

ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЙ БИНАРНЫЙ БИАКСИКОН ДЛЯ ДАЛЬНОГО ИК-ДИАПАЗОНА: ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2010 С.В. Карпеев², С.Н. Хонина¹, А.В. Волков², О.Ю. Моисеев²,
Г.Ф. Костюк¹, Д.М. Якуненкова²

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет)

² Институт систем обработки изображений РАН

Анализируется высокоапертурный бинарный биаксикон при освещении его линейно-поляризованным излучением, позволяющий перераспределить осевой вклад различных компонент электрического вектора так, чтобы продольная компонента имела на оптической оси максимальное значение, а поперечная – минимальное. Такой асимметричный аксикон для длины волны освещающего излучения 10,6 мкм был изготовлен на кремниевой подложке по технологии литографии и плазмохимического травления и экспериментально испытан методом регистрации внеосевых дифракционных картин при сканировании диафрагмой фокальной области.

Высокоапертурный дифракционный биаксикон, линейная поляризация, сверхразрешение.

Известно, что аксикон формирует бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности равен $\text{FWHM} = 0,36\lambda$ [1, 2], что на 30% меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой. Таким образом, вполне естественно использование аксикона в сверхразрешающих изображающих системах и для уплотнённой записи данных [3-5].

Однако для линейной поляризации освещающего аксикон излучения (которое производится большинством лазеров) достижению сверхразрешения в суммарной интенсивности электромагнитного поля препятствует вклад продольной компоненты, усиливающийся при увеличении числовой апертуры и уширяющий поперечный размер светового пятна вдоль оси поляризации, поэтому во многих работах рассматривается радиально-поляризованный падающий пучок. При радиальной поляризации высокоапертурный аксикон формирует световое пятно, состоящее в основном из одной продольной компоненты, и позволяет достичь предсказанное

скалярной теорией сверхразрешение по сравнению с линзой [3-6]. Данная ситуация особенно полезна при использовании материалов, чувствительных только к продольной компоненте [7].

В работе [8] было показано, что для линейно-поляризованного излучения, падающего на бинарный аксикон с высокой числовой апертурой, можно уменьшить размер центрального светового пятна вдоль линии поляризации с помощью перпендикулярного оси поляризации линейного фазового скачка.

В данной работе такой асимметричный аксикон для длины волны освещающего излучения 10,6 мкм изготовлен на кремниевой подложке по технологии литографии и экспериментально исследован методом регистрации внеосевых дифракционных картин при сканировании диафрагмой приосевой области.

1. Высокоапертурный бинарный фазовый дифракционный биаксикон

Фазовый дифракционный аксикон имеет комплексную функцию пропускания следующего вида:

$$r) = \exp(ik_0 r), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, r_0 – параметр аксикона, определяющий его числовую апертуру $NA = r_0$.

Рассмотрим бинарный высокоапертурный ($r_0 = 0,95$) микроаксикон вида

$$b(r) = \exp[i\phi_b(r)],$$

$$\phi_b(r) = \begin{cases} \pi/2, & \text{if } \text{mod}_2(k_0 r) \leq 3\pi/2, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (2)$$

