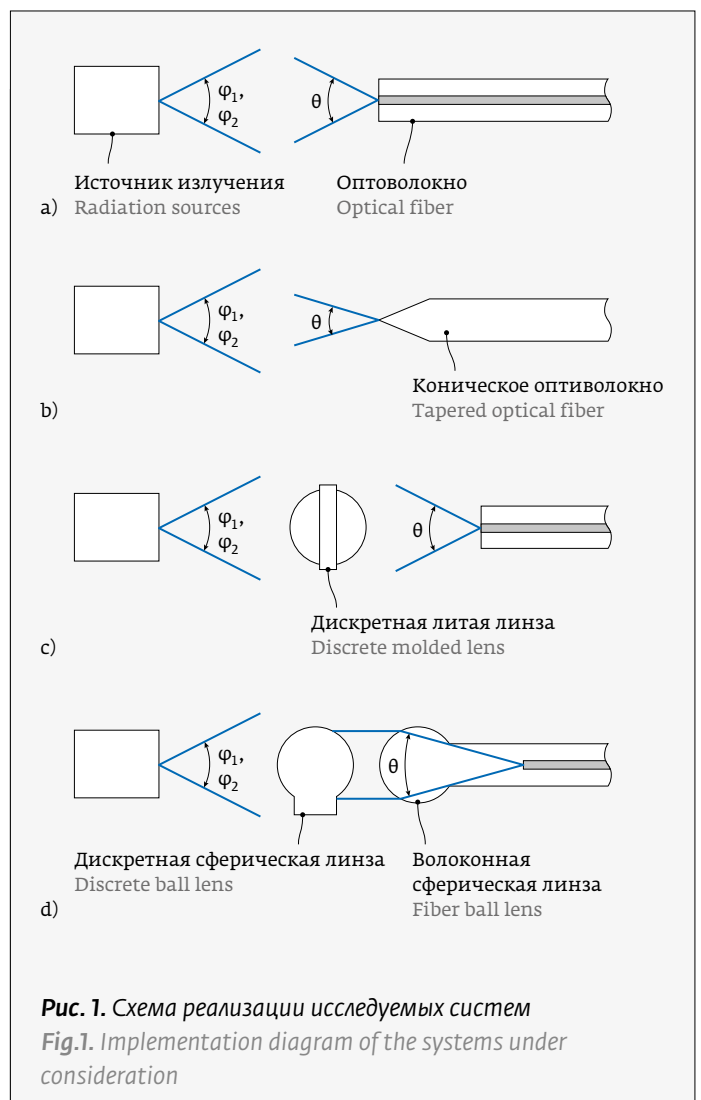


Рис. 1. Схема реализации исследуемых систем

Fig.1. Implementation diagram of the systems under consideration



### Система лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно

Дискретные линзы используются для повышения эффективности вывода излучения за счет его фокусировки или коллимации [14]. В данном случае использовалась литая линза LightPath с числовой апертурой 0,5. На линзу было нанесено антиотражающее покрытие, снижающее оптические потери в диапазоне длин волн 1100–1600 нм.

### Система лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза

В системе лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза использовались волоконные сферические линзы, изготовленные методом дугового оплавления торца оптоволокна. Дискретная сферическая линза была установлена в оптической системе таким образом, что оставшийся после оплавления сегмент оптоволокна, представляющий собой слитную конструкцию с линзой, не участвовал в распространении излучения, а являлся элементом крепления линзы. Диаметр дискретной сферической линзы составлял 250 мкм, диаметр волоконной сферической линзы – 300 мкм.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Определение оптимального положения элементов исследуемых систем производилось на экспериментальной установке (рис. 2), размещенной на оптическом столе Thorlabs с системой активной виброизоляции.

Лазерный диод и элементы, принимающие излучение (сколотое волокно, коническое волокно), помещались на микропозиционеры MAX607/M и MAX609/M (Thorlabs), позволяющие изменять их положения по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , а также регулировать их углы поворота. Стоит отметить, что микропозиционер MAX609/M для точного перемещения каждой из используемых осей имеет встроенные пьезодвигатели. Точность перемещения по любой из осей микропозиционера MAX609/M не хуже 10 нм. Далее определялось оптимальное положение элементов относительно друг друга. Для этого положение элементов по всем осям и углам поворота варьировалось с помощью микропозиционеров, и в каждом положении измерителем оптической мощности PM20CH (Thorlabs) измерялась оптическая мощность излучения, собранного принимающим элементом. Положение, обеспечивающее наибольшую мощность, считалось оптимальным.

### Laser diode – tapered fiber system

A tapered optical fiber is an optical fiber with a tapered proximal (input) end. The tapered shape of the proximal end ensures that the numerical aperture of the radiation source and the receiving optical fiber are matched [13]. In this case, the tapered fiber (Raysung Photonic Inc) with a 90° cone vertex angle has been studied.

### Laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber system

The discrete lenses are used to increase the radiation output efficiency by its focusing or collimation [14]. In this case, a molded LightPath lens with a numerical aperture of 0.5 has been used. An antireflection coating has been applied to the lens to reduce optical loss within the wavelength range of 1100–1600 nm.

### Laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system

In the laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system, the fiber ball lenses were used made by the arc melting method of the optical fiber end. A discrete ball lens was installed in the optical system in such a way that the optical fiber segment remaining after such melting being a solid structure with the lens, did not participate in the radiation propagation, but was a lens clamping device. The discrete ball lens diameter was 250  $\mu\text{m}$ , the fiber ball lens diameter was 300  $\mu\text{m}$ .

### Study methodology for the laser diode radiation output systems

The optimal position of the system elements under study was determined using a test setup (Fig. 2), placed on a Thorlabs optical table with an active vibration isolation system.

