

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

© 2010 С.В. Карпеев<sup>2</sup>, С.Н. Хонина<sup>1</sup>, А.В. Волков<sup>2</sup>, О.Ю. Моисеев<sup>2</sup>,  
Г.Ф. Костюк<sup>1</sup>, Д.М. Якуненкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> 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,  $\lambda$  – длина волны,  $r_0$  – параметр аксикона, определяющий его числовую апертуру  $NA = r_0$ .

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

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

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


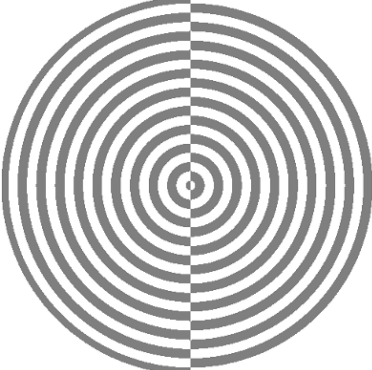
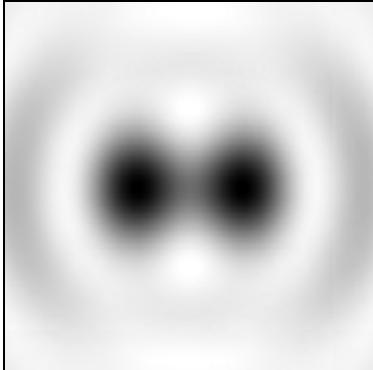
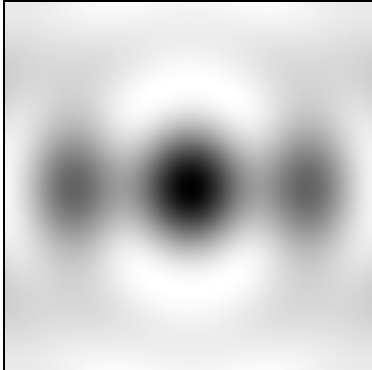
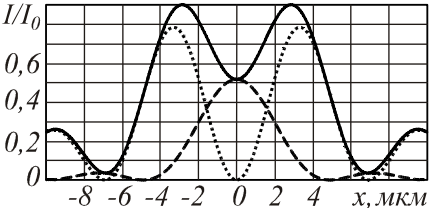
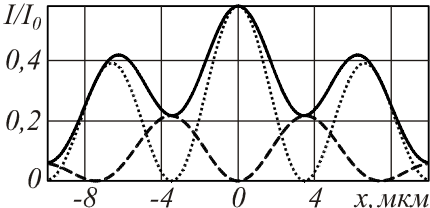
Используется для преобразования излучения в дальнем инфракрасном диапазоне  $\lambda = 10,6$  мкм, радиусом  $R$ , а также биаксикон вида

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

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		

## 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  $400 \div 500 \text{ \AA}$  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  $\pi$  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  $80^\circ\text{C}$ . 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  $100^\circ\text{C}$  – 10 минут, при температуре  $150^\circ\text{C}$  – 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 ( $\text{SF}_6$ ) 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).