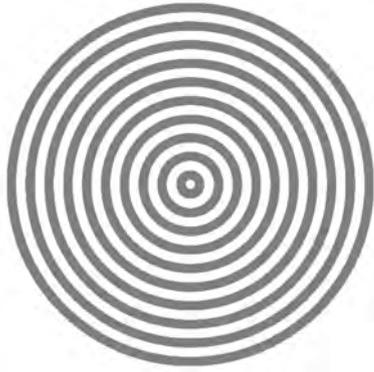
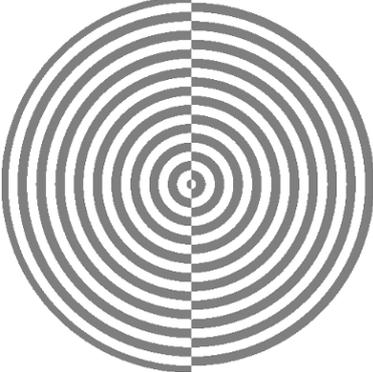
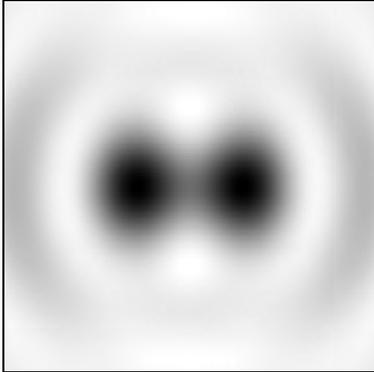
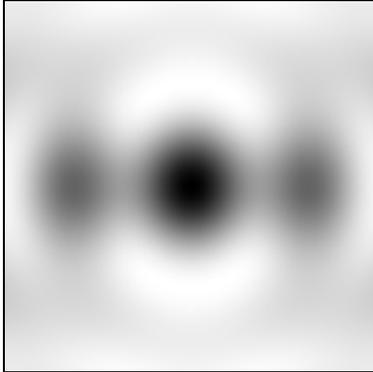
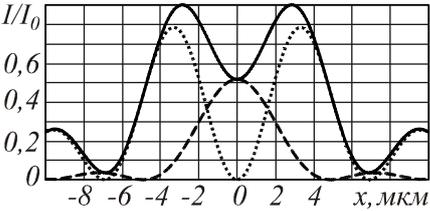
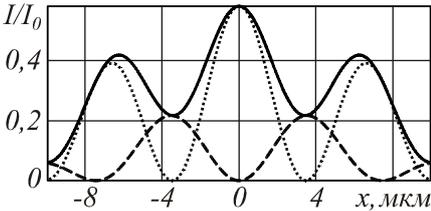
Используется для преобразования излучения в дальнем инфракрасном диапазоне $\lambda = 10,6$ мкм, радиусом R , а также биаксикон вида

$$b_b(r, \theta) = \exp\{i \arg[\cos(k_0 r) \cos \theta]\}. \quad (3)$$

Вид фазовой функции, соответствующей выражениям (2) и (3), показан в первой строке табл. 1. Действие этих двух типов аксиконов моделировалось в рамках строгой теории дифракции с использованием алгоритмов, описанных в работах [9, 10].

Как видно из табл. 1, для высокоапертурных аксиконов вклад продольной компоненты сравним с вкладом поперечных компонент даже на расстояниях, больших длины волны. При использовании обычного осесимметричного аксикона в случае линейной поляризации освещающего пучка это приводит к уширению центрального светового пятна вдоль оси поляризации. Такое уширение можно компенсировать использованием биаксикона.

Таблица 1. Сравнение действия двух типов аксиконов для $R = 10$ при линейной x -поляризации освещающего излучения

Тип ДОО	Осесимметричный аксикон	Биаксикон
Распределение фазы		
Распределение интенсивности при $z = 5$		
Сечение вдоль оси поляризации		

		FWHM(-)=0,495 ; HMA=0,177 ²
--	--	--

2. Изготовление бинарного биаксикона для дальнего ИК-диапазона на кремниевой пластине

Для изготовления биаксикона были использованы кремниевые подложки по ТУ ЕТО 03124 диаметром 76 мм и толщиной 0,38 мм марки КДБ 4,5 ориентации (100), которые разрезались на 4 части. Расчётная глубина травления такой пластины с показателем преломления $n = 3,42$ для $\lambda = 10,6$ мкм составляет 2,19 мкм.

На первом этапе технологического цикла на установке «Каролина Д12А» методом магнетронного напыления в едином вакуумном цикле наносился слой хрома (Cr) толщиной $400 \div 500$ Å на следующие образцы:

- а) стеклянные подложки (стекло марки К-8, размером $76 \times 76 \times 3$ мм) – для изготовления фотошаблона биаксикона с помощью станции лазерной записи;
- б) кремниевые пластины – для изготовления самого биаксикона;
- в) вспомогательные (технологические) подложки из ситалла СТ50-0,5 – для контроля качества напылённого слоя Cr, его толщины и измерения скорости ионно-химического травления.

На втором этапе был изготовлен фотошаблон биаксикона с помощью станции лазерной записи «CLWS-200 S». Вид фотошаблона соответствует ранее приведённому виду фазовой функции биаксикона, где на участках с фазой π хром оставляется, а с фазой 0 – удаляется. Диаметр фотошаблона – 12 мм, период зон – 10 мкм.