The laser diode and radiation receiving elements (cleaved fiber, tapered fiber) were placed on the micropositioners MAX607/M and MAX609/M (Thorlabs), allowing their positions to be changed along the  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes, with simultaneous adjustment of their rotation angles. It was worth noting that the MAX609/M micropositioner included the built-in ultrasonic motors for precise movement of each of the axes used. The movement accuracy along any of the axes of the MAX609/M micropositioner was no less than 10 nm. Further, the optimal position of elements relative to each other was determined. For this purpose, the position of elements along all axes and rotation angles was subject to variation using the micropositioners. At each position the optical power of radiation obtained by the receiving

Для исследования систем лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно и лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза применялась похожая методика. Дискретная линза (литая или сферическая) помещалась на предметный столик MBT616D/M (Thorlabs), а принимающий элемент (сколотое оптоволокно или волоконная сферическая линза) и лазерный диод закреплялись на микропозиционерах. Таким образом удавалось отдельно настроить оптимальное положение лазерного диода относительно дискретной линзы и принимающего элемента относительно дискретной линзы.

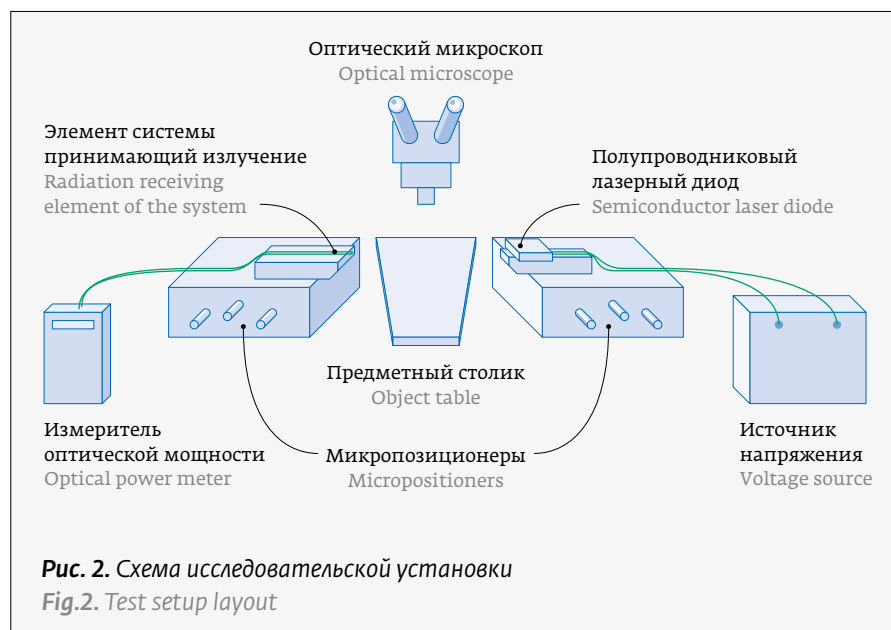
После определения оптимального положения элементов исследуемых систем исследовалась чувствительность к отклонению их отдельных элементов. В данном случае под чувствительностью системы к отклонению ее элементов подразумевается зависимость эффективности вывода излучения от изменения положения принимающего или передающего элемента системы.

При исследовании чувствительности осуществлялось перемещение с определенным шагом элемента, принимающего излучение относительно неподвижного лазерного диода либо, наоборот, лазерного диода относительно неподвижного принимающего элемента. При смещении элемента по одной оси его положение по другим осям оставалось неизменным и находилось в оптимальной точке, определенной ранее. При каждом перемещении на один шаг с помощью измерителя оптической мощности регистрировалась мощность оптического излучения, собранная принимающим элементом. Мощность излучения лазерного диода с помощью системы контроля мощности поддерживалась постоянной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Система лазерный диод – сколотое оптоволокно

В системе лазерный диод – сколотое оптоволокно оптимальное положение элементов было достигнуто при расстоянии 10 мкм между лазерным диодом и оптоволокном по оси  $x$ . Оптическая мощность, собираемая оптоволокном при оптимальном положении элементов, составила 1,87 мВт. Следо-



element was measured by a PM20CH optical power meter (Thorlabs). The position providing the highest power was considered optimal. A similar method was applied to study the following systems: laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber and laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens. The discrete lens (molded or ball one) was placed on the MBT616D/M object table (Thorlabs), and the receiving element (cleaved fiber or fiber ball lens) and laser diode were mounted on the micropositioners. Thus, it was possible to separately adjust the laser diode's optimal position relative to the discrete lens and the receiving element's optimal position relative to the discrete lens.

After determining the optimal position of the system elements under study, sensitivity to the deviation of their individual elements was investigated. In this case, the system sensitivity to deviation of its elements meant dependence of the radiation output efficiency on any changes in the position of the system's receiving or transmitting element.

During the sensitivity study, the radiation receiving element was moved at a certain pitch relative to a fixed laser diode or, conversely, a laser diode was moved relative to a fixed receiving element. When an element was shifted along one axis, its position along the other axes remained unchanged and was located at the optimal point determined earlier. With each movement at one pitch, the optical power obtained by the receiving element was recorded using an optical power meter. The radiation power of the laser diode was kept constant using a power control system.

вательно, эффективность вывода излучения в оптоволокно ( $\eta$ ) составила 0,144 относительно оптической мощности на выходе лазерного диода. В данной точке проведено исследование влияния отклонения сколотого волокна от оптимального положения на эффективность вывода излучения в оптоволокно. Далее были выбраны два положения сколотого оптоволокна по оси  $x$ , при которых оптическая мощность снижается не более чем на 20% по сравнению с мощностью в оптимальном положении. Первая выбранная точка располагалась на 10 мкм дальше найденной точки оптимального положения по оси  $x$ , вторая точка – на 20 мкм дальше. В данных точках так же была исследована чувствительность рассматриваемой системы к отклонению принимающего элемента (сколотого оптоволокна).

Графики зависимостей эффективности вывода излучения от смещения оптоволокна относительно оптимального положения по осям  $y$  и  $z$  для трех различных положений по оси  $x$  представлены на рис. 3 и 4.

По приведенным зависимостям для каждой выбранной точки по оси  $x$  был определен диапазон возможного отклонения сколотого оптоволокна, соответствующий допустимому уменьшению собираемой оптической мощности в 2 раза относительно максимальной для данной системы (табл. 1).

Анализируя рассматриваемую систему, можно сделать вывод, что влияние отклонения по оси  $y$  и по оси  $z$  равнозначно, а смещение сколотого оптоволокна от оптимального положения по оси  $x$  не приводит к существенному снижению чувствительности системы, однако приводит к падению мощности принимаемого оптического излучения.