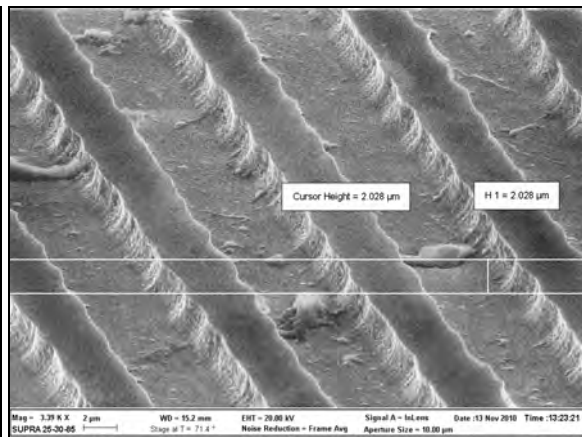
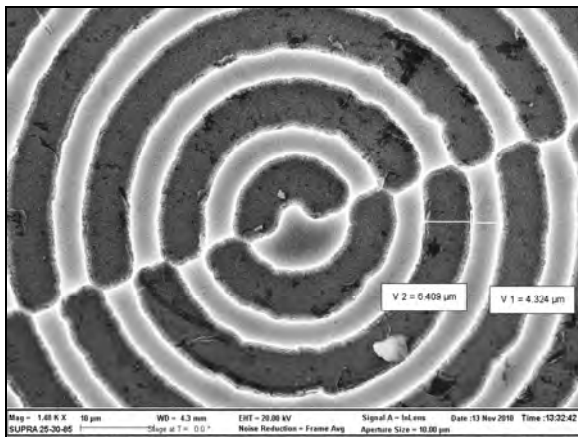
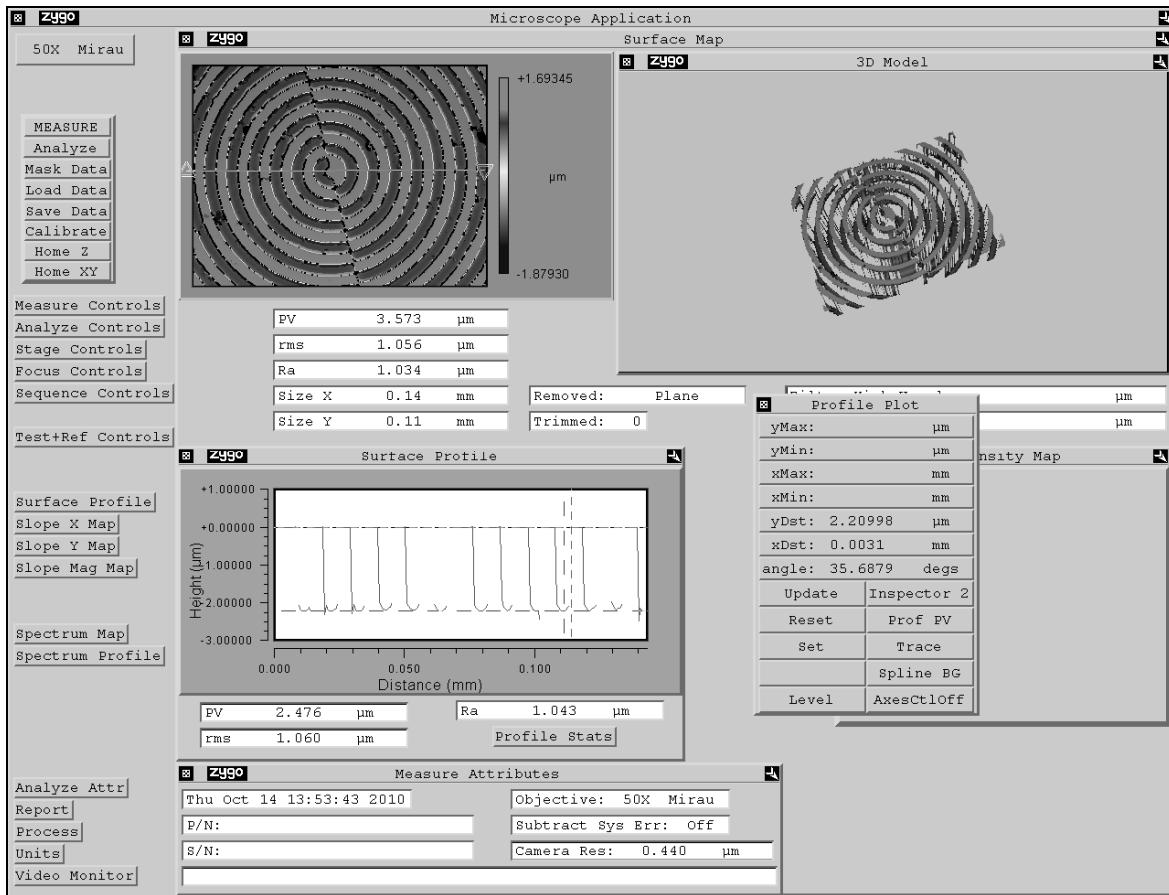


