

УДК 621.3.087.54

## Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов

Ивашко А.М.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

<sup>2</sup>НИЦ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета,  
пр. Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

Поступила 15.11.2016

Принята к печати 06.01.2017

При изготовлении лазерных систем часто измеряют характеристики лазерного излучения по методу фокального пятна, для которого необходимо установить систему регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента. Целью данной работы являлась разработка нового принципа установки матричного фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента и лазерного излучателя для реализации предложенного метода в измерительном приборе.

В предложенном методе несколько пучков фокусируются положительной линзой, при этом оси падающих пучков параллельны ее оптической оси. Задача нахождения фокальной плоскости сводится к продольной подвижке фотоприемника для определения плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы и содержащей точку пересечения осей пучков. Лазерный излучатель построен на основе продольной диодной накачки и микрочип-конфигурации резонатора, особенностью которого является фокусировка излучения от каждого лазерного диода в отдельную зону активного элемента. За счет прокачки независимых областей активного элемента, для которых зеркала резонатора являются общими, реализуется генерация лазерных пучков с параллельными осями.

Теоретически показано, что при использовании современных анализаторов лазерного излучения обеспечивается определение положения фокальной плоскости с точностью не менее 1 %. Предложенный непрерывный лазер генерировал в спектральной области около 1 мкм два осесимметричных пучка с расходимостью около 10 мрад и Гауссовым профилем интенсивности, оси которых параллельны между собой. Регулировка тока питания лазерных диодов накачки позволяла изменять мощность каждого генерируемого пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик генерируемого излучения. Расстояние между генерируемыми пучками может варьироваться от 0,5 до 5 мм.

Предложен метод определения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента при использовании матричного фотоприемника и нескольких световых пучков, оси которых параллельны оптической оси фокусирующего компонента без применения дополнительных оптических устройств. Продемонстрирован лазерный излучатель для реализации предложенного метода в измерительном приборе, который не требует прецизионных механических устройств и значительно сократит время проведения измерения. Характеристики генерируемого излучения позволяют обеспечить определение положения фокальной плоскости с точностью не менее 1 %. Габаритные размеры излучателя составили  $70 \times 40 \times 40$  мм<sup>3</sup>, энергопотребление – менее 7 Вт на каждый пучок.

**Ключевые слова:** фокальная плоскость, фокусирующий компонент, оптическая ось, лазер, матричный фотоприемник.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

**Адрес для переписки:**

Ивашко А.М.

ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

**Address for correspondence:**

Ivashko A.M.

JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

**Для цитирования:**

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.

Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 1. – С. 49–54.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

**For citation:**

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.

[Method for determination of focal plane location of focusing components].

*Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements].

2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

# Method for determination of focal plane location of focusing components

Ivashko A.M.<sup>1</sup>, Kisel V.E.<sup>2</sup>, Kuleshov N.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Peleng»,  
Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

<sup>2</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 15.11.2016

Accepted for publication 06.01.2017

## Abstract

Mass-production of different laser systems often requires utilization of the focal spot size method for determination of output laser beam spatial characteristics. The main challenge of this method is high accuracy maintenance of a CCD camera beam profiler in the collecting lens focal plane. The aim of our work is development of new method for placing of photodetector array in the collecting lens focal plane with high accuracy.

Proposed technique is based on focusing of several parallel laser beams. Determination of the focal plane position requires only longitudinal translation of the CCD-camera to find a point of laser beams intersection. Continuous-wave (CW) diode-pumped laser emitting in the spectral region near 1 μm was created to satisfy the requirements of the developed technique. Designed microchip laser generates two stigmatic Gaussian beams with automatically parallel beam axes due to independent pumping of different areas of the one microchip crystal having the same cavity mirrors.

It was theoretically demonstrated that developed method provides possibility of the lenses focal plane determination with 1 % accuracy. The microchip laser generates two parallel Gaussian beams with divergence of about 10 mrad. Laser output power can be varied in the range of 0.1–1.5 W by changing the pumping laser diode electrical current. The distance between two beam axes can be changed in the range of 0.5–5.0 mm.

We have proposed method for determination of positive lens focal plane location by using of CCD-camera and two laser beams with parallel axes without utilization of additional optical devices. We have developed CW longitudinally diode pumped microchip laser emitting in the 1-μm spectral region that can be used in the measuring instrument that doesn't require precision mechanical components for determination of focal plane location with 1 % accuracy. The overall dimensions of laser head was 70 × 40 × 40 mm<sup>3</sup> and maximum power consumption was 7W per one laser beam.

