

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ГРАДИЕНТНОЙ ЛИНЗЫ НА ОСНОВЕ АСТИГМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКА БЕССЕЛЯ

В.Д. Паранин¹, С.В. Карпеев^{1,2}, О.Г. Бабаев¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Аннотация

Апробирован метод исследования двулучепреломления механически свободных градиентных параболических линз на основе астигматического преобразования пучка Бесселя 0-го порядка. Отмечены особенности юстировки оптической схемы и приведены практические рекомендации по выбору её элементов. На примере четвертьволновой линзы экспериментально показана возможность надёжного измерения оптической разности хода не хуже $0,05\lambda_0$. Подтверждено существенное отличие двулучепреломления градиентных оптических линз в центральной и краевой областях.

Ключевые слова: двулучепреломление, четвертьволновая параболическая градиентная линза, пучок Бесселя, оптическая разность хода.

Цитирование: Паранин, В.Д. Экспериментальное исследование двулучепреломления параболической градиентной линзы на основе астигматического преобразования пучка Бесселя / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, О.Г. Бабаев // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 837-841. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-837-841.

Введение

Одной из проблем волоконно-оптических информационно-измерительных систем является случайное двулучепреломление составляющих элементов. Например, двулучепреломление одномодового оптического волокна, обусловленное эллиптичностью сердцевин. Это приводит к неконтролируемому изменению поляризации излучения, характеристик волоконных датчиков и величин измеряемых сигналов. Двулучепреломление также свойственно градиентным линзам по причине остаточного механического напряжения при внедрении легирующей примеси. Это обуславливает снижение эффективности ввода излучения в оптическое волокно из-за астигматического искажения и изменения состояния поляризации пучка [1]. Таким образом, контроль двулучепреломления является важной практической задачей, способствующей повышению точности и достоверности передаваемой информации в волоконно-оптических и оптико-электронных системах.

Исследования градиентных линз различных производителей [2–5] показали, что оптическая разность хода в центральной части составляет $\sim 0,01\lambda_0$, а в краевой области $\sim 0,1\lambda_0$. При этом поляризационно-интерференционный метод [2–4] обладает невысокой чувствительностью. Интерференционные методы [2, 5] более точны, однако требуют высококачественной оптомеханики, дорогостоящей оптики, обеспечения виброизоляции и сложны в юстировке оптической схемы.

В публикациях [6–12] предложен новый метод исследования двулучепреломления на основе преобразования лазерных пучков Бесселя в анизотропных средах. В случае одноосных кристаллов z -среза распространение пучков вдоль оптической оси сопровождается периодическим изменением порядка пучка [6–9]. Для кристаллов x -среза характерно астигматическое преобразование пучка, распространяющегося

перпендикулярно оптической оси [10, 11]. Оно заключается в формировании ромбовидного контура выходного пучка, заполненного локальными точечными максимумами интенсивности. По числу и интенсивностям этих максимумов можно вычислить оптическую разность хода и двулучепреломление кристалла.

Во всех указанных случаях анализ оптических свойств образцов заключается в измерении распределения интенсивности выходного пучка. Это позволяет проводить экспресс-измерения с помощью стандартных многоэлементных фотоприёмников и хорошо отработанных методов обработки изображений.

Как показали экспериментальные исследования [10, 11], параметры пучка значительно зависят от оптических свойств и толщины одноосного кристалла. Вариация этой чувствительности достигается изменением числовой апертуры освещающего пучка Бесселя. Это делает пучки Бесселя перспективным и достаточно гибким инструментом для исследования оптических сред с различным двулучепреломлением. Поскольку предлагаемый метод является оптическим, обеспечивается сохранение технологической чистоты и механической прочности образцов. Таким образом, метод применим для исследования тонких плёнок и пластин, мягких и хрупких оптических материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование двулучепреломления градиентных оптических линз на основе астигматического преобразования пучка Бесселя 0-го порядка. В экспериментах использована четвертьволновая градиентная линза, которая применяется для ввода-вывода излучения оптического волокна.