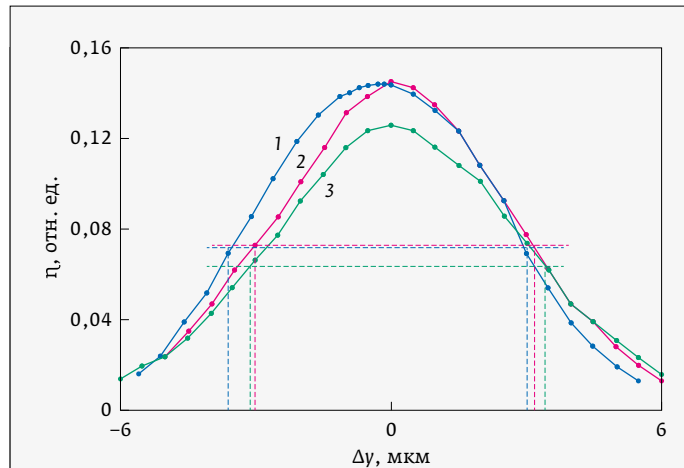
### Система лазерный диод – коническое оптоволокно

В системе лазерный диод – коническое оптоволокно так же определялось оптимальное положение конического оптоволокна относительно лазерного диода, после чего были исследованы две другие точки по оси  $x$ , для которых снижение мощности не превышало 20% относительно максимальной для данного случая. Одна из них расположена на 2 мкм ближе к источнику излучения, а вторая отдалена от источника излучения на 2,5 мкм дальше. Оптимальное положение элементов системы было достигнуто при расстоянии между лазерным диодом и коническим оптоволокном по оси  $x$  равным 20 мкм. Собираемая коническим оптоволокном оптическая мощность в оптималь-

## RESULTS

### Laser diode – cleaved optical fiber system

In the laser diode – cleaved optical fiber system, the optimal position of the elements was achieved at a distance of 10  $\mu\text{m}$  between the laser diode and the optical fiber along the  $x$  axis. The optical power obtained by the optical fiber at the optimal position of the elements was 1.87 mW. Consequently, the radiation output efficiency into the optical fiber ( $\eta$ ) was equal to 0.144 relative to the optical power at the laser diode output. At this point, the study was performed in relation to the effect of the cleaved fiber deviation from the optimal position on the radiation output efficiency into the optical fiber. Further, two positions of the cleaved optical fiber along the  $x$  axis were selected at which the optical power was decreased by no more than 20% compared to the power in the optimal position. The first selected point was located 10  $\mu\text{m}$  further than the obtained point of the optimal position along the  $x$  axis, the second point was 20  $\mu\text{m}$  further. At these points, sensitivity of the system under consideration to the receiving element deviation (cleaved optical fiber) was also investigated.



**Рис. 3.** Зависимость изменения собираемой сколотым оптоволокном оптической мощности от величины его смещения по оси  $y$ : 1 – для оптимального положения по оси  $x$ ; 2 – для положения по оси  $x$  на 10 мкм дальше оптимального положения; 3 – для положения по оси  $x$  на 20 мкм дальше оптимального положения

**Fig.3.** Dependence of changes in the optical power obtained by the cleaved optical fiber on its displacement value along the  $y$  axis: 1 – for the optimal position along the  $x$  axis; 2 – for a position along the  $x$  axis 10  $\mu\text{m}$  further than the optimal position; 3 – for a position along the  $x$  axis 20  $\mu\text{m}$  further than the optimal position

ном положении составила 12,95 мВт, следовательно,  $\eta = 0,996$ . Близкое значения эффективности вывода излучения коническим волокном ( $\eta = 1$ ) представлено в работе [15].

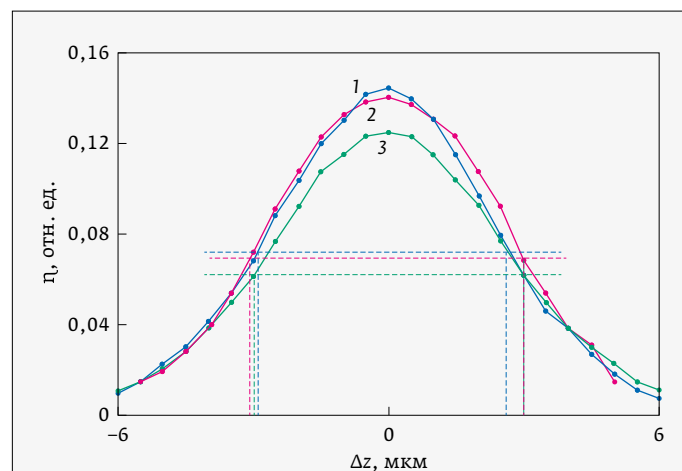
Была определена чувствительность рассматриваемой системы по уровню падения эффективности вывода излучения в 2 раза относительно максимального значения для данного случая (табл. 2).

Исходя из результатов проведенного исследования, система лазерный диод – коническое оптоволокно позволяет собирать достаточно высокую оптическую мощность, близкую к максимальной возможной. Однако данная система обладает высокой чувствительностью к смещению положения принимающего элемента относительно оптимального. Смещение конического оптоволокна по оси x относительно оптимальной точки не приводит к изменению чувствительности рассматриваемой системы. Кроме того, система лазерный диод – коническое оптоволокно более чувствительна к смещению по оси z, чем по оси y, что может быть связано с эллиптической формой светового пучка, выходящего с источника излучения.

**Таблица 1.** Результаты исследования системы лазерный диод – сколотое оптоволокно

**Table 1.** Study results related to the laser diode – cleaved optical fiber system

	Смещение оптоволокна по оси x относительно оптимального положения Optical fiber displacement along the x axis relative to the optimal position		
	0	-10 мкм -10 $\mu\text{m}$	-20 мкм -20 $\mu\text{m}$
Допустимый диапазон отклонения по оси y, мкм Permissible deviation range along the y axis, $\mu\text{m}$	6,1	6,4	6
Допустимый диапазон отклонения по оси z, мкм Permissible deviation range along the z axis, $\mu\text{m}$	5,7	6	6
$\eta$ , отн.ед $\eta$ , relative units	0,145	0,144	0,125



**Рис. 4.** Зависимость изменения собираемой сколотым оптоволокном оптической мощности от величины его смещения по оси z: 1 – для оптимального положения по оси x; 2 – для положения по оси x на 10 мкм дальше оптимального положения; 3 – для положения по оси x на 20 мкм дальше оптимального положения

**Fig.4.** Dependence of changes in the optical power obtained by the cleaved optical fiber on its displacement value along the z axis: 1 – for the optimal position along the x axis; 2 – for a position along the x axis 10  $\mu\text{m}$  further than the optimal position; 3 – for a position along the x axis 20  $\mu\text{m}$  further than the optimal position

The diagrams of radiation output efficiency versus the optical fiber displacement relative to the optimal position along the y and z axes for three various positions along the x axis are given in Fig. 3 and 4.