На третьем этапе с использованием изготовленного фотошаблона методом фотолитографии на структуре Si-Cr была получена фоторезистивная маска биаксикона, причём в качестве фоторезиста был использован резист марки ФП 9120 с разрешением $1 \div 1,5$ мкм согласно ТУ. Фоторезист наносился на поверхность хрома с помощью программируемой центрифуги POLOS со скоростью 3000 об/мин. Затем производилась сушка полученного слоя резиста в тёмном месте в течение 30 ми-

нут и 30-минутное досушивание в термопечи при температуре 80°C. Засветку резиста проводили с помощью установки экспонирования и совмещения ЭМ-5006 контактным способом через полученный ранее фотошаблон в течение 30-35 секунд. В качестве проявителя использовали 5% раствор КОН. После проявления полученного рисунка образец задубливали в термопечи поэтапно: при температуре 100°C – 10 минут, при температуре 150°C – ещё 20 минут. Далее через полученную маску стравливали хром на открытых участках маски с помощью раствора церия. Контрольные измерения полученных параметров рисунка для сравнения с шаблоном проводили с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4. Для получения рельефа на кремниевой подложке образец помещался в рабочую камеру установки ионно-химического травления (ИХТ) УТП ПДЭ-125-009 («ИНТРА»). После откачки рабочей камеры до остаточного давления $P_{\text{ост}} \leq 10^{-2}$ Па в реактор подавался элегаз (SF_6) с расходом примерно 1,8 л/ч. Плазма в реакторе возбуждалась генератором высокой частоты (13,56 МГц) индукционным методом. ВЧ-мощность, поступающая в рабочую камеру, находилась в пределах 580 Вт. При таких условиях скорость травления не закрытых маской хрома участков кремния составила 0,73 мкм/мин, а время получения заданного микрорельефа – примерно 3 минуты. Глубина травления, измеренная на микроинтерферометре МИИ-4 и на профилографе-профилометре «KLA Tencor P-16» составила 2,2 мкм, что соответствует расчётному значению. Аттестация полученного микрорельефа проводилась на интерферометре Zygo NewView 5000, а также на электронном микроскопе Supra 25. На рис. 1 приведены результаты исследования изготовленного биаксикона, которые свидетельствуют о высоком качестве микрорельефа и соответствии его параметров расчётным значениям с погрешностями 10%-15%. Некоторое отличие измеренной высоты рельефа разными метода-

ми происходит, по-видимому, из-за различий в выборе точек на микрорельефе, по которым измеряется высота рельефа неидеально прямоугольной формы.

3. Экспериментальное исследование биаксикона

Ранее для исследований узких пучков применялись схемы [11], основанные на измерении прошедшей энергии в процессе сканирования пучка ножом либо диафрагмой. Недостатки таких схем хорошо из-

вестны [12] и связаны с дифракцией света на ноже либо диафрагме, приводящей к существенному увеличению расходимости светового пучка после ножа ввиду его малых размеров.

На рис. 2 показаны результаты моделирования ограничения с помощью круглой диафрагмы радиусом 2 пучка, сформированного высокоапертурным биаксиконом (3).

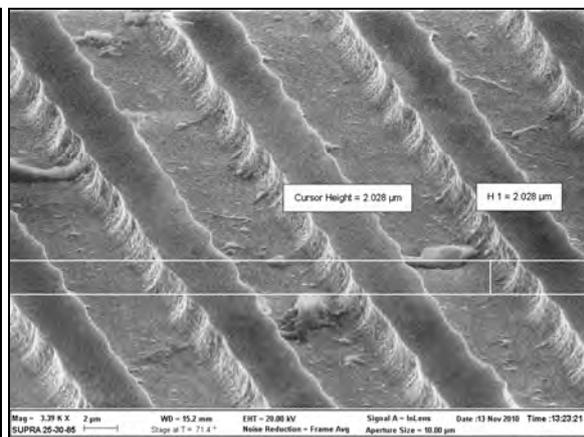
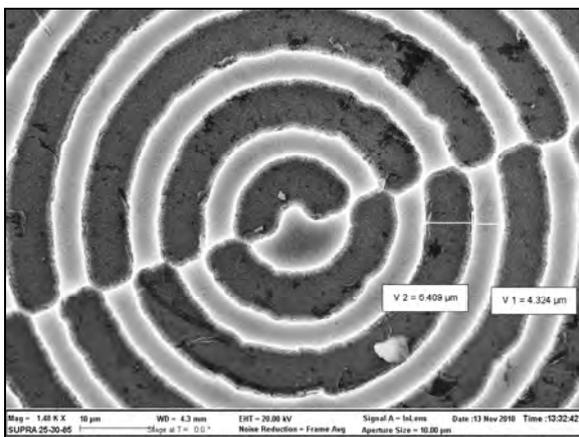
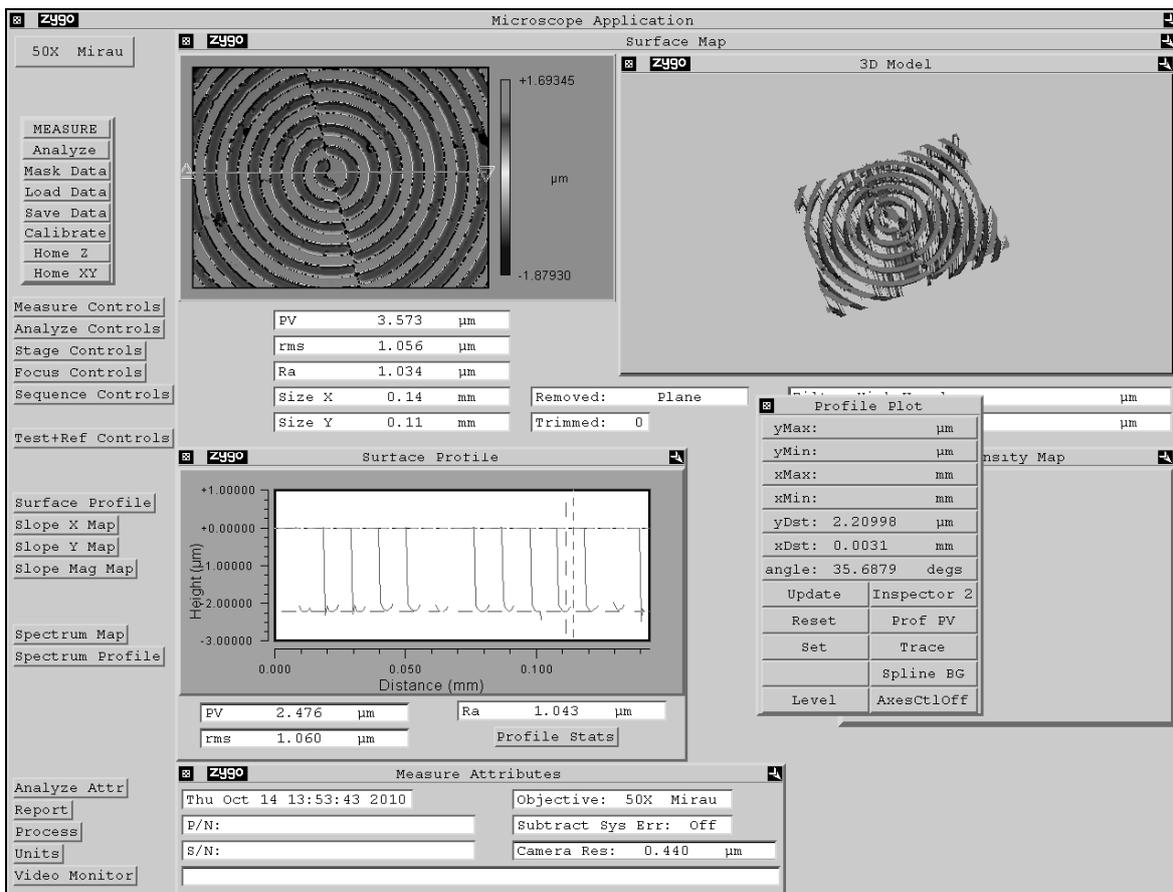


Рис. 1. Результаты исследования микрорельефа на интерферометре Zygo NewView 5000 и на электронном микроскопе Supra 25

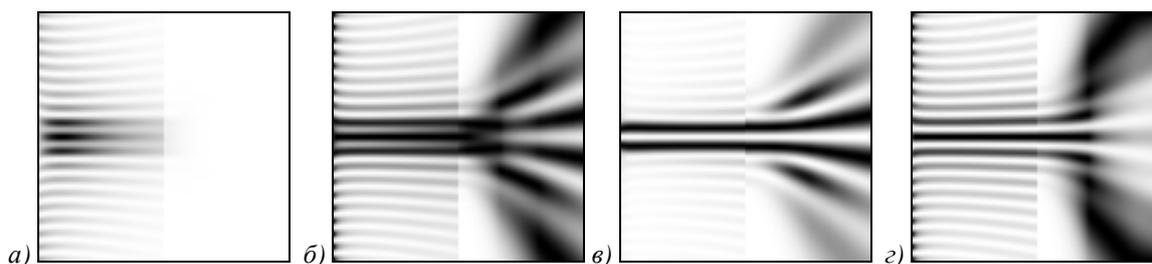


Рис. 2. Ограничение пучка с помощью круглой диафрагмы радиусом 2 : распределение интенсивности (а) и топология распределения: для суммарной интенсивности (б), для интенсивности поперечных компонент (в) и для интенсивности продольной компоненты (г)

Из рис. 2 видно, что для регистрации полей интенсивности при осевом расположении детектора требуются дополнительные меры для коллимации света с большими углами распространения, что не всегда осуществимо даже высокоапертурными оптическими системами. Кроме того, доля энергии в центральном пятне у аксиконов весьма мала, что приводит к малости изменений световой энергии при сканировании и, как следствие, высокой погрешности измерений даже для фотоприёмников с большим динамическим диапазоном.

Учитывая вышеизложенное, для экспериментов с изготовленным биаксиконом была собрана оптическая схема, показанная на рис. 3, реализующая новый подход к исследованию высокоапертурных оптических элементов.

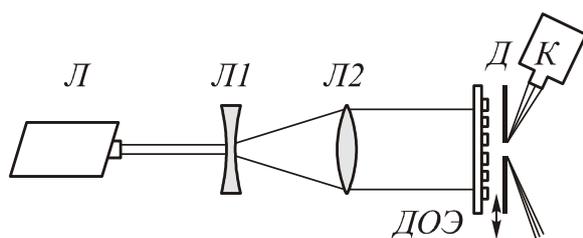


Рис. 3. Оптическая схема установки для исследования высокоапертурных аксиконов

В рамках предложенного подхода предлагается судить о распределении энергии, прошедшей через аксикон, по изменению характера дифракции на диафрагме в процессе её перемещения в интересующей нас области сформированного поля интенсивности. При этом у высокоапертурных элементов основной лепесток дифракции также будет распростра-

няться под большими углами к оптической оси. Предлагается расположить видеокамеру в этой области дифракции так, чтобы её оптическая ось была ориентирована в направлении дифракционного максимума. Оптическая схема содержит CO_2 -лазер Л марки LCD-1А с регулируемой мощностью до 1,5 Вт. Излучение лазера Л содержит линейно поляризованную моду TEM_{00} с диаметром на выходном зеркале около 2 мм и расходимостью около 10 мрад. Для освещения исследуемого элемента пучок расширялся при помощи телескопической системы, состоящей из отрицательной и положительной линз Л1 и Л2, изготовленных из ZnSe, примерно в 5 раз. Юстировки самой телескопической системы и положения пучка относительно элемента осуществлялись в видимом свете, используя близость показателя преломления ZnSe в видимой области и дальнем ИК-диапазоне. Перемещение диафрагмы Д диаметром около 150 мкм осуществлялось при помощи дифференциального микрометрического винта с ценой деления 1 мкм. Начальное положение диафрагмы также выставлялось при освещении видимым светом и расстоянии до элемента около 5 мм. Далее диафрагма параллельно сдвигалась до расстояния от элемента примерно 1 мм. Результаты дифракции наблюдались под углом к оптической оси, дающим максимальную интенсивность дифрагированного света (около $7^\circ \dots 10^\circ$) при помощи неохлаждаемой ИК-камеры К марки XPORT на основе матрицы микроболометров. Камера использовалась со штатным объекти-

вом с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1,2. Поскольку в рассматриваемом случае дифракционные картины не претерпевают качественных изменений при распространении, а лишь меняют масштаб, нет необходимости точно наводить камеру на резкость в плоскость диафрагмы. Это даёт возможность достаточно близко (около 100 мм) расположить камеру к отверстию диафрагмы. На рис. 4 представлен ряд записанных распределений интенсивности, соответствующих положениям диафрагмы с шагом 2,5 мкм в центральной части элемента. Подобные картины наблюдаются и при дальнейшем перемещении диафрагмы.

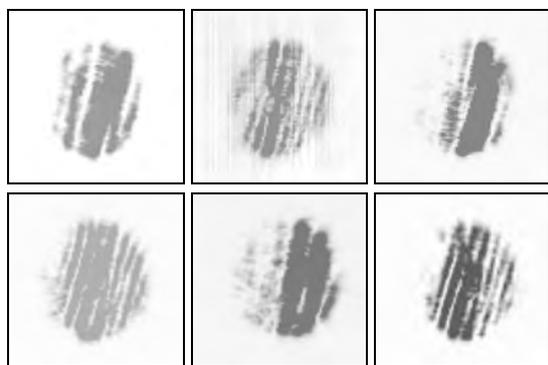


Рис. 4. Распределения интенсивности, полученные на ИК-камере в процессе сканирования диафрагмы вблизи поверхности биаксикона

Сравнение их с модельными картинками, приведенными на рис. 2, позволяет сделать вывод, что при попадании края диафрагмы на минимум в распределении интенсивности наблюдается малое число полос – одна или две, при попадании же края диафрагмы на максимумы интенсивности число полос увеличивается, что хорошо видно на рис. 4.

Данные изменения дифракционной картины наблюдаются именно с периодом, близким к 5 мкм. Учитывая то, что мы видим на изображениях, полученных в камере, дифракцию лишь на одной стороне диафрагмы, можно сделать вывод о наличии периодических изменений интенсивности с периодом, предсказываемым теорией, в фокальной области биаксикона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы

«Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

Библиографический список

1. **Kalosha, V.P.** Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution [Text] / V.P. Kalosha and I. Golub // *Opt. Lett.* – 2007. – V. 32. – P. 3540-3542.
2. **Хонина, С.Н.** Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 401-411.
3. **Helseth, L.E.** Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens system [Text] / L.E. Helseth // *Opt. Commun.* – 2001. – V. 191. – P. 161-172.
4. **Grosjean, T.** Conical optics: the solution to confine light [Text] / T. Grosjean, F. Baida and D. Courjon // *Applied Optics.* – 2007. – Vol. 46, N 11. – P. 1994-2000.
5. **Котляр, В.В.** Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксиконов [Текст] / В.В. Котляр, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 52-60.
6. **Хонина, С.Н.** Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре [Текст] / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский, М.А. Ананьин // *Изв. Самар. науч. центра РАН.* – 2010. – № 12(3). – С. 15-25.
7. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field [Text] / T. Grosjean, D. Courjon // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, N 6. – P. 2203-2210.
8. **Хонина, С.Н.** Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский //

Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 58-68.

9. **Хонина, С.Н.** Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре [Текст] / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Вологовский, М.А. Ананьин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – № 12(3). – Р. 15-25.

10. **Хонина, С.Н.** Распространение радиально-ограниченных вихревых пучков в ближней зоне: I. Алгоритмы расчёта [Текст] / С.Н. Хонина, А.В. Устинов,

А.А. Ковалёв, С.Г. Вологовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 317-332.

11. **Suzaki, Y.** Measurement of the μm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge [Text] / Y. Suzaki, A. Tachibana // Applied Optics. – 1975. – V. 14. – P. 2809-2810.

12. **Stolpen, A.** Characterization of microscope laser beams by scanning of fluorescence emission [Text] / A.H. Stolpen, C.S. Brown, D.E. Golan // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 4414-4422.

References

1. **Kalosha, V.P.** Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha and I. Golub // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – P. 3540-3542.

2. **Khonina, S.N.** Fracxicon – diffractive optical element with conical focal domain / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2009. – Vol. 33, N 4. – P. 401-411 – [in Russian].

3. **Helseth, L.E.** Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens system / L.E. Helseth // Opt. Commun. – 2001. – V. 191. – P. 161-172.

4. **Grosjean, T.** Conical optics: the solution to confine light / T. Grosjean, F. Baida and D. Courjon // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, N 11. – P. 1994-2000.

5. **Kotlyar, V.V.** Simulation of sharply focusing a radially polarized laser mode with conical and binary microaxicons / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev // Computer Optics. – 2009. – V. 33, N 1. – P. 52-60. – [in Russian].

6. **Khonina, S.N.** Fast calculation algorithms for diffraction of radially-vortical laser fields on the microaperture / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy, M.A. Ananin // Izvest. SNC RAS – 2010. – V. 12(3). – P. 15-25. – [in Russian].

7. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field /

T. Grosjean, D. Courjon // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14, N 6. – P. 2203-2210.

8. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the vector electric field components to the high-aperture lens focus using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2010. – V. 33, N 1. – P. 58-60. – [in Russian].

9. **Khonina, S.N.** Fast algorithms for computing the diffraction of radial laser vortices by a microaperture / S.N. Khonina, S.G. Ustinov, M.A. Volotovskiy, M.A. Ananin // Proceedings of the Samara Research Center of the RAS. – 2010. – V. 12(3). – P. 15-25. – [in Russian].

10. **Khonina, S.N.** Propagation of radially restricted vortex beams in the near field: I. Computation algorithms / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.A. Kovalev, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2010. – V. 34, N 3. – P. 317-332. – [in Russian].

11. **Suzaki, Y.** Measurement of the μm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge / Y. Suzaki, A. Tachibana // Applied Optics. – 1975. – V. 14. – P. 2809-2810.

12. **Stolpen, A.** Characterization of microscope laser beams by scanning of fluorescence emission / A.H. Stolpen, C.S. Brown, D.E. Golan // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 4414-4122.

HIGH-APERTURE BINARY BI-AXICON FOR FAR IR LIGHT: FABRICATION AND EXPERIMENTAL TESTING USING LINEARLY POLARIZED INCIDENT LIGHT

@ 2010 S.V. Karpeev², S.N. Khonina¹, A.V. Volkov², O.Yu. Moiseev²,
G.F. Kostyuk¹, D.M. Yakunenkova²

¹ Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

² Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

The process when illuminated by a linearly polarized light, a high-aperture binary bi-axicon allows one to redistribute the axial contribution of different electric vector components is analysed. This ensure a maximal value of the longitudinal component and a minimal value of the transverse component on the optical axis. Such an asymmetric axicon for the wavelength 10.6 μm is fabricated on a silicon substrate using a lithography technique with plasma-chemical etching. Off-axis diffraction patterns were obtained experimentally through diaphragm-aided scanning of the focal plane.

High-aperture diffractive bi-axicon, linear polarization, superresolution.

Информация об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, ведущий научный сотрудник. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Волков Алексей Васильевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией микро- и нанотехнологий. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: исследование технологических режимов плазмохимического травления материалов, используемых в производстве ДОЭ, исследование и разработка технологий формирования микрорельефа ДОЭ, создания микро- и наноструктур, имеющих определенное функциональное назначение. E-mail: volkov@ssau.ru

Моисеев Олег Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: технологические процессы создания микроструктур дифракционной оптики. E-mail: moiseev@smr.ru.

Костюк Геннадий Федорович, ведущий инженер НИЛ-35. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: исследование технологических режимов плазмохимического травления материалов.

Якуненкова Диана Михайловна, ведущий технолог лаборатории микро- и нанотехнологий. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: исследование и разработка технологий формирования микрорельефа ДОЭ, создание микро- и наноструктур. E-mail cat@smr.ru.

Karpeev Sergei Vladimirovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, leading researcher. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, fiber optics, optical image processing. E-mail: karp@smr.ru.

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, professor of the technical cybernetics department, leading researcher. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: diffractive optics, mode and polarization transformations, fiber optics, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru.

Volkov Alexey Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor, head of the micro- and nano-technology. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: research of technological conditions for plasma-chemical etching of materials used for DOE fabrication; technologies for DOE microrelief fabrication, for creation of micro- and nano-structures with definite-purpose functionalities. E-mail: volkov@ssau.ru.

Moiseev Oleg Yurevich, candidate of technical sciences, senior staff scientist. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: technological process of diffractive optics. E-mail: moiseev@smr.ru.

Kostyuk Gennadyi Fedorovich, leading engineer. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: technological conditions for plasma-chemical etching of materials.

Yakunenkova Diana Mikhailovna, leading technologist micro- and nano-technology laboratory. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: technologies for DOE microrelief fabrication, creation of micro- and nano-structures. E-mail cat@smr.ru.