

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-62-70

УДК 681.7-1/-9

Оптический метод бесконтактного контроля качества изготовления аксиконов

Павел Анатольевич Носов^{1✉}, Антон Игоревич Морозов^{2✉},
Александр Сергеевич Мачихин³

^{1, 2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

^{2, 3}Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
Москва, Россия

¹pan@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-0362-106X>

²ai.morozv@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

³machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

Аннотация

Предмет исследования. Рефракционные аксиконы с прямолинейной образующей. **Цель работы.** Разработка метода контроля аксиконов на основе анализа формируемого ими бесселева пучка 0-го порядка для быстрой проверки соответствия заданным характеристикам. **Метод.** Распределение интенсивности бесселева пучка регистрируется с помощью проекционной линзовой системы и матричного приемника излучения и анализируется на основе цифровой обработки полученных изображений. **Основные результаты.** Разработан и апробирован метод контроля, позволяющий определять основные геометрические характеристики аксикона, важные для его применения в лазерных оптических системах, предназначенных для формирования бесселева пучка 0-го порядка. **Практическая значимость.** Представленный подход прост в реализации и позволяет с помощью доступных оптоэлектронных компонентов определять важные для формирования бесселева пучка 0-го порядка параметры аксикона и обнаружить его дефекты.

Ключевые слова: аксикон, бесселев пучок, лазерная оптика, оптический пинцет, лазерные линии связи

Благодарность: исследование выполнено в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Ссылка для цитирования: Носов П.А., Морозов А.И., Мачихин А.С. Оптический метод бесконтактного контроля качества изготовления аксиконов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 62–70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-62-70>

Коды OCIS: 110.0110, 140.0140

Optical method for non-contact quality control of axicons

PAVEL A. NOSOV¹✉, ANTON I. MOROZOV²✉, ALEXANDER S. MACHIKHIN³

^{1, 2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^{2, 3}Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹pan@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-0362-106X>

²ai.morozv@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

³machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

Abstract

Subject of study. Refractive axicons with a conical shape. **Aim of study.** To develop an easy-to-implement technique for axicon inspection for fast verification of its geometrical parameters. **Method.** The intensity distribution of a Besselian beam is acquired with the lens projection system and then analyzed by digital image processing methods. **Main results.** The technique for geometrical characterization of axicons for the Bessel beam formation, has been developed and approved. **Practical significance.** The presented technique for axicon characterization is easy-to-implement and allows fast determination of its geometrical parameters and defect detection.

Keywords: axicon, Bessel beam, laser optics, optical tweezers, laser communication lines

Acknowledgment: this study is supported by Federal State Task Program of Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (project FFNS-2022-0010).

For citation: Nosov P.A., Morozov A.I., Machikhin A.S. Optical method for non-contact quality control of axicons [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 62–70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-62-70>

OCIS codes: 110.0110, 140.0140

ВВЕДЕНИЕ

Функции Бесселя, являющиеся точными решениями уравнения Гельмгольца [1, 2], описывают бesselевы пучки (БП), которые не подвержены дифракции и обладают следующими полезными свойствами: практически не изменяют распределение интенсивности поля на значительном участке вдоль оптической оси, способны самовосстанавливаться за препятствиями, могут иметь достаточно узкий центральный максимум (порядка единиц микрометров) без использования дополнительной оптики, способны передавать орбитальный угловой момент [3].

Бesselевы пучки характеризуются целым числом n , известным как порядок пучка. В цилиндрических координатах комплексная амплитуда БП n -го порядка может быть записана в следующем виде:

$$E(r, z) = A \exp(ik_z z) \exp(in\theta) J_n(k_r r), \quad (1)$$

где A — комплексная амплитуда, k_r и k_z — радиальная и продольная компоненты волнового вектора \mathbf{k} , J_n — функция Бесселя n -го по-

рядка 1-го рода, r — расстояние от оптической оси в поперечном сечении, z — расстояние вдоль оптической оси, θ — азимутальный угол, i — мнимая единица. Распределение интенсивности БП 0-го порядка представляет собой центральный максимум и набор концентрических колец (рис. 1а, в). Распределение интенсивности БП высших порядков на оптической оси имеет минимум (рис. 1б, г). Идеальные бездифракционные БП имеют бесконечную поперечную протяженность и несут бесконечную энергию и поэтому не могут быть получены экспериментально, однако приближения к идеальным БП могут существовать в конечной области пространства. За счет своих бездифракционных свойств БП нашли применение в оптических пинцетах [4–6], биомедицине [7–9], обработке материалов [10–12], фотолитографии [13] и других областях.

К настоящему времени разработано несколько методов формирования БП: дифракция на узкой круговой щели [2], с помощью аксиконов [14] и голографических оптических

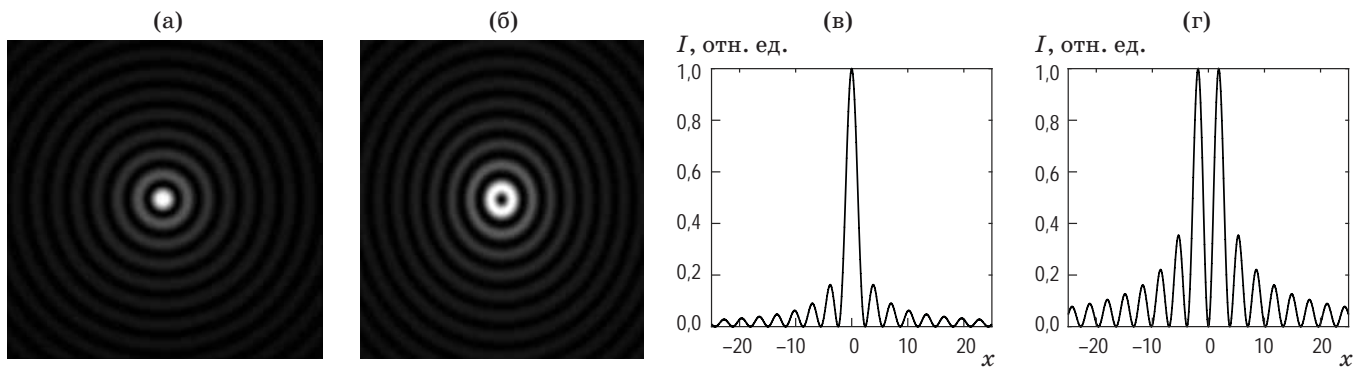


Рис. 1. Изображения идеального БП 0-го (а) и 1-го (б) порядков и относительные распределения интенсивности в них (в, г)

Fig. 1. Images of an ideal Bessel beam of the (a) 0-th and (б) 1-th orders and (в, г) relative intensity distributions in them

элементов [15, 16], сферически аберрирующих элементов [17] и оптических волокон [18, 19]. Наиболее распространенным способом формирования БП 0-го порядка в оптическом приборостроении и фотонике остается применение аксиконов, обеспечивающее высокую эффективность за счет использования всей энергии лазерного пучка. Как правило, аксикон представляет собой стеклянный конус, но в последнее время были предложены некоторые его модификации: с градиентом показателя преломления [20], с криволинейной образующей [21, 22], линзаконы [23, 24] и зеркальные аксиконы [25].

Известно, что на качество формируемого аксиконом БП влияют качество исходного лазерного гауссова пучка и качество аксикона [2, 4, 26]. При этом изготовление аксиконов требуемого качества представляет определенные трудности, связанные со сложностью обеспечения высокой точности его геометрических параметров и отсутствием простых подходов к контролю конических оптических поверхностей.

Целью данной работы является разработка метода контроля аксиконов на основе анализа формируемого им БП 0-го порядка для быстрой проверки соответствия заданным характеристикам.

ФОРМИРОВАНИЕ БЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ АКСИКОНОМ

На рис. 2 представлены квазипараллельный гауссов пучок с диаметром перетяжки D_w , аксикон с углом при вершине 2α и углом при основании u , на выходе которого формируется БП 0-го порядка с длиной фокусировки z_B .

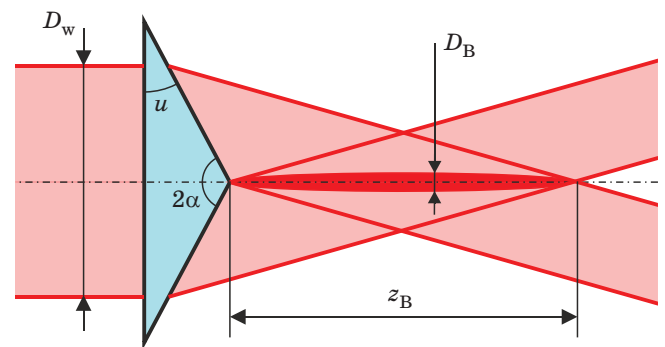


Рис. 2. Формирование БП с помощью аксикона. Пояснения в тексте

Fig. 2. Creation of Bessel beams through an axicon. Explanations are in the text

Длина фокусировки и диаметр ядра (центрального максимума) D_B БП 0-го порядка зависят от показателя преломления n материала аксикона, диаметра входного гауссова пучка D_w и длины волны лазерного излучения λ [27]

$$z_B \approx \frac{D_w}{2(n-1)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}, \quad (2)$$

$$D_B \approx \frac{2,4\lambda}{\pi(n-1)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}. \quad (3)$$

Из этих выражений следует, что для формирования БП с заданными параметрами необходимо обеспечить требуемый угол при вершине аксикона 2α . Значение этого угла изготовлен-

ного аксикона можно определить косвенным образом посредством измерения одного из параметров БП — z_B либо D_B . В процессе изготовления особенности крепления аксикона в оправе не позволяют осуществлять контроль его параметров. Поэтому это возможно, как правило, только после его изготовления и извлечения из оправы.

Качество лазерных гауссовых пучков оценивают параметром M^2 или параметром ВРР¹ [28]. Эти параметры могут быть рассчитаны по вторым моментам измеренного распределения интенсивности поля лазерного гауссова пучка. Учитывая структуру поля БП, при расчете второго момента распределения интенсивности интеграл расходится. Поэтому оценку качества формируемого аксиконом БП предлагается проводить по следующим критериям:

1. осесимметричная структура распределения интенсивности поля на всей длине БП,
2. формирование БП сразу после вершины аксикона,
3. соответствие длины фокусировки z_B и диаметра ядра БП D_B требуемым значениям, определяемым формулами (2) и (3).

Поскольку распределение интенсивности БП имеет узкий центральный максимум шириной от единиц до нескольких десятком микрометров и большое количество колец, провести регистрацию такого распределения интенсивности напрямую достаточно сложно. Поэтому применяют оптическую систему (ОС) для расширения распределения интенсивности БП. При этом, если входная — плоскость предмета (ОП) и выходная — плоскость изображения (ОП') являются сопряженными плоскостями линзы ОС с фокусным расстоянием f' (рис. 3), т.е. выполняется условие

$$\frac{1}{z' - z_L} + \frac{1}{z_L - z_0} - \frac{1}{f'} = 0,$$

то в параксиальном приближении поперечное распределение комплексной амплитуды поля $\psi'(x', y', z')$ в ОП' определяется выражением [29, 30]

$$\psi'(x', y', z') = \frac{1}{|\beta|} \exp[ik(z' - z_0)] \times \exp\left[-i\frac{k}{2\beta f'}(x'^2 + y'^2)\right] \psi_0\left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}, z_0\right), \quad (4)$$

¹ beam parameter product.

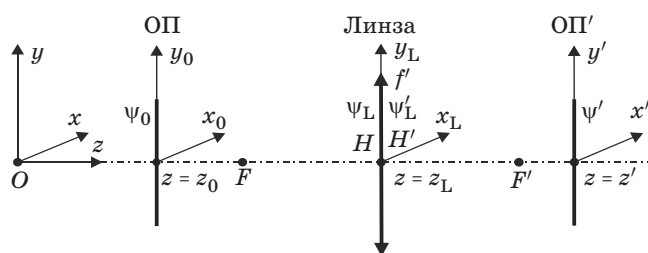


Рис. 3. Преобразование излучения линзой. H, H' — передняя и задняя главные точки линзы, F, F' — передняя и задняя фокальные точки линзы, ψ_L, ψ'_L — распределение комплексной амплитуды поля на входе и выходе линзы, x_0, y_0, z_0 — пространственные координаты в плоскости предмета, x_L, y_L, z_L — пространственные координаты в плоскости линзы, x', y', z' — пространственные координаты в плоскости изображения

Fig. 3. Transformation of radiation by a lens. H, H' are front and rear principal points of the lens, F, F' are front and rear focal points of the lens, ψ_L, ψ'_L are distribution of the complex field amplitude at the input and output of the lens, x_0, y_0, z_0 are spatial coordinates in the in the object plane, x_L, y_L, z_L are spatial coordinates in the lens plane, x', y', z' are spatial coordinates in the image plane, ОП is the object plane, ОП' is the image plane

где $\psi_0(x_0, y_0, z_0)$ — распределение комплексной амплитуды поля в плоскости ОП перед линзой, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\beta = -(z' - z_L)/(z_L - z_0)$ — линейное увеличение линзы между сопряженными плоскостями.

Выражение (4) означает, что распределения интенсивности поля в оптически сопряженных плоскостях идентичны (подобны), причем коэффициент подобия равен линейному увеличению β . Это свойство позволяет рассчитать распределение интенсивности БП на выходе аксикона по зарегистрированному на матрице распределению интенсивности поля БП, преобразованного ОС.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения исследований была собрана установка, схема которой представлена на рис. 4. Излучение непрерывного лазера (длина волны излучения 671 нм, мощность излучения 500 мВт, параметр $M^2 = 1,2$) с помощью двух плоских зеркал направляется в афокальную систему, состоящую из линз 4 и 5 с фокусными расстояниями соответственно 50 и 200 мм.

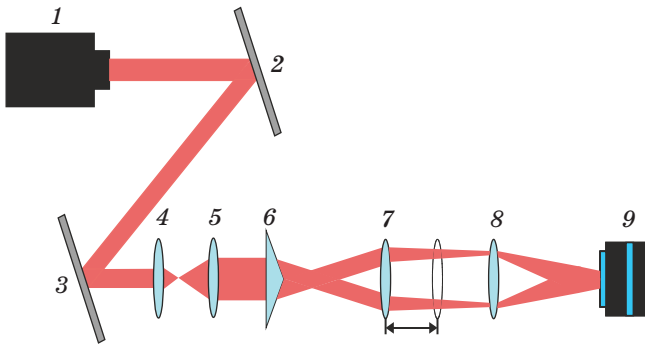


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для контроля качества изготовления аксикона. 1 — лазер, 2, 3 — зеркала, 4, 5, 7, 8 — линзы, 6 — аксикон, 9 — видеокамера

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup for quality control of axicon. (1) Laser, (2, 3) mirrors, (4, 5, 7, 8) lenses, (6) axicon, (9) video camera

После афокальной ОС гауссов пучок расширяется и затем преобразуется исследуемым аксиконом. Диаметр гауссова пучка D_w на входе аксикона равен 7,2 мм. Распределение интенсивности БП измеряется с помощью проекционной системы, состоящей из линз 7 и 8. Сечение БП в передней фокальной плоскости линзы 7 переносится с увеличением в заднюю фокальную плоскость линзы 8, где установлена видеокамера (7716×5360 пикселей, размер пиксела 1,12×1,12 мкм). За счет осевого перемещения линзы 7 удается получить увеличенное изображение распределения интенсивности БП 0-го порядка на различных расстояниях от аксикона.

В установке расстояние между аксиконом и линзой 7 должно быть больше теоретической длины фокусировки БП и фокусного расстояния линзы 7. Кроме того, при создании установки необходимо обеспечить расстояние между линзами 7 и 8, позволяющее переместить линзу 7 в пределах всей длины фокусировки для регистрации распределения интенсивности БП.

Предлагается следующий алгоритм оценки качества аксикона при формировании БП 0-го порядка:

1. Установить аксикон в предусмотренное в установке крепление.
2. Установить линзу 7 так, чтобы передний фокус линзы 7 находился вблизи вершины аксикона.

3. Получить и сохранить изображение распределения интенсивности БП с указанием расстояния z от вершины аксикона, на котором оно получено.

4. Переместить линзу 7 на расстояние, равное шагу измерений.

5. Повторять этапы 3 и 4, пока линза 7 не достигнет крайнего положения.

6. Провести масштабирование распределений интенсивности БП, зарегистрированных на матрице, на линейное увеличение β проекционной системы и определить диаметр ядра D_{B0} по первому минимуму распределения интенсивности.

7. Вычислить среднее значение диаметра ядра D_{B0} после аксикона.

8. Определить сечение, в котором интенсивность внешнего кольца БП превышает интенсивность центрального кольца. Расстояние z , на котором оно получено, принимается за длину фокусировки БП z_{B0} .

9. Вычислить реальный угол при вершине аксикона $2\alpha_0$ по формуле

$$2\alpha_0 = \pi - \frac{4,8\lambda}{\pi D_{B0}(n-1)}. \quad (5)$$

При проведении измерений на концах длины фокусировки БП шаг перемещения линзы 7 следует делать минимальным, при этом внутри длины фокусировки этот шаг можно увеличить для сокращения времени сканирования.

С использованием данных экспериментальной установки и алгоритма были проведены тестовые измерения двух аксиконов, изготовленных в НТЦ УП РАН, с близким к предельному углом при вершине $2\alpha = 177^\circ$ и световым диаметром 20 мм. Аксиконы изготовлены из стекла К8, показатель преломления которого на $\lambda = 671$ нм составляет 1,514.

Теоретические параметры БП 0-го порядка изготовленных аксиконов имеют следующие значения: $D_B = 38$ мкм и $z_B = 268$ мм.

Определим погрешность измерения угла α , продифференцировав выражение (5),

$$|\delta\alpha| = \frac{2,4\lambda}{\pi(n-1)D_B^2} |\delta D_B|. \quad (6)$$

При размере пиксела камеры $a = 1,12$ мкм погрешность измерения диаметра ядра без учета aberrаций ОС $\Delta D_B = 2a = 2,24$ мкм.

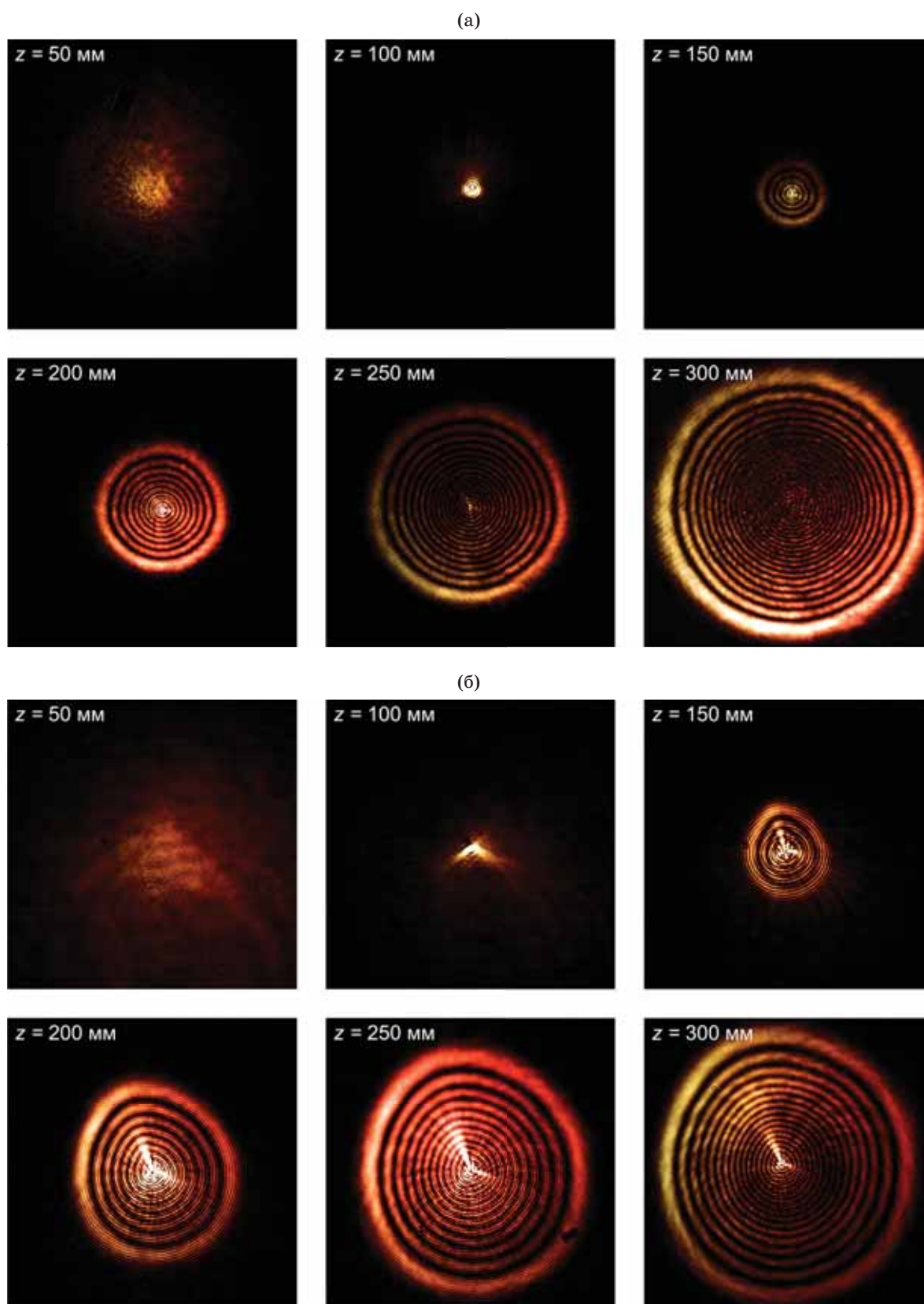


Рис. 5. Распределения интенсивности БП 0-го порядка на различных расстояниях z от вершины 1-го (а) и 2-го (б) аксиконов

Fig. 5. Intensity distributions of the 0-th order Bessel beams at different distances z from the top of (a) the 1st and (б) 2nd axicons

Погрешность определения угла аксикона, рассчитанная по формуле (6), в этом случае составляет $\Delta\alpha = 5'$.

В эксперименте для снижения погрешности измерения угла при вершине аксикона применяется проекционная система из линз 7 и 8 (рис. 4) с коэффициентом линейного увеличения $5\times$, что позволяет обеспечить погрешность определения угла аксикона $1'$.

Линза 7 проекционной ОС перемещалась с шагом 10 мм. Некоторые из полученных изображений распределения интенсивности БП приведены на рис. 5. В результате анализа первого аксикона определен диаметр ядра $D_{B0} = 40$ мкм, который соответствует углу при вершине аксикона $2\alpha_0 \approx 177^\circ 11'$. Длина фокусировки составляет $z_{B0} = 280$ мм. Кроме того, из полученных изображений видно, что БП начинает формироваться на расстоянии 70 мм после аксикона, что свидетельствует о дефекте вершины аксикона радиусом $r_{err} = 0,88$ мм. Диаметр ядра второго аксикона составляет 64 мкм, $z_{B0} = 250$ мм, а пучок начинает формироваться на расстоянии 120 мм, что дает значения $2\alpha_0 \approx 178^\circ 12'$, а $r_{err} = 1$ мм.

Относительные отклонения измеренных параметров БП от их теоретических значений можно определить по следующим формулам:

$$\Delta D_B = \frac{|D_B - D_{B0}|}{D_B}, \quad (7)$$

$$\Delta z_B = \frac{|z_B - z_{B0}|}{z_B}, \quad (8)$$

где D_B , z_B — теоретические значения диаметра ядра и длины фокусировки, D_{B0} , z_{B0} — из-

меренные. Для первого аксикона они составляют $\Delta D_B = 5,3\%$, $\Delta z_B = 4,5\%$, а для второго аксикона — $\Delta D_B = 68,4\%$, $\Delta z_B = 11,2\%$. Можно сделать вывод, что первый аксикон пригоден для дальнейшего использования, а второй следует отправить на доработку.

Для первого аксикона также проведены исследования в случае фокусных расстояний линз афокальной системы 50 и 150 мм. Тогда диаметр гауссова пучка на входе аксикона — 5,4 мм. Теоретические параметры пучка составят $D_B = 38$ мкм и $z_B = 200$ мм, а измеренные — $D_{B0} = 40$ мкм и $z_{B0} = 210$ мм. В этом случае $\Delta D_B = 5,3\%$, $\Delta z_B = 5\%$, что говорит о высоком качестве аксикона. Кроме того, диаметр ядра D_{B0} не изменился при изменении диаметра входного гауссова пучка, что согласуется с формулой (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод контроля аксиконов на основе анализа формируемого ими БП 0-го порядка для быстрой проверки соответствия заданным характеристикам.

Представленный подход к контролю качества изготовления аксиконов позволяет определить важные для формирования БП 0-го порядка параметры и установить наличие дефектов без применения специализированных компонентов и аппаратуры. Он может быть востребован при разработке систем для оптического микроманипулирования, передачи данных и др. В дальнейших исследованиях планируется усовершенствование метода для автоматического определения положения и характера дефектов аксиконов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory // *JOSA A*. 1987. V. 4. P. 651–654. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000651>
2. Durnin J., Miceli J.J., Jr., Eberly J.H. Diffraction-free beams // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 1499. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1499>
3. Lapointe M.R. Review on non-diffracting Bessel beam experiments // *Opt. Laser Technol.* 1992. V. 24. P. 315–321. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(92\)90082-D](https://doi.org/10.1016/0030-3992(92)90082-D)
4. Minz R.A., Tiwari U., Kumar A., et al. Trapping of rare earth-doped nanorods using quasi Bessel beam optical fiber tweezers // *OSA Continuum*. 2021. V. 4. № 2. P. 364–373. <https://doi.org/10.1364/OSAC.417151>
5. Liu Z., Tang X., Zhang Y., et al. Trapping two types of particles using a single optical fiber Bessel beam // *Opt. Fiber Sensors Conf.* 2020. P. 42. <https://doi.org/10.1364/OFS.2020.W4.42>
6. Moura T.A., Andrade U.M.S., Mendes J.B.S. Modulating the trapping and manipulation of semiconductor particles using Bessel beam optical tweezers // *Opt. and Lasers in Eng.* 2023. V. 170. P. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107778>
7. Fahrbach F.O., Rohrbach A. Propagation stability of self-reconstructing Bessel beams enables contrast-enhanced imaging in thick media // *Nature Commun.* 2012. V. 3. P. 632–638. <https://doi.org/10.1038/ncomms1646>

8. Liu C., Zhao Z., Jin C., et al. High-speed, multi-modal, label-free imaging of pathological slices with a Bessel beam // *Biomed. Opt. Exp.* 2020. V. 11 № 5. P. 2694–2704. <https://doi.org/10.1364/BOE.391143>
9. Sandeep S., Khairyanto C.S., Aung A., et al. Bessel beams in ophthalmology: A review // *Micromachines*. 2023. V. 14. № 9. P. 1672. <https://doi.org/10.3390/mi14091672>
10. Matsuoka Y., Kizuka Y., Inoue T. The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam // *Appl. Phys. A*. 2006. V. 84. P. 423–430. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3629-6>
11. Stoian R., Bhuyan M.K., Zhang G., et al. Ultrafast Bessel beams: Advanced tools for laser materials processing // *Adv. Opt. Technol.* 2018. V. 7. P. 165–174. <https://doi.org/10.1515/aot-2018-0009>
12. Lutz C., Schwarz S., Marx J., et al. Multi-Bessel beams generated by an axicon and a spatial light modulator for drilling applications // *Photonics*. 2023. V. 10. № 4. P. 413. <https://doi.org/10.3390/photonics10040413>
13. Белый В.Н., Курилкина С.Н., Хило Н.А. и др. Формирование бесселевых световых пучков с субволновым диаметром осевого максимума для диагностики и нелинейной фотолитографии полупроводниковых материалов // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 11. С. 6–16. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-06-16>
14. Belyi V.N., Kurilkina S.N., Khilo N.A., et al. Formation of Bessel light beams with subwavelength diameter of axial maximum for diagnostics and nonlinear photolithography of semiconductor materials // *J. Opt. Technol.* 2023. V. 90. № 11. P. 00–00. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000000>
15. Scott G., Mcardle N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon // *Opt. Eng.* 1992. V. 31. P. 2640–2643. <https://doi.org/10.1117/12.60017>
16. Turunen J., Vasara A., Friberg A.T. Holographic generation of diffraction-free beams // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. P. 3959–3962. <https://doi.org/10.1364/AO.27.003959>
17. Davis J.A., Carcole E., Cottrell D.M. Nondiffracting interference patterns generated with programmable spatial light modulators // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. P. 599–602. <https://doi.org/10.1364/AO.35.000599>
18. Aruga T. Generation of long-range nondiffracting narrow light beams // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 3762–3768. <https://doi.org/10.1364/AO.36.003762>
19. Reddy I.V.A.K., Bertocini A., Liberale C. 3D-printed fiber-based zeroth- and high-order Bessel beam generator // *Optica*. 2022. V. 9. P. 645–651. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.453839>
20. Zhu X., Schülzgen A., Li L., et al. Generation of controllable nondiffracting beams using multimode optical fibers // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 201102–201102-3. <https://doi.org/10.1063/1.3138780>
21. Filipkowski A., Piechal B., Pysz D., et al. Nanostructured gradient index microaxicons made by a modified stack and draw method // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. P. 5200–5203. <https://doi.org/10.1364/OL.40.005200>
22. Khonina S.N., Ustinov A.V. Very compact focal spot in the near-field of the fractional axicon // *Opt. Commun.* 2017. V. 391. P. 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.12.034>
23. Gorelick S., Paganin D.M., Marco A. Refractive micro-optical elements with arbitrary exponential profiles // *Appl. Photonics*. 2020. V. 5. P. 106110. <https://doi.org/10.1063/5.0022720>
24. Koronkevich V.P., Mikhaltsova I.A., Churin E.G., et al. Lensacon // *Appl. Opt.* 1995. V. 33. P. 5761–5772. <https://doi.org/10.1364/AO.34.005761>
25. Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В. и др. Линзакон: непараксиальные эффекты // *Оптический журнал*. 2011. Т. 78. № 11. С. 44–51.
26. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Ustinov A.V., et al. The lensacon: Nonparaxial effects // *J. Opt. Technol.* 2011. V. 78. P. 724–729. <https://doi.org/10.1364/JOT.78.000724>
27. Brunne J., Wapler M. C., Wallrabe U. Fast and robust piezoelectric axicon mirror // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. P. 4631–4634. <https://doi.org/10.1364/OL.39.004631>
28. Рыжевич А.А., Балькин И.В., Железнякова Т.А. Параметры качества бесселевых световых пучков нулевого порядка // *ЖПС*. 2018. Т. 85. № 1. С. 144–153.
29. Ryzhevich A.A., Balykin I.V., Zheleznyakova T.A. Quality parameters of zero order Bessel light beams [in Russian] // *Zhurnal Prikladnoii Spektroskopii*. 2018. V. 85. P. 144–153.
30. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Khorin P.A., et al. Modern types of axicons: New functions and applications // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 6690. <https://doi.org/10.3390/s21196690>
31. ГОСТ Р ИСО 11146-1. Национальный стандарт Российской Федерации. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. М.: Стандартинформ, 2010. 20 с.
32. GOST R (Russian National Standard) 11146-1-2008 (ISO 11146-1:2005). Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios — Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams [in Russian]. Intro. 01/01/2010. Moscow: "Standardinform" Publ., 2010. 20 p.
33. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествен В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1982. 456 с.
34. Pakhomov I.I., Rozhkov O.V., Rozhdestvin V.N. Optical-electronic quantum devices [in Russian]. Moscow: "Radio and Sviaz" Publ., 1982. 456 p.
35. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., et al. Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements // *J. Modern Opt.* 2004. V. 51. P. 2167–2184. <https://doi.org/10.1080/09500340408232521>

АВТОРЫ

Павел Анатольевич Носов — кандидат технических наук, доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 35745063600; <https://orcid.org/0000-0002-0362-106X>; pan@bmstu.ru

AUTHORS

Pavel A. Nosov — PhD (Engineering), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 35745063600; <https://orcid.org/0000-0002-0362-106X>; pan@bmstu.ru

Антон Игоревич Морозов — Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; инженер-исследователь, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57797373100; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; ai.morozv@gmail.com

Александр Сергеевич Мачихин — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Anton I. Morozov — Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia; Research Engineer, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57797373100; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; ai.morozv@gmail.com

Alexander S. Machikhin — Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

*Статья поступила в редакцию 15.01.2024
Одобрена после рецензирования 16.04.2024
Принята к печати 30.05.2024*

*The article was submitted to the editorial office 15.01.2024
Approved after review 16.04.2024
Accepted for publication 30.05.2024*