Based on the given dependencies, for each selected point along the x axis, the range of possible deviation of the cleaved optical fiber was determined relevant to the permissible halving of the obtained optical power relative to the maximum value for a given system (Table 1).

Having analyzed the system under consideration, it is possible to conclude that the influence of deviation along the y axis and along the z axis is equivalent. Moreover, displacement of the cleaved optical fiber from the optimal position along the x axis does not lead to a significant decrease in the system sensitivity, but it does lead to a power drop of the received optical radiation.

### Laser diode – tapered fiber system

Optimal position of the tapered optical fiber relative to the laser diode was also determined in the laser diode – tapered fiber system, followed by the study of two other points along the x axis, for which the power reduction did not exceed 20% of the maximum value for this case. One of them is located 2  $\mu\text{m}$  closer to the radiation source, and the second one is located





### Система лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволокно

В третьей исследуемой системе необходимо согласовать между собой три элемента – лазерный диод, линзу и сколотое оптоволокно, принимающее излучение. Таким образом данную систему можно рассматривать как две подсистемы: лазерный диод – линза и линза – сколотое оптоволокно.

Оптимальное положение элементов системы было достигнуто при следующих параметрах: расстояние между лазерным диодом и дискретной литой линзой по оси  $x$  составляло 200 мкм, расстояние между линзой и сколотым оптоволокном – 3 мм. Эффективность вывода излучения при оптимальном размещении элементов системы составляла 12 мВт, то есть  $\eta=0,923$ . В известных работах, описывающих аналогичные исследования, были представлены схожие результаты, а именно  $\eta=0,929$  [16] и  $\eta=0,9$  [17].

Технологические возможности совмещения линзы и лазерного диода обеспечивают точность установки не хуже  $\pm 15$  мкм относительно требуемого положения. В связи с этим был проведен эксперимент, в котором определялась зависимость изменения мощности оптического сигнала при изменении положения линзы относительно лазерного диода. Изменение положения осуществлялось в диапазонах  $\pm 15$  мкм от оптимального по всем исследуемым осям. Изменение оптической мощности по каждой из осей оценивалось при нахождении в оптимальном положении лазерного диода относительно линзы по двум другим осям. Стоит отметить, что при изменении положения линза-лазерный диод собирающее сколотое оптоволокно каждый раз подстраивалось в точку с максимальной собираемой оптической мощностью для данного положения.

Было установлено, что при использовании имеющихся технологических возможностей совмещения подсистемы лазерный диод-линза, падение эффективности вывода излучения составляет не более 4% от максимально возможной (с 0,791 до 0,75).

Дальнейшие исследования направлены на определение чувствительности системы к смещению оптоволокна относительно предварительно закрепленных в оптимальных положениях дискретной литой линзы и лазерного диода. Аналогично исследованиям вывода излучения, проведенным для системы лазерный диод – коническое оптоволокно, по оси  $x$  были выбраны дополнительно две точки, в которых эффективность вывода излучения снижается по сравнению с эффективностью

2.5  $\mu\text{m}$  further away from the radiation source. The optimal position of the system elements was achieved with a distance between the laser diode and the tapered optical fiber along the  $x$  axis being equal to 20  $\mu\text{m}$ . The optical power obtained by the tapered optical fiber at the optimal position was 12.95 mW, therefore,  $\eta=0,996$ . A similar value for the radiation output efficiency of a tapered fiber ( $\eta=1$ ) is given in the paper [15].

The system sensitivity under consideration was determined by the radiation output efficiency dropout level decreased by 2 times relative to the maximum value for this case (Table 2).

Based on the study results, the laser diode – tapered optical fiber system allows to gain the sufficiently high optical power being close to the maximum possible value. However, this system is highly sensitive to the displacement of the receiving element position relative to the optimal one. Displacement of the tapered optical fiber along the  $x$  axis relative to the optimal point does not lead to any changes in the system sensitivity under consideration. In addition, the laser diode – tapered fiber system is more sensitive to the displacement along the  $z$  axis than along the  $y$  axis that may be due to the elliptical shape of the light beam emerging from the radiation source.

**Таблица 2.** Результаты исследования системы лазерный диод – коническое оптоволокно

**Table 2.** Study results related to the laser diode – tapered optical fiber system

	Смещение оптоволокна по оси $x$ относительно оптимального положения Optical fiber displacement along the $x$ axis relative to the optimal position		
	0	+2 мкм +2 $\mu\text{m}$	-2,5 мкм -2.5 $\mu\text{m}$
Допустимый диапазон отклонения по оси $y$ , мкм Permissible deviation range along the $y$ axis, $\mu\text{m}$	1,8	1,95	1,8
Допустимый диапазон отклонения по оси $z$ , мкм Permissible deviation range along the $z$ axis, $\mu\text{m}$	1,48	1,48	1,6
$\eta$ , отн.ед $\eta$ , relative units	0,996	0,808	0,812

вывода в оптимальном положении не более чем на 20%. Данные точки располагались на расстояниях  $\pm 27$  мкм от оптимального положения.

Для каждого исследуемого положения оптоволоконной системы была определена чувствительность рассматриваемой системы по уровню падения эффективности вывода излучения на 50% от максимальной (табл. 3).

Исходя из результатов проведенного исследования, система лазерный диод – литая линза – склотовое оптоволокно позволяет собирать значительную часть оптической мощности, испускаемой лазерным диодом, при этом чувствительность системы по любой из исследуемых осей не хуже 7 мкм.