Рис. 1. Результаты исследования микрорельефа на интерферометре Zygo NewView 5000 и на электронном микроскопе Supra 25

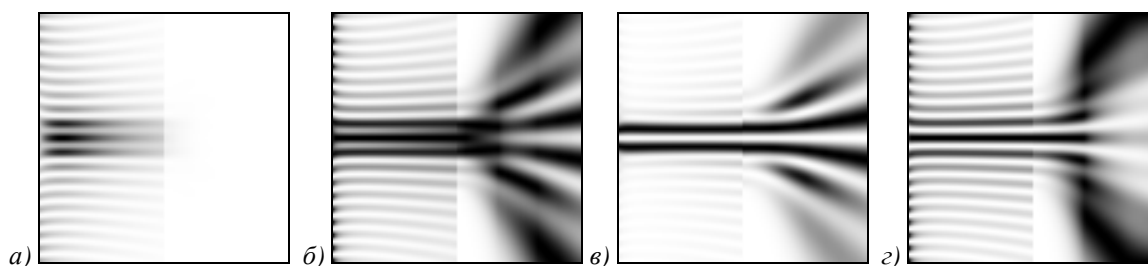


Рис. 2. Ограничение пучка с помощью круглой диафрагмы радиусом  $2$  : распределение интенсивности (а) и топология распределения: для суммарной интенсивности (б), для интенсивности поперечных компонент (в) и для интенсивности продольной компоненты (г)

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.

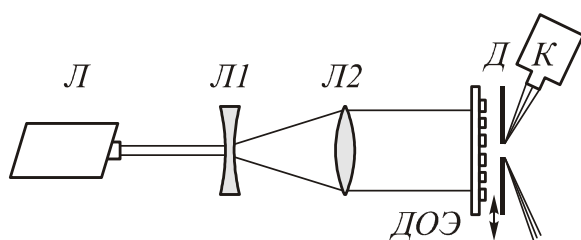


Рис. 3. Оптическая схема установки для исследования высокоапертурных аксиконов

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  $\text{CO}_2$ -лазер Л марки LCD-1A с регулируемой мощностью до 1,5 Вт. Излучение лазера Л содержит линейно поляризованную моду  $\text{TEM}_{00}$  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.

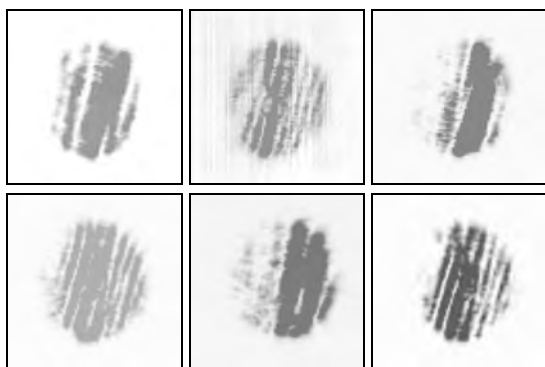


Рис. 4. Распределения интенсивности, полученные на ИК-камере в процессе сканирования диафрагмы вблизи поверхности биаксикона

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. Волотовский, 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. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 317-332.

11. **Suzaki, Y.** Measurement of the  $\mu\text{m}$  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. Ananyin // 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  $\mu\text{m}$  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. Karpeev<sup>2</sup>, S.N. Khonina<sup>1</sup>, A.V. Volkov<sup>2</sup>, O.Yu. Moiseev<sup>2</sup>,  
G.F. Kostyuk<sup>1</sup>, D.M. Yakunenkova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> 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  $\mu\text{m}$  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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:cat@smr.ru).