Экспериментальное исследование

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она содержит линейно-поляризованный гелий-неоновый лазер, пространственный фильтр – расширитель пучка, четвертьволновую пластину $\lambda/4$, дифракционный аксикон, четвертьволновую градиентную

линзу (GRIN), изображающий микрообъектив, ПЗС-матрицу. Использовался короткофокусный микрообъектив 60×, с апертурой NA=0,66, фокусным расстоянием $f \approx 0,4$ мм и глубиной резкости около 1 мкм. Настройка оптической схемы заключалась в координатном центрировании аксикона, градана и микрообъектива на оптической оси. Кроме этого, обеспечивалось нормальное падение излучения на указанные элементы во избежание дополнительного астигматического преобразования пучка Бесселя, вызванного их непараллельностью [13–16].

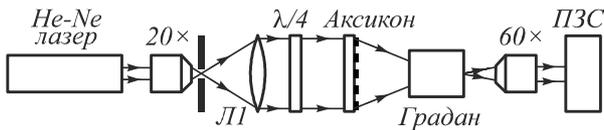


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для измерения двулучепреломления необходимо ориентировать поляризатор параллельно оптической оси образца. Однако азимутальное положение быстрой и медленной осей градана заранее неизвестно. Поэтому использовалась четвертьволновая фазовая пластина, формирующая круговую поляризацию освещающего пучка.

Параболическая градиентная линза имела параметры: радиус 2 мм, радиальный градиент показателя преломления $g = 0,1475 \text{ мм}^{-1}$ на длине волны $\lambda_0 = 633 \text{ нм}$, длина градана $L = 10,65 \pm 0,05 \text{ мм}$ (четвертьволновая линза $L = 0,25P$, где $P = 2\pi/g$). Радиальное распределение показателя преломления $n(r)$ имело следующий вид:

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} g^2 r^2 \right), \quad (1)$$

где $n_0 = 1,61$ – показатель преломления на оси градана, r – радиальная координата, мм.

При выборе параметров дифракционного аксикона, формирующего освещающий пучок Бесселя, необходимо учитывать максимальную числовую апертуру градиентной линзы $NA = 0,46$. Это ограничивает период d дифракционного аксикона:

$$d \geq \lambda_0 / NA \approx 2,2\lambda_0. \quad (2)$$

Амплитудный дифракционный аксикон с периодом $d = 4 \text{ мкм}$ и апертурой $NA \approx 0,16$ был изготовлен методом термохимического окисления хрома на станции круговой лазерной записи CLWS-200. Числовая апертура аксикона приблизительно соответствовала апертуре стандартных кварцевых волокон $NA \approx 0,12 \div 0,20$. Центральная часть пучка Бесселя 0-го порядка, освещающего входную поверхность градана, показана на рис. 2.

Аксикон имел фактор заполнения 0,5 и формировал преимущественно 0 и ± 1 порядки дифракции. При этом сходящийся -1 порядок фокусировался внутри четвертьволнового градана и не изображался короткофокусным микрообъективом. Нулевой порядок фокусировался на выходной поверхности градана и также не попадал в плоскость изображения.

Расходящийся $+1$ порядок фокусировался за выходной поверхностью градана и отображался с помощью микрообъектива и ПЗС-матрицы. На рис. 3 показаны выходные пучки на различных расстояниях l между микрообъективом и выходной поверхностью градана.

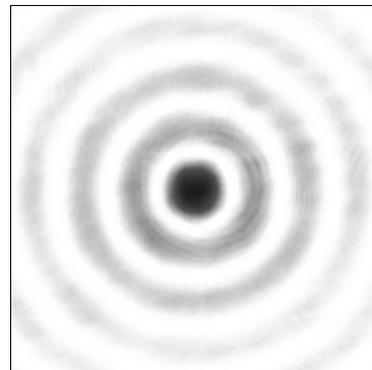


Рис. 2. Входной пучок Бесселя 0-го порядка

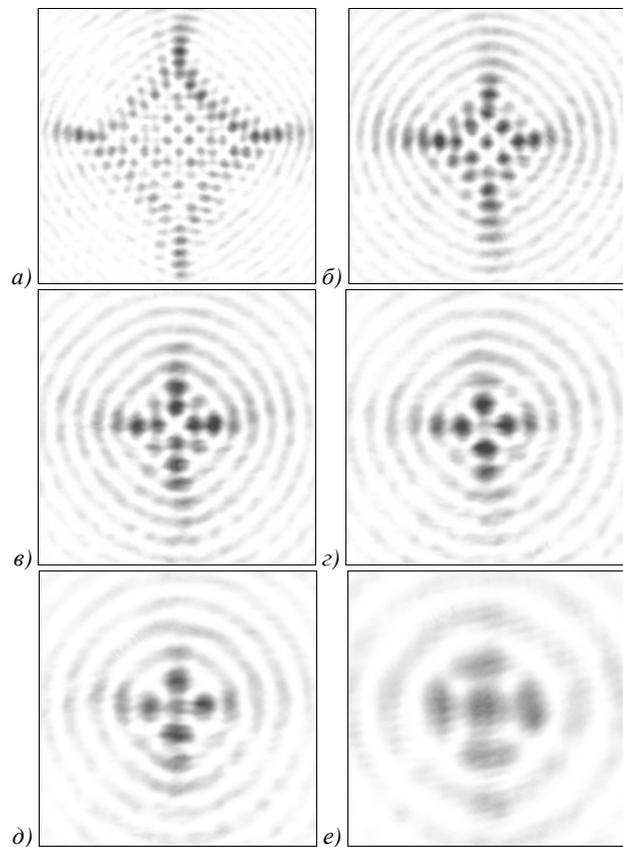


Рис. 3. Выходные пучки при различных расстояниях «микрообъектив – градан»:

$l = 4 \text{ мм}$ (а); $l = 4,75 \text{ мм}$ (б); $l = 5,50 \text{ мм}$ (в); $l = 6,25 \text{ мм}$ (г); $l = 7 \text{ мм}$ (д); $l = 11 \text{ мм}$ (е)

При фиксации изображений был отмечен их азимутальный поворот, монотонно зависящий от расстояния между микрообъективом и граданом (для удобства сравнения на рис. 3 изображения повернуты до одинакового положения). Так, для случая рис. 3а угол поворота составил 30° , а для рис. 3е – 10° . В работе [2] был отмечен аналогичный эффект, заключающийся в распространении косо падающих на градан лучей по спиралевидной траектории и обусловленный дву-

лучепреломлением градана. Различные углы поворота подтверждает отличие двулучепреломления в центральной и краевой областях градана.

Следует учесть, что градиентным линзам свойственно двулучепреломление, обусловленное остаточным механическим напряжением в стекле после легирования. При этом производители стремятся максимально снизить двулучепреломление в приосевой части градана для качественной коллимации и фокусировки Гауссова пучка одномодового волокна. Оптическая разность хода исследуемого четвертьволнового градана по данным производителя (ЗАО «ГРИНЕКСТ») в центральной части диаметром 1...1,2 мм не превосходит $0,05\lambda_0$. При этом в краевой области градана двулучепреломление значительно больше, чем в центральной части и не нормируется. В экспериментах градиентная линза закреплялась в пластиковой оправе, которая охватывала её боковую цилиндрическую поверхность. Таким образом, устранялось направленное механическое напряжение и возможное дополнительное двулучепреломление [4].

При анализе изображений рис. 3 необходимо рассмотреть траектории распространения оптического излучения в градиентной линзе (рис. 4). Расчёт хода лучей был выполнен путём решения волнового уравнения для среды с радиально-симметричным распределением показателя преломления согласно выражению (1). Для решения использовался метод Рунге–Кутты 4-5 порядка точности, реализованный в Matlab.

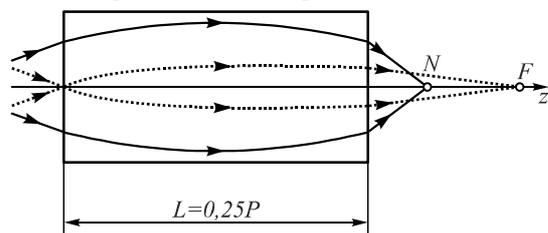


Рис. 4. Распространение косо падающих лучей в градане

Лучи, падающие на центральную часть входной поверхности, распространяются по наиболее коротким почти прямолинейным траекториям в приосевой области. Эти лучи фокусируются на максимальном удалении от выходной поверхности градана (рис. 3з–е). Излучение, освещающее боковую часть входной поверхности, распространяется по криволинейным траекториям максимальной длины преимущественно в краевой области градана. Это излучение фокусируется вблизи выходной поверхности (рис. 3а–в).

Для сколлимированных пучков Бесселя, прошедших приосевую часть градана, астигматическое преобразование относительно невелико (рис. 3з–е). Пучки Бесселя, прошедшие краевые области градана и сфокусированные вблизи выходной поверхности, подвержены большему астигматическому преобразованию (рис. 3а–в). Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают наличие минимальной оптической разности хода в центральной области градана и наибольшей – в его краевых областях. Астигматическое преобразование пучка исходного

Бесселя (рис. 2) хорошо заметно даже для лучей, прошедших приосевую область градана (рис. 3е). Следовательно, рассмотренный метод применим для контроля оптической разности хода с разрешением не хуже $0,05\lambda_0$. Сравнение полученных данных (рис. 3) с результатами исследований [10, 11] также указывает на преимущественно радиальное двулучепреломление, аналогичное одноосным кристаллам *a*-среза.

Экспериментальный метод в приведённом виде можно отнести к методам сравнения. Качественное сравнение двулучепреломления граданов одной длины осуществляют по виду астигматического преобразования пучка Бесселя при одинаковых расстояниях «микрообъектив – градан». Минимальное двулучепреломление соответствует наименьшему астигматическому изменению пучка.

Для количественных измерений необходимы изображения выходных пучков, соответствующие эталонным разностям хода (эталонные изображения). Для их получения необходима модернизация математической модели [10], учитывающая радиальный градиент показателя преломления и двулучепреломления. Эта работа планируется авторами на следующем этапе проекта.

Заключение

Апробирован метод измерения двулучепреломления и оптической разности хода, основанный на астигматическом преобразовании пучка Бесселя 0-го порядка. Показана разрешающая способность метода не хуже $0,05\lambda_0$, достаточная для решения практических задач градиентной оптики. Рассмотренный подход сохраняет все достоинства бесконтактных оптических методов измерения, обладает экспрессностью и не требует дорогостоящего обеспечения.

Определение оптической разности хода основано на подсчёте числа точечных максимумов и измерении их интенсивности вместо измерения числа и цветности полос в поляризационной микроскопии. Повышение чувствительности метода к двулучепреломлению образца заключается в увеличении углов падения оптического излучения. Это достигается простым уменьшением пространственного периода дифракционного аксикона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 16-29-11698-офи_м, 16-07-00825-а), Министерства образования и науки Российской Федерации (идентификатор ПНИЭР RFMEF157816X0209).

Литература

1. **Alferov, S.V.** Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate / S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31, Issue 4. – P. 802-807. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
2. **Rouke, J.L.** Birefringence measurements in gradient-index rod lenses / J.L. Rouke, D.T. Moore // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, Issue 31. – P. 6574-6580. – DOI: 10.1364/AO.38.006574.

3. **Camacho, J.** Polarization optics of GRIN lenses / J. Camacho, D. Tentori // *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*. – 2001. – Vol. 3, No 1. – P. 89-95.
4. **Su, W.** Birefringent properties of diametrically loaded gradient-index lenses / W. Su, J.A. Gilbert // *Applied Optics*. – 1996. – Vol. 35, Issue 24. – P. 4772-4781. - DOI: 10.1364/AO.35.004772.
5. **Rouke, J.L.** Birefringence in gradient-index rod lenses: a direct measurement method and interferometric polarization effects / J.L. Rouke, D.T. Moore // *Applied Optics*. – 2001. – Vol. 40, Issue 28. – P. 4971-4980. – DOI: 10.1364/AO.40.004971.
6. **Zusin, D.H.** Bessel beam transformation by anisotropic crystals / D.H. Zusin, R. Maksimenka, V.V. Filippov, R.V. Chulkov, M. Perdrix, O. Gobert, A.S. Grabtchikov // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2010. – Vol. 27, Issue 8. – P. 1828-1833. - DOI: 10.1364/JOSAA.27.001828.
7. **Хонина, С.Н.** Исследование поляризационного преобразования и взаимодействия обыкновенного и необыкновенного пучков в непараксиальном режиме / С.Н. Хонина, В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, А.А. Морозов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 598-605.
8. **Khonina, S.N.** Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.A. Morozov, V.D. Pararin // *Journal of Modern Optics*. – 2016. – Vol. 63(13). – P. 1239-1247. – DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
9. **Паранин, В.Д.** Измерение толщины Z-срезов одноосных кристаллов на основе лазерных пучков Бесселя / В.Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 594-599. - DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-594-599.
10. **Khonina, S.N.** Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal / S.N. Khonina, V.D. Pararin, A.V. Ustinov, A.P. Krasnov // *Optica Applicata*. – 2016. – Vol. 46, No 1. – P. 5-18. – DOI: 10.5277/oa160101.
11. **Pararin, V.D.** Diffractive polarization illuminator for a two-axis fiber-optic angle sensor / V.D. Pararin, S.N. Khonina // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10342. – 1034216. – DOI: 10.1117/12.2270553.
12. **Bin, Z.** Diffraction property of an axicon in oblique illumination / Z. Bin, L. Zhu // *Applied Optics*. – 1998. – Vol. 37(13). – P. 2563-2568. – DOI: 10.1364/AO.37.002563.
13. **Khonina, S.N.** Astigmatic Bessel laser beams / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 2004. – Vol. 51, Issue 5. – P. 677-686. – DOI: 10.1080/09500340408235545.
14. **Bendersky, A.** Modification of the structure of Bessel beams under oblique incidence / A. Bendersky, F. Perez-Quintán, M.A. Rebollo // *Journal of Modern Optics*. – 2008. – Vol. 55, Issue 15. – P. 2449-2456. – DOI: 10.1080/09500340802130662.
15. **Anguiano-Morales, M.** Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens / M. Anguiano-Morales // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, Issue 25. – P. 4826-4831. – DOI: 10.1364/AO.48.004826.
16. **Хонина, С.Н.** Расширение функциональных возможностей модовых астигматических конвертеров на основе применения дифракционных оптических элементов / С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, А.В. Устинов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2009. – Т. 11, № 5. – С. 13-23.

Сведения об авторах

Паранин Вячеслав Дмитриевич, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», в 2014 присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук, работает доцентом кафедры нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением, оптические измерения. E-mail: ypararin@mail.ru.

Карпеев Сергей Владимирович, 1956 года рождения, в 1979 году окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королева (ныне – Самарский государственный национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 0646 «Системотехника», в 1985 присуждена учёная степень кандидата физико-математических наук, в 2005 присуждена учёная степень доктора физико-математических наук, работает ведущим научным сотрудником в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

Бабаев Орхан Гаджибаба оглы, 1990 года рождения, в 2013 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», работает младшим научным сотрудником лаборатории НИЛ-53 Самарского университета. Область научных интересов: волоконно-оптические датчики, сенсорные системы антропоморфных роботов, оптические, волоконно-оптические и оптоэлектронные методы и средства автоматизации технологических процессов. E-mail: orbaev@yandex.ru.

ГРНТИ: 29.31.15, 29.31.29.

Поступила в редакцию 17 июля 2017 г. Окончательный вариант – 10 ноября 2017 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BIREFRINGENCE OF A PARABOLIC GRADIENT-INDEX LENS ON THE BASIS OF ASTIGMATIC TRANSFORMATION OF A BESSEL BEAM

V.D. Pararin¹, S.V. Karpeev^{1,2}, O.G. Babaev¹

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

Abstract

A method for the investigation of birefringence of mechanically free parabolic gradient-index lenses based on the astigmatic transformation of a zero-order Bessel beam has been experimentally

verified. Special features of the alignment of the optical setup are described and practical recommendations for selecting the setup components are given. By the example of a quarter-wave lens, we show experimentally that the optical path difference can be reliably measured within a $0.05\lambda_0$ accuracy. A significant difference between the birefringence properties of the gradient-index lenses in their central and edge regions is confirmed.

Keywords: birefringence, quarter-wave parabolic gradient-index lens, Bessel beam, optical path difference.

Citation: Parani VD, Karpeev SV, Babaev OG. Experimental investigation of birefringence of a parabolic gradient-index lens on the basis of astigmatic transformation of a Bessel beam. *Computer Optics* 2017; 41(6): 837-841. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-837-841.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR grants 16-29-11698-ofi_m and 16-07-00825-a) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (unique ID: Applied research and experimental work RFMEF157816X0209).

References

- [1] Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV. Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate. *JOSA A* 2014; 31(4): 802-807. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
- [2] Rouke JL, Moore DT. Birefringence measurements in gradient-index rod lenses. *Appl Opt* 1999; 38(31): 6574-6580. DOI: 10.1364/AO.38.006574.
- [3] Camacho J, Tentori D. Polarization optics of GRIN lenses. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2001; 3: 89-95.
- [4] Su W, Gilbert JA. Birefringent properties of diametrically loaded gradient-index lenses. *Appl Opt* 1996; 35(24): 4772-4781. DOI: 10.1364/AO.35.004772.
- [5] Rouke JL., Moore DT. Birefringence in gradient-index rod lenses: a direct measurement method and interferometric polarization effects. *Appl Opt* 2001; 40(28): 4971-4980. DOI: 10.1364/AO.40.004971.
- [6] Zusin DH, Maksimenka R, Filippov VV, Chulkov RV, Perdrix M, Gobert O, Grachtchikov AS. Bessel beam transformation by anisotropic crystals. *J Opt Soc Am A* 2010; 27(8): 1828-1833. DOI: 10.1364/JOSAA.27.001828.
- [7] Khonina SN, Parani VD, Karpeev SV, Morozov AA. Study of polarization transformations and interaction of ordinary and extraordinary beams in nonparaxial regime [In Russian]. *Computer Optics* 2014; 38(4): 598-605.
- [8] Khonina SN, Karpeev SV, Morozov AA, Parani VD. Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements. *J Mod Opt* 2016; 63(13): 1239-1247. DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
- [9] Parani VD. Measuring the thickness of z-cut uniaxial crystals based on Bessel laser beams [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(4): 594-599. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-594-599.
- [10] Khonina SN, Parani VD, Ustinov AV, Krasnov AP. Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal. *Optica Applicata* 2016; 46(1): 5-18. DOI: 10.5277/oa160101.
- [11] Parani VD, Khonina SN. Diffractive polarization illuminator for a two-axis fiber-optic angle sensor. *Proc SPIE* 2017; 10342: 1034216. DOI: 10.1117/12.2270553.
- [12] Bin Z, Zhu L. Diffraction property of an axicon in oblique illumination. *Appl Opt* 1998; 37(13): 2563-2568. DOI: 10.1364/AO.37.002563.
- [13] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA. Astigmatic Bessel laser beams. *J Mod Opt* 2004; 51(5): 677-686. DOI: 10.1080/09500340408235545.
- [14] Bendersky A, Perez-Quintán F, Rebollo MA. Modification of the structure of Bessel beams under oblique incidence. *J Mod Opt* 2008; 55(15): 2449-2456. DOI: 10.1080/09500340802130662.
- [15] Anguiano-Morales M. Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens. *Appl Opt* 2009; 48(25): 4826-4831. DOI: 10.1364/AO.48.004826.
- [16] Khonina SN, Karpeev SV, Ustinov AV. Functional enhancement of mode astigmatic converters on the basis of application of diffractive optical elements [In Russian]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 2009; 11(5): 13-23.

Authors' information

Vyacheslav Dmitrievich Parani (b.1986), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, professor assistant of Samara University. Research interests are methods and devices for controlling of laser radiation, optical measurements. E-mail: vparanin@mail.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev (b.1956), Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@smr.ru.

Orkhan Gadjibaba ogli Babaev (b.1990), graduated from the Samara State Aerospace University (presently, Samara National Research University, short – Samara University) with a degree in “Design and Technology of Electronic Computing Means”, works as a junior researcher of the laboratory NIL-53 of the Samara University. Research interests: fiber optic sensors, sensor systems of anthropomorphic robots, optical, fiber optic and optoelectronic methods and means of automation of technological processes. E-mail: orbaev@yandex.ru.

Received July 17, 2017. The final version – November 10, 2017.