### Система лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза

В данной исследуемой системе необходимо согласовать между собой три элемента – лазерный диод, дискретную сферическую линзу и оптоволокно с волоконной сферической линзой, принимающее излучение. Таким образом, данную систему можно рассматривать как две подсистемы: лазерный диод – дискретная сферическая линза и дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза.

Оптимальное положение элементов системы было достигнуто при следующих параметрах: расстояние между лазерным диодом и дискретной линзой по оси  $x$  составляло 56,9 мкм. Эффективность вывода излучения при оптимальном размещении элементов системы составляла 3,89 мВт, то есть  $\eta = 0,3$ .

Смещение принимающего элемента по оси  $x$  в пределах от  $-50$  до  $50$  мкм не привело к падению эффективности вывода излучения, а большее смещение принимающей волоконной сферической линзы по оси  $x$  не предусмотрено условиями эксплуатации данной оптической системы (система должна быть компактной).

Была определена чувствительность рассматриваемой системы к отклонению волоконной сферической линзы по уровню падения собираемой мощности на 1 мВт от максимальной (табл. 4).

Исходя из результатов проведенного исследования, система лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза обладает диапазоном допустимого отклонения волоконной сферической линзы не менее 7,9 мкм. Значительное различие между диапазонами допустимого отклонения по осям  $y$  и  $z$  говорит о выраженной эллиптической форме пучка. В дальнейшем разработанную и исследованную в данной

### Laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber system

In the third system under study, it is necessary to coordinate three elements with each other, namely a laser diode, a lens and a cleaved optical fiber that receives radiation. Thus, this system can be considered as two subsystems: laser diode – lens and lens – cleaved optical fiber.

The optimal position of the system elements was achieved using the following parameters: the distance between the laser diode and the discrete molded lens along the  $x$  axis was  $200 \mu\text{m}$ , the distance between the lens and the cleaved optical fiber was  $3 \text{ mm}$ . The radiation output efficiency with the optimal placement of system elements was  $12 \text{ mW}$ , that is,  $\eta = 0.923$ . The well-known papers describing similar studies have shown the similar results, namely  $\eta = 0.929$  [16] and  $\eta = 0.9$  [17].

The technological capabilities of the lens and laser diode combination ensure the installation accuracy of not less than  $\pm 15$  microns relative to the required position. In this regard, an experiment was performed during which the dependence of changes in the optical signal power upon changing the lens position relative to the laser diode was determined. The position was changed in the range of  $\pm 15 \mu\text{m}$  from the optimal one along all axes under consideration. Change in the optical power along each of the axes

**Таблица 3.** Результаты исследования системы лазерный диод – линза – склотовое оптоволокно

**Table 3.** Study results related to the laser diode – lens – cleaved optical fiber system

	Смещение оптоволоконной линзы по оси $x$ относительно оптимального положения Optical fiber displacement along the $x$ axis relative to the optimal position		
	0	+27 мкм +27 $\mu\text{m}$	-27 мкм -27 $\mu\text{m}$
Допустимый диапазон отклонения по оси $y$ , мкм Permissible deviation range along the $y$ axis, $\mu\text{m}$	10	7,7	7,2
Допустимый диапазон отклонения по оси $z$ , мкм Permissible deviation range along the $z$ axis, $\mu\text{m}$	15,5	—	17,5
$\eta$ , отн.ед $\eta$ , relative units	0,923	—	0,762



работе систему вывода оптического излучения лазерного диода планируется применять с источником излучения с интегральным расширителем пучка. Интегральный расширитель пучка преобразует эллиптическую форму пучка в сферическую, что должно повысить эффективность вывода. Также эффективность вывода излучения в оптоволокно и чувствительность системы к отклонению ее элементов по оси  $y$  может быть повышена путем замены дискретной сферической линзы и путем увеличения диаметра обеих линз системы.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

На рис. 5 и 6 для рассматриваемых систем вывода излучения лазерного диода представлены зависимости эффективности вывода излучения при отклонении принимающих элементов от оптимального положения. Положение оптоволокна по оси  $x$  было выбрано оптимальным для каждой рассматриваемой системы.

С точки зрения минимизации оптических потерь при выводе излучения из полупроводниковых волноводов фотонных интегральных схем на основе InP наиболее эффективным является использование системы с коническим оптоволокном. Система с линзой в свою очередь обладает наименьшей чувствительностью к отклонениям из всех рассмотренных.

Эффективность вывода излучения лазерного диода в оптоволокно с помощью системы на основе дискретной сферической линзы и волоконной сферической линзы составила 0,3. Можно предположить, что при использовании интегрального преобразователя пучка, приводящего эллиптическую форму пучка к сферической, оптическая система

**Таблица 4.** Результаты исследования системы лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза

**Table 4.** Study results related to the laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system

Параметр Parameter	Значение Value
Допустимый диапазон отклонения по оси $y$ , мкм Permissible deviation range along the $y$ axis, $\mu\text{m}$	7,9
Допустимый диапазон отклонения по оси $z$ , мкм Permissible deviation range along the $z$ axis, $\mu\text{m}$	28,6
$\eta$ , отн.ед $\eta$ , relative units	0,3

was assessed when the laser diode was located in the optimal position relative to the lens along the other two axes. It was worth noting that when the lens and laser diode position was changed, the collecting cleaved optical fiber was adjusted each time to the point with the maximum obtained optical power for a given position.

It was found that when using the available technological capabilities of the laser diode and lens subsystem, the dropout radiation output efficiency was no more than 4% of the maximum possible value (from 0.791 to 0.75).

Further studies are aimed at determining the system sensitivity to the optical fiber displacement relative to the discrete molded lens and laser diode pre-fixed in the optimal positions. Similar to the radiation output studies performed for the laser diode – tapered optical fiber system, two additional points were selected along the  $x$  axis where the radiation output efficiency was decreased compared to the output efficiency in the optimal position by no more than 20%. These points were located at the distances of  $\pm 27 \mu\text{m}$  from the optimal position.

For each optical fiber position under consideration, the system sensitivity was determined by the dropout level of radiation output efficiency by 50% from the maximum value (Table 3).

Based on the study results, the laser diode – molded lens – cleaved optical fiber system allows to obtain a significant part of the optical power emitted by the laser diode, while the system sensitivity along any of the considered axes is not less than 7 microns.

### Laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system

In this system under study, it is necessary to coordinate three elements with each other, namely a laser diode, a discrete ball lens and an optical fiber with a fiber ball lens that receives radiation. Thus, this system can be considered as two subsystems: laser diode – discrete ball lens and discrete ball lens – fiber ball lens.

The optimal position of the system elements was achieved using the following parameters: the distance between the laser diode and the discrete lens along the  $x$  axis was  $56.9 \mu\text{m}$ . The radiation output efficiency with the optimal placement of system elements was 3.89 mW, that is,  $\eta = 0.3$ .

The receiving element displacement along the  $x$  axis in the range from  $-50$  to  $50 \mu\text{m}$  did not lead to a drop in the radiation output efficiency. However, a larger displacement of the receiving fiber ball



на основе дискретной сферической линзы и волоконной сферической линзы может обеспечить эффективность вывода излучения более 0,9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что коническое оптоволокно обеспечивает высокую эффективность вывода излучения при высокой чувствительности к отклонению и может применяться при тестировании оптоэлектронных устройств. Применение конического оптоволокна нецелесообразно при корпусировании фотонных интегральных схем и реализации технологии гибридной интеграции. Применение системы лазерный диод – дискретная литая линза – оптоволокно рекомендуется в случае, когда при сборке или эксплуатации оптоэлектронных устройств возможное смещение по любой из осей составляет до 2,85 мкм. Предложенная нами система лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза превосходит все исследованные оптические системы по диапазону допустимого отклонения. Система лазерный диод – склотовое оптоволокно в свою очередь не рекомендуется к применению, так как для данной системы характерны значи-

лens along the  $x$  axis was not provided for by the operating conditions of this optical system (the system must be compact).

The system sensitivity under consideration to the deviation of the fiber ball lens in terms of the dropout level of power obtained by 1 mW from the maximum value was determined (Table 4).

Based on the study results, the laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system has a permissible deviation range of the fiber ball lens of at least 7.9  $\mu\text{m}$ . The significant difference between the allowable deviation ranges along the  $y$  and  $z$  axes indicates a significant elliptical beam shape. In the future, the laser diode optical radiation output system developed and studied in this paper is planned to be used with a radiation source and an integral beam expander. The integral beam expander converts the elliptical beam shape into a ball one that should increase the output efficiency. Moreover, the efficiency of radiation output into the optical fiber and the system sensitivity to deviation of its elements along the  $y$  axis can be increased by replacing the discrete ball lens and by increasing the diameter of both lenses in the system.



## XXI Международная конференция «ОПТИКА ЛАЗЕРОВ» ICLO 2024

*г. Санкт-Петербург, Россия, 01-05 июля 2024 г.*

<https://www.laseroptics.org/>

[conference@laseroptics.org](mailto:conference@laseroptics.org)

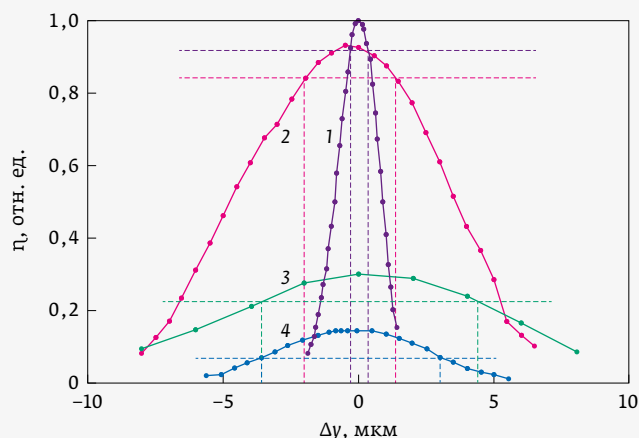
Тел.: +7 (812) 323 6348

Факс: +7 (812) 334 0824

Твердотельные лазеры  
Высокомощные лазеры  
Полупроводниковые лазеры, материалы и устройства  
Управление лазерным излучением  
Сверхсильные поля и сверхбыстрые процессы  
Лазеры и системы для визуализации,  
зеленой фотоники и устойчивого развития  
Лазеры для космических систем связи,  
локации, геодезии и навигации  
Нелинейная фотоника  
Оптические наноматериалы  
Лазеры на свободных электронах  
Нелинейная квантовая фотоника  
Биофотоника

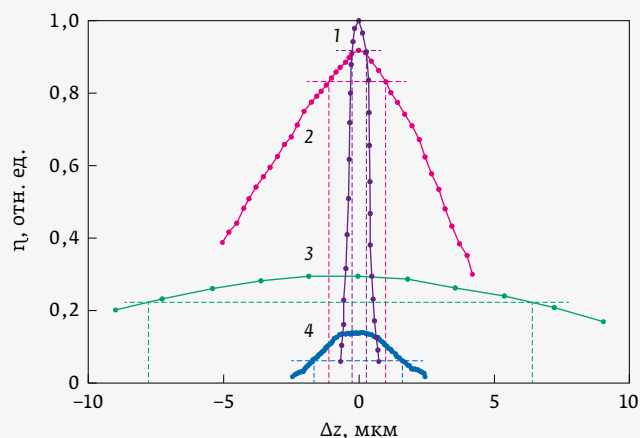
Выставка

*Официальный язык конференции - английский*



**Рис. 5.** Зависимость изменения собираемой оптоволоконной оптической мощности от величины его смещения по оси  $y$ : 1 – лазерный диод – коническое оптоволоконно; 2 – лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволоконно; 3 – лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза; 4 – лазерный диод – сколотое оптоволоконно

*Fig.5.* Dependence of changes in the optical power obtained by the optical fiber on its displacement value along the  $y$  axis: 1 – laser diode – tapered optical fiber; 2 – laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber; 3 – laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens; 4 – laser diode – cleaved optical fiber



**Рис. 6.** Зависимость изменения собираемой оптоволоконной оптической мощности от величины его смещения по оси  $z$ : 1 – лазерный диод – коническое оптоволоконно; 2 – лазерный диод – дискретная литая линза – сколотое оптоволоконно; 3 – лазерный диод – дискретная сферическая линза – волоконная сферическая линза; 4 – лазерный диод – сколотое оптоволоконно

*Fig.6.* Dependence of changes in the optical power obtained by the optical fiber on its displacement value along the  $z$  axis: 1 – laser diode – tapered optical fiber; 2 – laser diode – discrete molded lens – cleaved optical fiber; 3 – laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens; 4 – laser diode – cleaved optical fiber

тельные потери оптической мощности и высокая чувствительность к отклонению ее элементов.