**Keywords:** focal plane, focusing component, optical axis, laser, photodetector array.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

---

### Адрес для переписки:

Ивашко А.М.  
ОАО «Пеленг»,  
ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь  
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

### Address for correspondence:

Ivashko A.M.  
JSC «Peleng»,  
Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus  
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

### Для цитирования:

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.  
Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 1. – С. 49–54.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

### For citation:

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.  
[Method for determination of focal plane location of focusing components].  
*Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements].  
2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

## Введение

Измерение пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения, таких как расходимость и пространственное распределение плотности мощности в дальней зоне, является неотъемлемой частью процессов изготовления и испытания лазерных систем. Одним из наиболее распространенных методов измерения указанных характеристик лазерного излучения является метод фокального пятна [1, 2].

При подготовке к измерениям характеристик лазерного излучения по методу фокального пятна необходимо обеспечить коаксиальность осей лазерного пучка и измерительной оптической системы, отсутствие виньетирования, соответствие измерительной оптической системы спектральным и пространственно-энергетическим характеристикам проверяемого источника излучения и малые аберрации оптической системы. Также одним из существенных условий для корректного проведения измерения по методу фокального пятна является установка системы регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента.

Установку системы регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента можно обеспечить несколькими способами [3]: по удаленному предмету; методом автоколлимации; с помощью плоскопараллельной пластинки и дополнительной зрительной трубы. На практике часто применяют метод измерения рабочих расстояний от базовых поверхностей, частным случаем которого является измерение заднего фокального отрезка [4]. В некоторых случаях можно воспользоваться установкой системы регистрации в расчетное положение с конструктивной точностью.

Наиболее распространенным методом нахождения положения фокальной плоскости является использование дополнительного коллиматора. Фокусирующий компонент с фотоприемником устанавливается напротив дополнительного коллиматора с известными характеристиками, в фокальной плоскости которого находится тест-объект (обычно штриховая мира, которая равномерно освещена в требуемом спектральном диапазоне). Суть метода сводится к продольной подвижке фотоприемника относительно фокусирующего компонента до получения резкого изображения тест-объекта. Для получения высокой точности установки фотоприемника необходимо, чтобы фокусное расстояние дополнительного коллиматора превышало фокусное расстояние фокусирующего

компонента в 3–5 раз [3]. Общий принцип применения дополнительного коллиматора используется и в ряде других способов определения положения фокальной плоскости объектива [5–7].

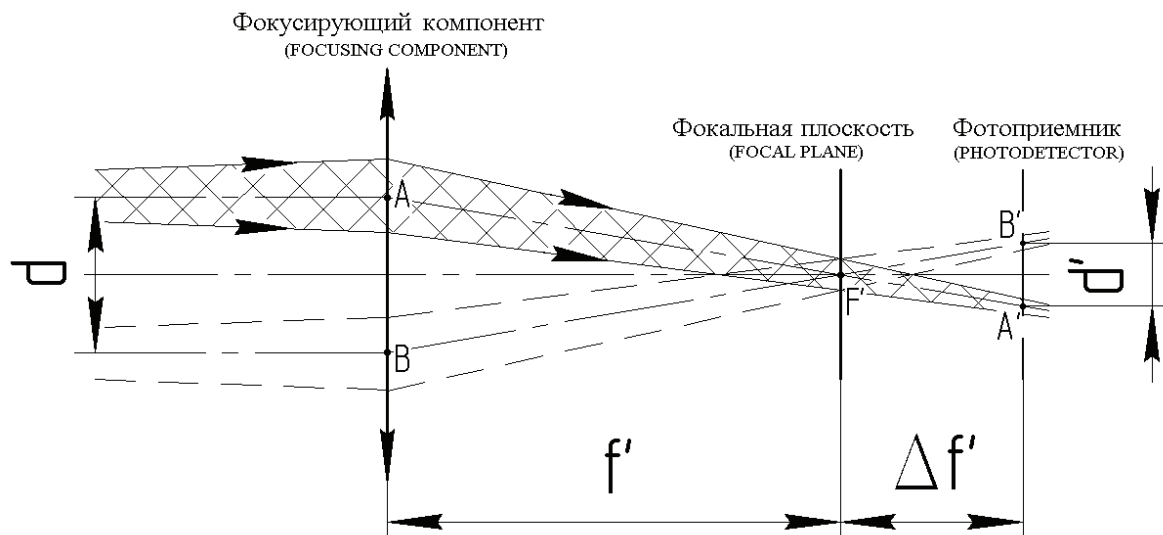
Особенностью всех указанных выше методов является использование дополнительных оптических устройств либо косвенное определение положения фокальной плоскости, что не всегда возможно и допустимо.

Целью данной работы являлась разработка нового метода установки матричного фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента при измерении характеристик лазерного излучения по методу фокального пятна непосредственно на месте проведения измерений для случая отсутствия дополнительных оптических устройств с известными характеристиками в спектральном диапазоне работы лазерного источника излучения, а также разработка миниатюрного лазерного излучателя, который значительно сократит время определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов по предложенному методу, что позволит реализовать его в виде измерительного прибора.

## Способ определения положения фокальной плоскости

Фокус идеальной оптической системы является изображением бесконечно удаленной точки, которая принадлежит пучку лучей, параллельных оптической оси системы [8]. Другими словами, параллельные оптической оси лучи пересекутся в фокусе после прохождения оптической системы. Следовательно, если на оптическую систему падает несколько световых пучков, оси которых параллельны оптической оси системы, то после ее прохождения оси пучков пересекутся в фокусе. Таким образом, задача нахождения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента сводится к продольной подвижке фотоприемника для определения плоскости, перпендикулярной оптической оси этого компонента и содержащей точку пересечения осей пучков.

Рассмотрим с точки зрения геометрической оптики случай падения на тонкую положительную линзу двух световых пучков с симметричным распределением интенсивности относительно собственной оси каждого из пучков. Оси падающих пучков симметричны относительно оптической оси фокусирующего компонента и параллельны ей (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Определение положения фокальной плоскости фокусирующего компонента

**Figure 1** – Determination of focal plane position of focusing component

Из подобия треугольников  $ABF'$  и  $A'B'F'$  следует:

$$d/d' = f'/\Delta f', \quad (1)$$

где  $d$  – расстояние между осями пучков до оптической системы;  $d'$  – расстояние между осями пучков в плоскости фотоприемника;  $f'$  – фокусное расстояние фокусирующего компонента,  $\Delta f'$  – погрешность установки фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента.

Для большинства практических применений достаточная точность определения положения фокальной плоскости составляет 1 % от величины фокусного расстояния [4]. Следовательно, формулу (1) можно преобразовать как:

$$d = 100d'. \quad (2)$$

Теоретическое минимальное значение  $d'$  определяется разрешающей способностью матричного фотоприемника. Однако при одновременной засветке несколькими световыми пучками вблизи фокальной плоскости фокусирующего компонента происходит наложение пучков друг на друга, что приводит к суммированию интенсивностей. Поэтому определение положения оси каждого из пучков в области перекрытия является достаточно сложной задачей. В то же время, если засвечивать фотоприемник световыми пучками поочередно, нахождение оси каждого из пучков не вызывает затруднений и точность определения положения оси стремится к теоретической. Возникает только необходимость отмечать и за-

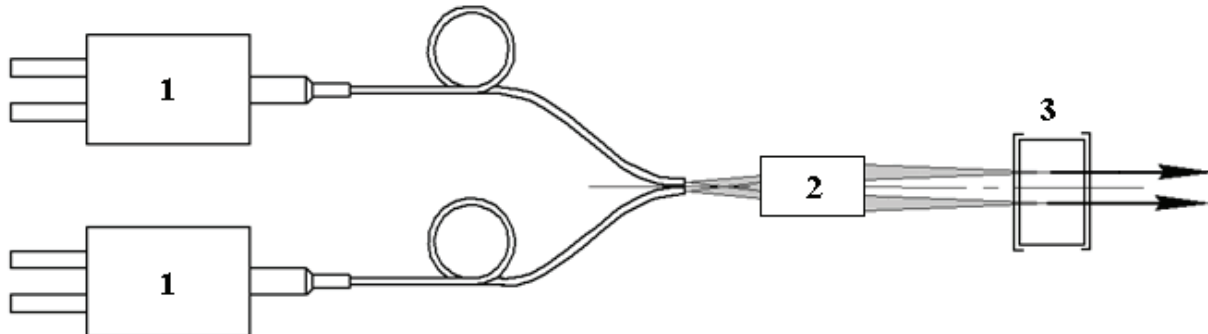
поминать положения осей при переключении от одного пучка к другому. Принципиально того же результата можно добиться используя один и тот же световой пучок. Для этого необходимо обеспечивать его параллельное смещение в направлении, перпендикулярном оптической оси фокусирующего компонента.

Для измерения характеристик лазерного излучения применяются матричные фотоприемники со специализированным программным обеспечением (анализаторы пучка), позволяющие определять пространственно-энергетические характеристики падающего светового пучка с высокой точностью. Для матричного анализатора пучка *Ophir SP620* погрешность определения размеров световых пучков не превышает 2 % [9]. Например, при использовании стигматического лазерного пучка с расходимостью 10 мрад, в фокальной плоскости линзы с  $f' = 100$  мм размер пучка составит приблизительно 1 мм. Соответственно, погрешность определения размеров пучка и положения его энергетического центра (оси пучка) не превысит 20 мкм. По формуле (2) требуемое расстояние между осями пучков  $d$  (величина их относительного смещения) для обеспечения точности в 1 % определения положения фокальной плоскости составит 4 мм или  $\pm 2$  мм относительно оптической оси фокусирующего компонента, что достаточно легко реализуется.

### Лазерный излучатель

Описанный выше принцип определения положения фокальной плоскости может быть ис-

пользован для создания коммерческих измерительных систем. Однако использование смещения светового пучка или нескольких источников излучения значительно усложнит конструкцию, увеличит время проведения измерения и габаритные размеры прибора.



**Рисунок 2** – Принципиальная схема излучателя: 1 – лазерный диод; 2 – оптическая система накачки; 3 – активный элемент

**Figure 2** – Principle scheme of laser: 1 – laser diode; 2 – pump optics; 3 – active element

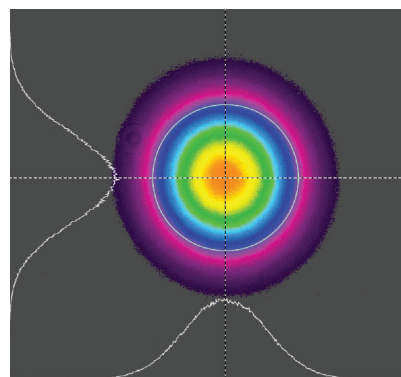
Излучение двух лазерных диодов накачки 1 с помощью оптической системы 2 фокусируется в активном элементе 3. В качестве активного элемента 3 использовался кристалл Yb:YAG с концентрацией активных центров 10 ат.%. В качестве источников накачки использовались лазерные диоды с волоконным выводом излучения, каждый из которых обеспечивался независимым питанием.

Особенностью разработанного лазера является схема накачки, которая позволяет фокусировать излучение от каждого лазерного диода в отдельную зону активного элемента. За счет прокачки отдельных, пространственно независимых друг от друга областей активного элемента в совокупности с микрочип конфигурацией резонатора, зеркала которого являются общими для всех прокачиваемых зон и нанесены на рабочие торцы активного элемента (непараллельность торцов не превышает 5 угл. сек.), реализуется генерация двух лазерных пучков, оси которых параллельны друг другу. Варьировать расстояние между осями генерируемых пучков в разработанной системе можно от 0,5 до 5 мм путем изменения расстояния между волоконными выводами лазерных диодов и за счет изменения параметров системы накачки, при этом оси генерируемых пучков будут оставаться параллельными даже при случайном наклоне оси излучения накачки.

Длина волны генерируемого излучения составляет 1,03 мкм, опционально возможно увеличение длины волны генерации до 1,05 мкм. Для каждого пучка характерно Гауссово распределе-

Устранить указанные недостатки может разработанный авторами данной статьи непрерывный твердотельный лазерный излучатель с генерацией двух лазерных пучков, оси которых параллельны между собой. Принципиальная схема излучателя приведена на рисунке 2.

ние интенсивности в поперечном сечении (рисунок 3) при расходимости около 10 мрад.



**Рисунок 3** – Пространственный профиль отдельного генерируемого лазерного пучка

**Figure 3** – Spatial shape of single laser beam

За счет изменения параметров питания соответствующего лазерного диода накачки можно варьировать мощность отдельного лазерного пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик излучения.

Лазер характеризуется малыми габаритными размерами ( $70 \times 40 \times 40$  мм<sup>3</sup>), высокой надежностью и низким энергопотреблением (менее 7 Вт на каждый пучок), что также немало важно при создании измерительных приборов. Разработанная схема лазера позволяет увеличить количество диодов накачки и, соответственно, количество генерируемых лазерных пучков, что позволяет расширить возможности практического применения излучателя.

## Заключение

Предложен метод определения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента при использовании матричного фотоприемника и одного поперечно смещаемого либо нескольких стационарных световых пучков, оси которых параллельны оптической оси фокусирующего компонента без применения дополнительных оптических устройств. Теоретически показано, что при использовании современных анализаторов лазерного излучения можно обеспечить определение положения фокальной плоскости с точностью 1 %.

Для реализации предложенного принципа определения положения фокальной плоскости в виде измерительного прибора продемонстрирован непрерывный лазерный излучатель с диодной накачкой с генерацией на длине волны 1,03 мкм либо 1,05 мкм двух осесимметричных лазерных пучков с расходимостью 10 мрад и Гауссовым профилем интенсивности, оси которых параллельны между собой. Каждый лазерный диод накачки обеспечивается независимой регулировкой тока питания, что позволяет изменять выходную мощность каждого генерируемого пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик генерируемого излучения. В лазере реализовано изменение расстояния между генерируемыми пучками от 0,5 до 5 мм. Габаритные размеры составляют  $70 \times 40 \times 40$  мм<sup>3</sup>, энергопотребление – менее 7 Вт на каждый пучок.

Разработанный лазерный излучатель не требует прецизионных механических устройств и значительно сократит время проведения измерения. Схема лазера также позволяет увеличить количество диодов накачки для расширения возможностей его практического применения.

## Список использованных источников

1. Eichler, J. Laser / J. Eichler. – Berlin : Springer-Verlag, 2006. – 440 с.
2. Paschotta, R. Field Guide to Lasers / R. Paschotta. – Washington : SPIE, 2008. – 140 с.
3. Афанасьев, В.А. Оптические измерения / В.А. Афанасьев ; под ред. Д.Т. Пуряева. – 3-е изд. – М. : Высш. школа, 1981. – 229 с.
4. Креопалова, Г.В. Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев ; под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М. : Машиностроение, 1987. – 264 с.
5. Способ определения положения фокальной плоскости объектива и устройство для его

осуществления : а. с. 1080053 СССР, МКИ5 G 01 M 11/00 / П.А. Санников ; № 3369921 ; заявл. 25.12.81 ; опубл. 15.03.84 // Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий. – 1984. – № 10. – 4 с.

6. Способ определения положения фокальной плоскости объектива : а. с. 1585703 СССР, МКИ5 G 01 M 11/02 / О.В. Рожков, А.П. Тимашов, Л.Н. Тимашова, А.П. Мальков, Л.А. Борис ; № 4602705 ; заявл. 05.11.88 ; опубл. 15.08.90 // Государственный комитет по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР. – 1990. – № 30. – 4 с.

7. Устройство для контроля положения фокальной плоскости объектива : а. с. 1643972 СССР, МКИ5 G 01 M 11/00 / И.М. Прибыловский ; № 4656918 ; заявл. 24.01.89 ; опубл. 23.04.91 // Государственный комитет по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР. – 1991. – № 15. – 3 с.

8. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.

9. Laser Power & Energy Measurement. Laser Beam Analysis : каталог (англ.). – OPHIR Photonics, 2015. – 250 с.

## References

1. Eichler J. Laser. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 440 p.
2. Paschotta R. Field Guide to Lasers. Washington, SPIE, 2008, 140 p.
3. Afanasiev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981, 229 p.
4. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puriaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 264 p.
5. Sannikov P.A. *Sposob opredeleniya polozheniya fokal'noi ploskosti ob'ektiva i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method and device for determination of focal plane position]. Patent USSR, no. 1080053, 1984.
6. Rozkov O.V., Timashov A.P., Timashova L.N., Mal'kov A.P., Boris L.A. *Sposob opredeleniya polozheniya fokal'noi ploskosti ob'ektiva* [Method of determining of focal plane of objective]. Patent USSR, no. 1585703, 1990.
7. Pribilovskiy I.M. *Ustroystvo dlya kontrolya polozheniya fokal'noi ploskosti ob'ektiva* [Device for control of position of focal plane of lens]. Patent USSR, no. 1643972, 1991.
8. Zakaznov N.P., Kiriysin S.I., Kyzichev V.I. *Teoriya opticheskikh sistem* [Optical systems theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 448 p.
9. Laser Power & Energy Measurement. Laser Beam Analysis [product catalogue]. OPHIR Photonics Publ., 2015, 250 p.