Полученные результаты исследования будут использованы в дальнейшей работе авторов при проектировании и сборке фотонных интегральных схем в корпусах радиофотонных модулей.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 5 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040).

### REFERENCES

1. **Jing Z., Ramana P. V., Hon-Shing J. L., Qingxin Z., Chandrappan J., Wei T. C. et al.** Design and characterization of taper coupler for effective laser and single-mode fiber coupling with large tolerance. *IEEE Photonics Technology Letters* 2008; 20:1375–7. <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.926819>.
2. **Cheung YM, Yiu CH.** Simulation of the alignment sensitivity on the coupling efficiency of a ball-lens capped TO-can laser diode source into a single-mode fiber. *Proceedings of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging*. 2002., 2002, p. 197–203. <https://doi.org/10.1109/EMAP.2002.1188837>.
3. **Prasciolu M., Cojoc D., Cabrini S., Businaro L., Candeloro P., Tormen M. et al.** Design

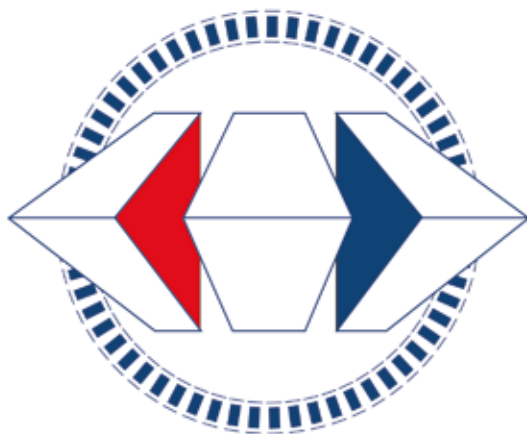
### COMPARATIVE ANALYSIS OF LASER DIODE RADIATION OUTPUT SYSTEMS

Figures 5 and 6 show dependences of the radiation output efficiency for the laser diode radiation output systems under consideration when the receiving elements deviate from the optimal position. The optical fiber position along the  $x$  axis was selected to be optimal for each system under study.

In terms of minimizing optical losses when the radiation is transferred from the semiconductor waveguides of the InP-based photonic integrated circuits, the most efficient method is to use the system with a tapered optical fiber. In turn, the system with a lens has the least sensitivity to deviations among all considered systems.

The output efficiency of laser diode radiation into an optical fiber using a system based on a discrete ball lens and a fiber ball lens was equal to 0.3. It can be assumed that when using an integral beam converter that converts an elliptical beam shape to a ball one, an optical system based on a discrete ball lens and a fiber ball lens can provide a radiation output efficiency of more than 0.9.

**28-30  
НОЯБРЯ 2023**



**РОССИЙСКИЙ  
ПРОМЫШЛЕННИК**  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА



**УСТОЙЧИВОСТЬ  
И РАЗВИТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

**EXPOFORUM**

**12+**



- and fabrication of on-fiber diffractive elements for fiber-waveguide coupling by means of e-beam lithography. *Microelectron Eng.* 2003;67–68:169–74. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(03\)00068-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00068-6).
4. **Fu Y, Bryan NKA.** Integration of micro-optical elements with top-end of fibers via focused ion beam direct fabrication. In: Sheng Y, Hsu D, Yu C, Lee B, editors. *Holography, Diffractive Optics and Applications II*. SPIE. 2005;5636:136–142. <https://doi.org/10.1117/12.570124>.
  5. **Fu Y, Bryan NKA, Shing ON.** Integrated micro-cylindrical lens with laser diode for single-mode fiber coupling. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000;12:1213–5. <https://doi.org/10.1109/68.874239>.
  6. **Karnaushkin P., Ponomarev R.** Tapered optical fiber for introducing radiation into a waveguide of small diameter. *Perm University Herald. Physics*. 2017;0. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-1-54-64> (In Russ.).  
Карнаушкин П. В., Пономарев Р. С. Волоконный световод с конусной линзой для ввода излучения в волновод малого диаметра. *Вестник Пермского Университета. Физика*. 2017;1: 54–64. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-1-54-64>.
  7. **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;33:186–95. <https://doi.org/10.1007/s10946-012-9272-0>.
  8. **Jiang W, Sun Y, Chen RT, Guo B, Horwitz J, Morey W.** Ball-lens based optical add-drop multiplexers: design and implementation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2002;14:825–7. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.1003106>.
  9. *Laser Diode Microsystems n. d.*
  10. **Shurygin Yu. A., Ishutkin S. V., Shiryaev B. V., Zhidik Yu. S.** Manufacturing of electro-optical modulators based on InP for fiber optic systems and conducting automated visual inspection of their surface for defects. *Proceedings of TUSUR University*. 2022;25:21–7. (In Russ.).  
Шурыгин Ю. А., Ишуткин С. В., Ширяев Б. В., Жидик Ю. С. Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов. *Доклады ТУСУР*. 2022;25:21–7.
  11. **Guzowski B, Lisik Z, Tosik G.** Realization of optical fibers terminated with ball lenses. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 2016;64. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0031>.
  12. **Govind P. Agrawal.** *Fiber-Optic Communication Systems*. 2021.
  13. Méndez AMTF. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Academic Press; 1st edition; 2007.
  14. **Al-Azzawi A.** *Fiber Optics: Principles and Practices*. CRC Press; 2006.
  15. **Malki A, Bachelot R, Lauwe V.** Two-step process for micro-lens-fibre fabrication using a continuous CO<sub>2</sub> laser source. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2001;3:291. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/3/4/310>.
  16. **Zhang F., Zheng Y., Lu S., Luo D., Duan J.** Coupling efficiency between ball lens capped laser diode chip and single mode fiber. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics* 2017;157. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.076>.
  17. **Fadhali M., Ali J., Zainal Y., Munajat J., Rahman R.** Analysis of efficiency and misalignment tolerances in laser diode pigtailling using single ball lens. *J. Appl. Sci. Res.* 2007;3:1778–87.

## АВТОРЫ

- Анна Андреевна Шейнбергер, м. н. с., Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, (ТУСУР), Томск, Россия.  
ORCID: 0000-0001-9816-3294
- Михаил Валерьевич Степаненко, н. с., ЛИОР, ТУСУР, Томск, Россия.  
ORCID: 0000-0002-6608-5743
- Юрий Сергеевич Жидик, к. т. н., в. н. с., ЛИОР, доц. каф. Физической электроники ТУСУР, ТУСУР, Томск, Россия.  
ORCID: 0000-0001-7803-2086
- Светлана Павловна Иваничко, м. н. с., ЛИОР, ТУСУР, Томск, Россия.  
ORCID: 0009-0000-9818-9646
- Анастасия Владимировна Майкова, м. н. с., ЛИОР, ТУСУР, Томск, Россия.  
ORCID: 0009-0008-7074-4175

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА КАЖДОГО ИЗ АВТОРОВ В РАБОТУ

А. А. Шейнбергер: проведение и обсуждение результатов эксперимента; М. В. Степаненко: постановка цели исследования и разработка методики проведения эксперимента; Ю. С. Жидик: подготовка оборудования для проведения эксперимента; С. П. Иваничко: обработка и обсуждение результатов эксперимента; А. В. Майкова: проведение эксперимента.

## CONCLUSION

The studies performed have shown that the tapered optical fiber provides high radiation output efficiency with the high sensitivity to deviation and can be used for testing the optoelectronic devices. The application of tapered optical fiber is impractical for packaging the photonic integrated circuits and implementing the hybrid integration technology. The use of a laser diode – discrete molded lens – optical fiber system is recommended when a possible displacement along any of the axes is up to 2.85 microns during assembly or operation of the optoelectronic devices. Our proposed laser diode – discrete ball lens – fiber ball lens system dominates over all studied optical systems in terms of the permissible deviation range. In turn, the laser diode – cleaved optical fiber system is not recommended for application, since this system is specified by significant losses of the optical power and high sensitivity to the deviation of its elements.

The obtained study results will be used in the further work for design and assembly of the photonic integrated circuits in the microwave-photonic module packages.

## ACKNOWLEDGEMENT

The work was performed by a team of the scientific laboratory of integrated optics and microwave-photonics with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement No. 075-03-2020-237/1 dated March 5, 2020 (internal project No. FEWM-2020-0040).

## AUTHORS

- Anna A. Sheinberger, Junior Researcher, Laboratory of Integrated Optics and Radiophotonics (LIOR), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia.  
ORCID: 0000-0001-9816-3294
- Mikhail V. Stepanenko, Researcher, LIOR, TUSUR, Tomsk, Russia.  
ORCID: 0000-0002-6608-5743
- Yury S. Zhidik, Cand. of Sciences(Eng.), Leading Researcher, LIOR, TUSUR, Associate Professor of the department. Physical electronics TUSUR, Tomsk, Russia.  
ORCID: 0000-0001-7803-2086
- Svetlana P. Ivanichko, Junior Researcher, LIOR, TUSUR, Tomsk, Russia.  
ORCID: 0009-0000-9818-9646
- Anastasiia V. Maykova, Junior Researcher, LIOR, TUSUR, Tomsk, Russia.  
ORCID: 0009-0008-7074-4175

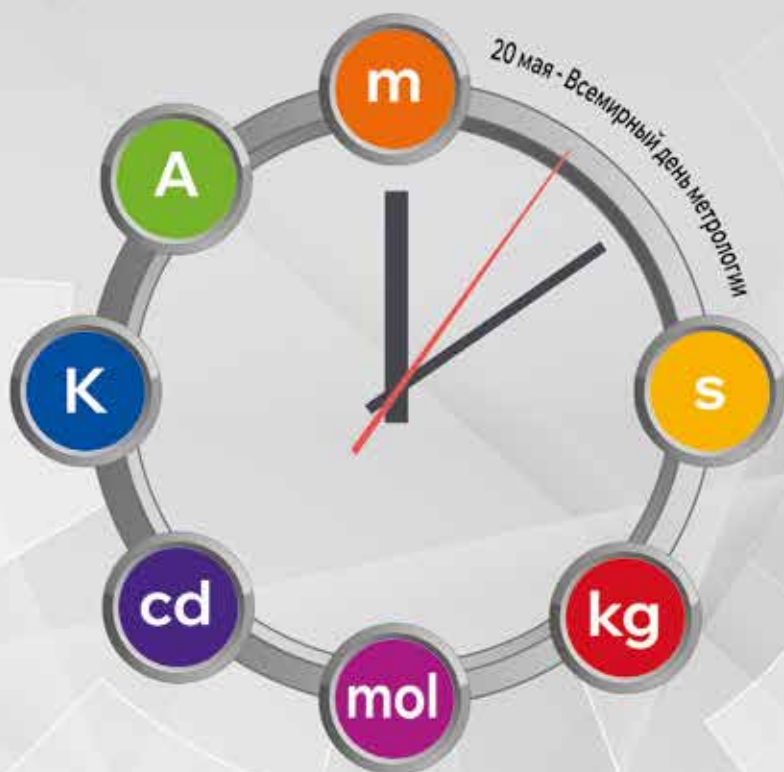
## THE CONTRIBUTION OF EACH AUTHOR TO THE WORK

A. A. Sheinberger: conducting and discussing the results of the experiment; M. V. Stepanenko: setting the research goal and developing the experimental methodology; Yu. S. Zhidik: preparation of equipment for the experiment; S. P. Ivanichko: processing and discussion of the experimental results; A. V. Maykova: conducting the experiment.

18-я МОСКОВСКАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

# metrol expo '2024

**ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ -  
ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ**



ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ В ОБЛАСТИ  
МЕТРОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

**21-23 мая | Москва | ВДНХ**

-  [metrol.exprom.ru](http://metrol.exprom.ru)
-  +7 (495) 937-40-23
-  [metrol@exprom.ru](mailto:metrol@exprom.ru)

Получить  
бесплатный  
пригласительный  
билет:

