

Исследование методом FDTD поляризационных преобразований, осуществляемых преломляющим биконическим аксиконом

П.А. Хорин^{1,2}, А.М. Алгубили^{1,3}, С.А. Дегтярев^{1,2}, С.К. Сергунин¹, С.В. Карпеев^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

³ Университет г. Куфа, 540011, Ирак, г. Куфа, п/я № 21

Аннотация

В данной работе проведено исследование на основе метода FDTD поляризационных преобразований, осуществляемых рефракционным биконическим аксиконом. Данный элемент имеет две рабочие конические поверхности, при взаимодействии с которыми осуществляется преобразование оптического пучка с круговой поляризацией в азимутально поляризованный пучок. На внутренней поверхности элемента происходит преобразование поляризации за счет отражения и преломления лучей под углом Брюстера, а внешняя поверхность обеспечивает коллимацию преобразованного пучка. В качестве критериев успешного поляризационного преобразования рассмотрены распределения компонент вектора электрического поля на различных расстояниях от оптического элемента. На основе численного моделирования показана работоспособность предложенного подхода для биконического аксикона, выполненного из стекла с показателем преломления $n = 1,4958$, и Гауссова пучка с круговой поляризацией с длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм. Показано сохранение работоспособности предложенного элемента при изменении показателя преломления материала элемента и изменении длины волны падающего излучения в достаточно широких диапазонах ($1,5 \leq n \leq 1,7$; $1 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ мкм}$).

Ключевые слова: биконический аксикон, поляризационные преобразования, FDTD-метод, дисперсионная устойчивость.

Цитирование: Хорин, П.А. Исследование методом FDTD поляризационных преобразований, осуществляемых преломляющим биконическим аксиконом / П.А. Хорин, А.М. Алгубили, С.А. Дегтярев, С.К. Сергунин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 5. – С. 742-750. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1326.

Citation: Khorin PA, Algubili AM, Degtyarev SA, Sergunin SK, Karpeev SV, Khonina SN. Investigation of polarization transformations performed with a refractive bi-conical axicon using the FDTD method. Computer Optics 2023; 47(5): 742-750. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1326.

Введение

Значительное внимание исследователей привлекает возможность формирования неоднородно поляризованных пучков, структура которых может быть очень сложной [1–12]. Такие пучки обеспечивают дополнительную степень свободы мультиплексирования и кодирования оптической информации [13–16], улучшенное разрешение в микроскопии [17–19], расширенные возможности оптического захвата и манипулирования [20–22], а также новые эффекты в обработке поверхности и взаимодействии с веществом [23–30].

В частности, структурированные лазерные пучки перспективны при воздействии излучения на азополимеры [31, 32], которые являются светочувствительными материалами, содержащими азофункциональные группы. Отличительной особенностью таких материалов является обратимая фотоизомеризация и массоперенос под действием оптических сил. Поляризационная анизотропия азополимерных пленок позволяет использовать пучки с радиальной и азиму-

тальной поляризацией как для анализа молекулярной структуры азополимера [33], так и для формирования сложного микрорельефа на его поверхности [34, 35].

Существуют различные подходы к формированию неоднородно поляризованных пучков, среди которых интерференционные методы [36–38], применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [39–41], пространственных модуляторов света (ПМС) [42, 43], субволновых решеток и метаповерхностей [44–47], а также анизотропных кристаллов [48–53]. Все методы имеют свои преимущества и недостатки. ПМС преобразуют только часть проходящего света, тем самым уменьшая поляризационный контраст. Для преобразователя на основе субволновых решеток поляризационный контраст изменяется в зависимости от угла поворота плоскости поляризации. Хотя ее можно компенсировать комбинацией поляризационных и фокусирующих элементов [44, 46], технология изготовления субволновых решеток для видимого диапазона длин волн достаточно сложна.

Также хорошо известны методы генерации неоднородно поляризованных пучков на основе поляри-

зующих свойств процесса преломления либо отражения света, например, с помощью преломляющих аксиконов, использующих падение света под углом Брюстера [54–56]. Несомненными достоинствами рефракционных аксиконов являются высокая эффективность и меньшая зависимость свойств от длины волны, а также возможность фокусировки излучения [57]. Аналогами рефракционных аксиконов могут считаться слоистые аксиконы [58, 59]. Однако изготовление рефракционных аксиконов оптического качества сопряжено с определенными трудностями, в основном из-за невозможности полностью контролировать качество конической поверхности [60, 61]. Поэтому для поляризационного преобразования, когда требуется формирование конического волнового фронта с заданным углом наклона к оптической оси, часто используют дифракционные аналоги аксиконов, а функцию поляризационного преобразования осуществляют отдельно расположенные оптические элементы. В частности, это позволяет формировать цилиндрические векторные пучки при многократном преломлении в стопе Столетова [62]. Однако в силу больших значений угла Брюстера коллимация выходного излучения отдельным дополнительным элементом очень затруднена. Компенсировать указанный недостаток позволяет использование интерференционного поляризатора [63]. При этом возможна коллимация излучения с помощью рефракционного аксикона, поскольку углы падения на поляризатор здесь существенно меньше угла Брюстера, а требования к качеству коллимирующей поверхности существенно ниже. Однако наличие нескольких юстируемых между собой с высокой степенью точности элементов затрудняет эксплуатацию такого подхода.

Эти недостатки в значительной мере устраняются в преломляющем биконическом аксиконе [64] для преобразования пучка света с круговой поляризацией в азимутально поляризованный кольцевой вихревой пучок. Принцип работы заключается в использовании одного рефракционного элемента с двумя коническими поверхностями: на внутренней поверхности происходит преобразование поляризации за счет отражения и преломления лучей под углом Брюстера, а внешняя поверхность используется для коллимации преобразованного пучка. По сравнению с ПМС [42, 43] и субволновыми решетками [44–47] биконический аксикон имеет меньшую эффективность (~7% против ~25%), но намного проще и дешевле в производстве, поскольку не требует изготовления наноразмерного рельефа. Кроме того, рефракционный элемент может преобразовывать излучение от нелазерных источников света с большей шириной спектра. Также рефракционный биконический аксикон более устойчив к повреждениям, связанным с высокой энергией лазерных пучков.

Исследование поляризационных преобразований, осуществляемых коническими поверхностями, про-

водилось в работах [64–66] в приближении геометрической оптики. При этом получали результат в дальней зоне дифракции. Отметим, однако, что ряд современных применений таких элементов [67, 68] ориентирован на ближнюю зону дифракции. Исследования хроматических свойств элемента также не проводилось. Поэтому возникает задача исследования разработанного элемента в электромагнитном приближении с целью уточнения результатов геометрико-оптического расчета, а также исследования поляризационного преобразования на различных расстояниях и его устойчивости в зависимости от длины волны.

1. Теоретические основы

В работе [64] был предложен рефракционный биконический аксикон для формирования из пучка с круговой поляризацией азимутально поляризованного вихревого пучка. Элемент образован двумя коническими поверхностями таким образом, что образует фигуру вращения, напоминающую вулкан (рис. 1).

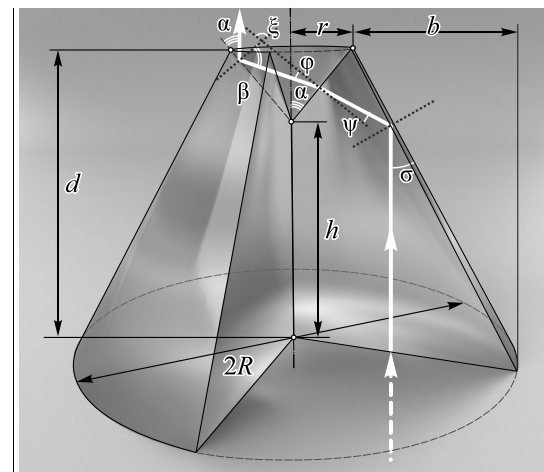


Рис. 1. Общий вид преломляющего биконического аксикона с иллюстрацией хода луча (белая линия) при падении коллимированного излучения на основание оптического элемента. Показаны основные углы и размеры

Предполагается, что коллимированный пучок с круговой поляризацией падает снизу вверх (белый луч на рис. 1) на внешнюю коническую поверхность под углом $\pi/2 - \sigma$, от которой отражается за счет полного внутреннего отражения. Далее луч падает на внутреннюю коническую поверхность под углом ψ , на которой преломляется под углом ϕ и направляется на противоположную сторону внутренней поверхности элемента. Повторное падение на внутреннюю поверхность происходит под углом Брюстера β . Отраженная часть пучка имеет азимутальную поляризацию. При этом параметры оптического элемента нужно подобрать так, чтобы выходящий пучок был коллимированным. Приведем вывод формул для основных параметров биконического аксикона, полагая, что показатель преломления материала элемента составляет $n = 1,4958$. Элемент имеет радиус плоской части R . При повторном взаимодействии с внутрен-

ней поверхностью биконического аксикона угол падения луча равен углу Брюстера (рис. 1):

$$\beta = \arctan(n). \quad (1)$$

Кроме того, отраженный под углом Брюстера s -поляризованный луч должен быть параллелен оптической оси. Чтобы выполнялось данное условие, а также условие (1), достаточно обеспечить выполнение соотношений (2).

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi}{2} - \beta, \quad \xi = \pi - 2\alpha, \quad \varphi = \pi - 3\beta, \\ \psi &= \arcsin\left(\frac{\sin \varphi}{n}\right), \quad \sigma = \frac{\pi/2 + \psi - \alpha}{2}, \\ h &= \frac{R}{\tan(\pi - 2\beta)}, \quad H = \frac{R}{\tan \sigma}, \\ r &= \frac{(R - h \tan \sigma)}{(\tan \sigma / \tan \alpha + 1)}, \quad b = R - r, \quad d = \frac{b}{\tan(\sigma)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Профиль элемента определяется следующим полигоном:

$$Volcone = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ d & b \\ h & R \\ d & r + R \\ 0 & 2R \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2. Численное моделирование

Зададим источник света, как Гауссов пучок с различной поляризацией и длиной волны $\lambda = 1,5$ мкм. Поперечное распределение Гауссова пучка описывается следующим уравнением:

$$G(x, y) = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где $\sigma = 3\lambda$.

Расчеты дифракции однородного и неоднородного поляризованного лазерного Гауссова пучков на стеклянном биконическом аксиконе, выполненного из стекла с показателем преломления $n = 1,4958$, с учетом трехмерной структуры проводились методом FDTD, реализованным в программе Lumerical.

Биконический аксикон представляет собой элемент, образованный двумя коническими поверхностями. Полная высота элемента $d = \eta + d = 11,1$ мкм, большее основание $2R = 20$ мкм, меньшее основание $2r = 6,2$ мкм.

2.1. Действие биконического аксикона с однородно-поляризованным Гауссовым пучком

Результаты расчёта дифракции x -поляризованного Гауссова пучка и Гауссова пучка с радиусом 5 мкм и круговой поляризацией представлены в табл. 1. На поперечном распределении полной интенсивности вектора

электрического поля на расстоянии $z = 11$ мкм (сразу после элемента) видно, что энергия в основном распределяется по двум кольцам – большего радиуса (около 3 мкм), где сохраняется исходная поляризация, и меньшего радиуса (около 1,5 мкм), где происходит поляризационное преобразование. Отметим, что интенсивность в ближней зоне, полученная на основе FDTD-метода, согласуется с результатами геометро-оптического подхода [64–66] и результатами натурального эксперимента [67], полученными в дальней зоне дифракции. Также наблюдается центральный пик, сохраняющий исходную поляризацию, что связано с присутствием вихревой фазы при поляризационном преобразовании падающего поля с круговой поляризацией [69, 70]. Для x -поляризованного поля в центральной части наблюдается вытянутое вдоль оси поляризации распределение интенсивности, характерное для ситуации острой фокусировки, когда значительный вклад в общую интенсивность вносит продольная компонента [71, 72]. Более детально распределение интенсивности и фазы для каждой компоненты электрического поля показаны в табл. 2 и 3 для освещающего пучка с линейной и круговой поляризацией соответственно.

Размер фокального пятна по FWHM равен 1 мкм для Гауссова пучка радиусом 5 мкм с круговой поляризацией после прохождения биконического аксикона на расстоянии $z = 11$ мкм (сразу после элемента). Для сравнения при аналогичных параметрах использование x -поляризованного Гауссова пучка позволяет достигнуть размера фокального пятна по FWHM, равного 0,5 мкм.

Как видно из табл. 2, при освещении элемента x -поляризованным Гауссовым пучком общая интенсивность на выходе из аксикона в основном определяется E_x компонентой. Только в центральной части также имеет место соизмеримый вклад E_z компоненты, что и приводит к вытянутому центральному пятну вдоль оси поляризации в полной интенсивности (табл. 1, первая строка, проекция OXY).

В табл. 3 показаны аналогичные результаты при освещении элемента Гауссовым пучком с круговой поляризацией. В этом случае на выходе из аксикона наблюдается азимутальная поляризация в кольце меньшего радиуса, что видно по картинкам интенсивности поперечных компонент вектора электрического поля.

Далее более подробно исследуем возможность использования разработанного биконического аксикона с фиксированными геометрическими параметрами для преобразования круговой поляризации в азимутальную при вариациях длины волны и показателя преломления материала, из которого изготовлен элемент.

2.2. Действие биконического аксикона с Гауссовым пучком круговой поляризации при хроматических aberrациях

Зададим источник света, как Гауссов пучок (4) с радиусом 10 мкм и круговой поляризацией. Будем

варьировать длину волны источника света λ в диапазоне от 1,0 мкм до 1,5 мкм, а показатель преломления

элемента зафиксируем $n=1,5$. Результаты моделирования представлены в табл. 4.

Табл. 1. Сравнение действия различно поляризованного источника света (поперечное сечение на расстоянии $z = 11$ мкм, продольное сечение в проекции OYZ интенсивности вектора электрического поля E)

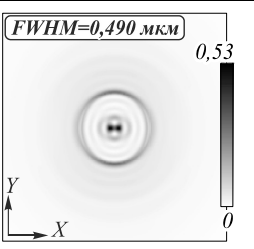
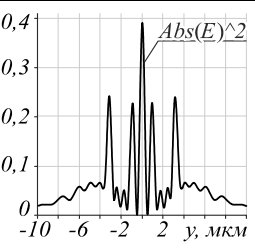
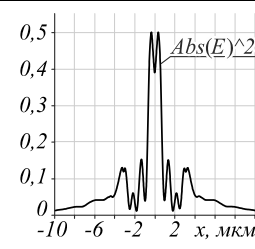
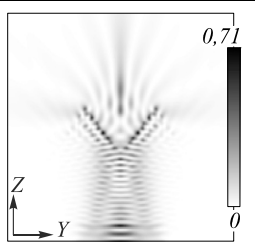
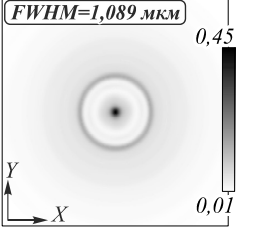
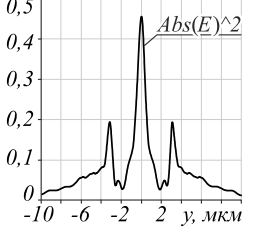
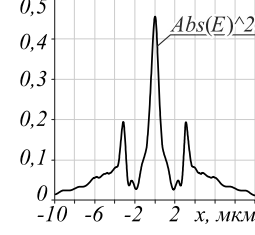
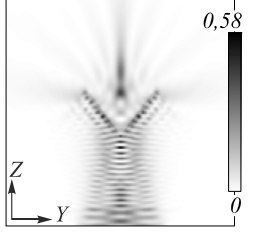
	Проекция OXY, $x = -10 \dots 10$ мкм, $y = -10 \dots 10$ мкм	Проекция OY ($x = 0$ мкм)	Проекция OX ($y = 0$ мкм)	Проекция OYZ, $y = -10 \dots 10$ мкм, $z = 0 \dots 20$ мкм
x-поляризованный Гауссов пучок				
Гауссов пучок с круговой поляризацией				

Табл. 2. Поперечное сечение на расстоянии $z = 11$ мкм компонент вектора электрического поля при освещении элемента x-поляризованным Гауссовым пучком

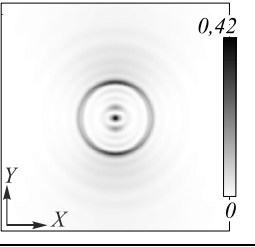
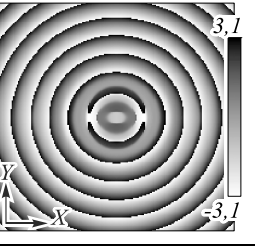
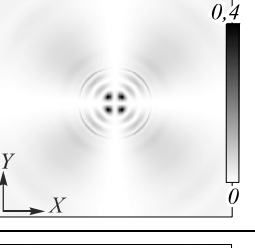
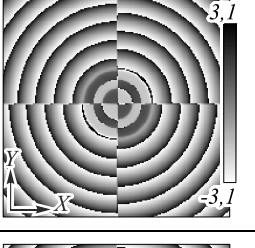
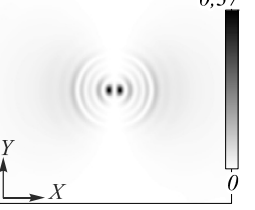
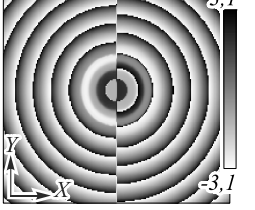
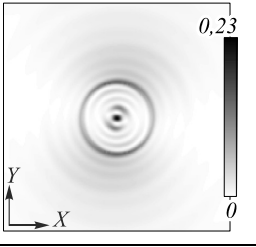
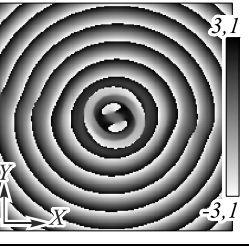
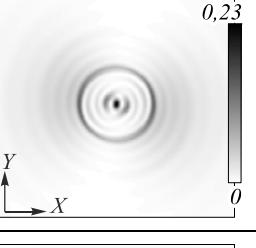
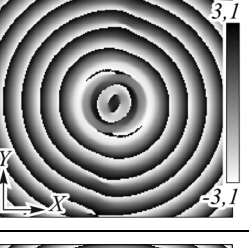
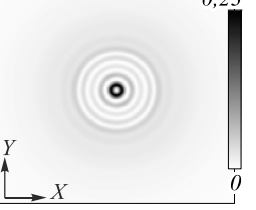
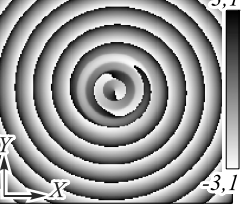
	Интенсивность, $x = -10 \dots 10$ мкм, $y = -10 \dots 10$ мкм	Фаза, $x = -10 \dots 10$ мкм, $y = -10 \dots 10$ мкм
E_x		
E_y		
E_z		

Табл. 3. Поперечное сечение на расстоянии $z = 11$ мкм компонент вектора электрического поля при освещении элемента Гауссовым пучком с круговой поляризацией

	Интенсивность, $x = -10 \dots 10$ мкм, $y = -10 \dots 10$ мкм	Фаза, $x = -10 \dots 10$ мкм, $y = -10 \dots 10$ мкм
E_x		
E_y		
E_z		

В табл. 4 представлены результаты расчёта дифракции в виде поперечного и продольного распре-

деления интенсивности электрического поля E . Видно, что независимо от длины волны $1 \leq \lambda \leq 1,5$ мкм

падающего излучения для фиксированного показателя преломления элемента формируется распределение интенсивности практически с одинаковым радиусом внешнего кольца и размером фокального пятна по FWHM в диапазоне от 0,8 мкм ($\lambda = 1$ мкм) до 1,1 мкм ($\lambda = 1,5$ мкм) сразу после элемента (на расстоянии $z = 11$ мкм). На некотором расстоянии от элемента ($z = 15$ мкм) видно формирование Бесселеподобного распределения ($0,6 \text{ мкм} \leq \text{FWHM} \leq 0,9 \text{ мкм}$) с масштабными вариациями, что вполне согласуется с изменением величины длины волны.

Далее исследовалось влияние показателя преломления элемента на свойства сформированного оптического пучка. В этом случае можно определить устойчивость элемента к хроматизму. Предлагается не менять конфигурацию (геометрию) элемента, а варьировать только длину волны и показатель преломления. Данное исследование необходимо по причине того, что для разных длин волн показатель преломления несколько разный, а оптический элемент при использовании невозможно динамически менять.

Табл. 4. Сравнение действия биконического аксикона (пунктир) с показателем преломления $n = 1,5$ с источником света с различной длиной волны λ и круговой поляризацией (интенсивность и распределение вектора электрического поля E)

λ	1,0 мкм	1,2 мкм	1,3 мкм	1,5 мкм	
Показатель преломления элемента $n = 1,5$					
Поперечное сечение $z = 11$ мкм					
Проекция OXY, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм					
	Поперечное сечение $z = 15$ мкм				
	Проекция OXY, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
		Продольное сечение			
Проекция OYZ, $y = -10 \dots 10$ мкм $z = 0 \dots 20$ мкм					

Далее будем варьировать не только длину волны источника света λ в диапазоне от 1,0 мкм до 1,5 мкм, но и показатель преломления элемента n в диапазоне от 1,5 до 1,7. Результаты моделирования представлены в табл. 5.

Заключение

В данной работе методом FDTD исследованы поляризационные преобразования, осуществляемые биконическим аксиконом. Показано преобразование пучка света с круговой поляризацией в азимутально поляризованный пучок при использовании одного

рефракционного элемента с двумя коническими поверхностями. Распределение интенсивности в полученном пучке представляет собой многокольцевую структуру с центральным пиком, напоминающую распределение пучка Бесселя.

Для определения дисперсионных свойств биконического аксикона промоделировано воздействие аксикона на прошедший пучок при изменении показателя преломления материала аксикона в диапазоне от 1,5 до 1,7 и изменении рабочей длины волны λ в диапазоне от 1,0 до 1,5 мкм.

Табл. 5. Сравнение действия биконического аксикона с источником света с длиной волны λ и круговой поляризацией

λ	1,0 мкм	1,2 мкм	1,3 мкм	1,5 мкм
Показатель преломления элемента $n=1,6$				
Проекция OXZ $z = 11$ мкм, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
Проекция OXY $z = 15$ мкм, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
Проекция OYZ, продольное сечение, $y = -10 \dots 10$ мкм $z = 0 \dots 20$ мкм				
Показатель преломления элемента $n=1,7$				
Проекция OXZ $z = 11$ мкм, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
Проекция OXY $z = 15$ мкм, $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
Проекция OYZ, продольное сечение, $y = -10 \dots 10$ мкм $z = 0 \dots 20$ мкм				

Показано, что показатель преломления материала, из которого изготовлен элемент, и длина волны падающего излучения слабо влияют на поляризацион-

ные свойства сформированного пучка. Однако чем меньше показатель преломления (граница снизу – 1,5) и меньше длина волны падающего излучения (граница

ца снизу 1 мкм), тем выше энергетическая эффективность элемента. Отметим, что согласно формуле (1) угол Брюстера изменяется примерно на 3 градуса (5%) при вариации показателя преломления от 1,5 до 1,7, что объясняет толерантность работы элемента к дисперсии показателя преломления.

Учитывая широкий диапазон использования различных типов аксионов, предложенный элемент может применяться для кодирования оптической информации, улучшения разрешения в микроскопии, расширения возможностей оптического захвата и манипулирования, а также получения новых эффектов в обработке поверхности и взаимодействии с веществом.

В дальнейшем авторы работы планируют провести исследование трехконического аксиона, дающего распределение интенсивности в форме круга, а не кольца.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Опубликовано за счет средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

References

- [1] Goldstein DH. Polarized light. Boca Raton, FL: CRC Press; 2003.
- [2] Freund I. Polarization flowers. *Opt Commun* 2001; 199: 47-63. DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01533-4.
- [3] Maurer C, Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, Ritsch-Marte M. Tailoring of arbitrary optical vector beams. *New J Phys* 2007; 9: 78. DOI: 10.1088/1367-2630/9/3/078.
- [4] Wang XL, Li Y, Chen J, Guo CS, Ding J, Wang HT. A new type of vector fields with hybrid states of polarization. *Opt Express* 2010; 18: 10786-10795. DOI: 10.1364/OE.18.010786.
- [5] Khonina SN, Karpeev SV. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams. *Appl Opt* 2010; 49(10): 1734-1738. DOI: 10.1364/AO.49.001734.
- [6] Zhu W, She W. Generation of tunable three-dimensional polarization in 4Pi focusing system. *Opt Express* 2013; 21: 17265-17274. DOI: 10.1364/OE.21.017265.
- [7] Rong ZY, Han YJ, Wang SZ, Guo CS. Generation of arbitrary vector beams with cascaded liquid crystal spatial light modulators. *Opt Express* 2014; 22: 1636-1644. DOI: 10.1364/OE.22.001636.
- [8] Liu Z, Liu Y, Ke Y, Liu Y, Shu W, Luo H, Wen S. Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere. *Photon Res* 2017; 5: 15-21. DOI: 10.1364/PRJ.5.000015.
- [9] Bauer T, Banzer P, Bouchard F, Orlov S, Marrucci L, Karimi E, Leuchs G. Multi-twist polarization ribbon topologies in highly-confined optical fields. *New J Phys* 2019; 21: 053020. DOI: 10.1088/1367-2630/ab171b.
- [10] Khonina SN, Ustinov AV, Porfirev AP. Vector Lissajous laser beams. *Opt Lett* 2020; 45(15): 4112-4115. DOI: 10.1364/OL.398209.
- [11] Zhong RY, Zhu ZH, Wu HJ, Rosales-Guzmán C, Song SW, Shi BS. Gouy phase-mediated propagation variations and revivals of transverse structure in vectorially structured light. *Phys Rev A* 2021; 103: 053520. DOI: 10.1103/PhysRevA.103.053520.
- [12] Khonina SN, Porfirev AP. Harnessing of inhomogeneously polarized Hermite–Gaussian vector beams to manage the 3D spin angular momentum density distribution. *Nanophotonics* 2022; 11(4): 697-712. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0418.
- [13] Milione G, Nguyen TA, Leach J, Nolan DA, Alfano RR. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication. *Opt Lett* 2015; 40: 4887-4890. DOI: 10.1364/OL.40.004887.
- [14] Akent'ev AS, Sadovnikov MA, Sokolov AL, Simonov GV. Polarization analysis of the beam-steering device of quantum optical systems. *Opt Spectrosc* 2017; 122: 1008-1014. DOI: 10.1134/S0030400X17060029.
- [15] Ndagano B, Nape I, Cox MA, Rosales-Guzman C, Forbes A. Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication. *J Lightwave Technol* 2018; 36: 292-301. DOI: 10.1109/JLT.2017.2766760.
- [16] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Ivliev NA, Ganchevskaya SV. Free-space transmission and detection of variously polarized near-IR beams using standard communication systems with embedded singular phase structures. *Sensors* 2022; 22(3): 890-907. DOI: 10.3390/s22030890.
- [17] Oron D, Tal E, Silberberg Y. Depth-resolved multiphoton polarization microscopy by third-harmonic generation. *Opt Lett* 2003; 28: 2315-2317. DOI: 10.1364/OL.28.002315.
- [18] Serrels K, Ramsay E, Warburton R, Reid D. Nanoscale optical microscopy in the vectorial focusing regime. *Nat Photonics* 2008; 2: 311-314. DOI: 10.1038/nphoton.2008.29.
- [19] Kenny F, Lara D, Rodríguez-Herrera O, Dainty C. Complete polarization and phase control for focus-shaping in high-NA microscopy. *Opt Express* 2012; 20: 14015-14029. DOI: 10.1364/OE.20.014015.
- [20] Skelton S, Sergides M, Saija R, Iati M, Marago O, Jones P. Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams. *Opt Lett* 2013; 38: 28-30. DOI: 10.1364/OL.38.000028.
- [21] Otte E, Denz C. Optical trapping gets structure: Structured light for advanced optical manipulation. *Appl Phys Rev* 2020; 7: 041308. DOI: 10.1063/5.0013276.
- [22] Yang Y, Ren Y, Chen M, Arita Y, Rosales-Guzmán C. Optical trapping with structured light: A review. *Adv Photonics* 2021; 3: 034001. DOI: 10.1117/1.AP.3.3.034001.
- [23] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, Hasman E. Observation of the spin-based plasmonic effect in nanoscale structures. *Phys Rev Lett* 2008; 101: 043903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.043903.
- [24] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky PG, Gertus T. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass. *Appl Phys Lett* 2011; 98: 201101. DOI: 10.1063/1.3590716.
- [25] Miller T, Schumann C, Kraegeloh A. STED Microscopy and its applications: New insights into cellular processes on the nanoscale. *Chemphyschem* 2012; 13: 1986-2000. DOI: 10.1002/cphc.201100986.
- [26] Khonina SN, Golub I. How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(10): 2242-2246. DOI: 10.1364/JOSAA.29.002242.
- [27] Varin C, Payeur S, Marceau V, et al. Direct electron acceleration with radially polarized laser beams. *Appl Sci* 2013; 3: 70-93. DOI: 10.3390/app3010070.
- [28] Ni J, Wang C, Zhang C, Hu Y, Yang L, Lao Z, Chu J. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by

- structured optical vortices in isotropic material. *Light Sci Appl* 2017; 6: e17011. DOI: 10.1038/lsa.2017.11.
- [29] Syubaev SA, Zhizhchenko AY, Pavlov DV, Gurbatov SO, Pustovalov EV, Porfirev AP, Khonina SN, Kulnich SA, Rayappan JBB, Kudryashov SI, Kuchmizhak AA. Plasmonic nanolenses produced by cylindrical vector beam printing for sensing applications. *Sci Rep* 2019; 9: 19750. DOI: 10.1038/s41598-019-56077-8.
- [30] Porfirev A, Khonina S, Meshalkin A, Ivliev N, Achimova E, Abashkin V, Prisacar A, Podlipnov V. Two-step maskless fabrication of compound fork-shaped gratings in nanomultilayer structures based on chalcogenide glasses. *Opt Lett* 2021; 46(13): 3037-3040. DOI: 10.1364/OL.427335.
- [31] Masuda K, Nakano S, Barada D, Kumakura M, Miyamoto K, Omatsu T. Azo-polymer film twisted to form a helical surface relief by illumination with a circularly polarized Gaussian beam. *Opt Express* 2017; 25: 12499-12507. DOI: 10.1364/OE.25.012499.
- [32] Khonina SN, Ustinov AV, Volotovskiy SG, Ivliev NA, Podlipnov VV. Influence of optical forces induced by paraxial vortex Gaussian beams on the formation of a micro-relief on carbazole-containing azopolymer films. *Appl Opt* 2020; 59(29): 9185-9194. DOI: 10.1364/AO.398620.
- [33] Kharintsev SS, Fishman AI, Kazarian SG, Salakhov MK. Polarization of near-field light induced with a plasmonic nanoantenna. *Phys Rev B* 2015; 92: 115113. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.115113.
- [34] Masuda K, Shinozaki R, Shiraishi A, Ichijo M, Yamane K, Miyamoto K, Omatsu T. Picosecond optical vortex-induced chiral surface relief in an azo-polymer film. *J Nanophoton* 2020; 14: 016012. DOI: 10.1117/1.JNP.14.016012.
- [35] Ferrer-Garcia MF, Alvandi Y, Zhang Y, Karimi E. Theoretical analysis on spatially structured beam induced mass transport in azo-polymer films. *Opt Express* 2020; 28: 19954-19965. DOI: 10.1364/OE.395054.
- [36] Tidwell SC, Ford DH, Kimura WD. Generating radially polarized beams interferometrically. *Appl Opt* 1990; 29: 2234-2239. DOI: 10.1364/AO.29.002234.
- [37] Passilly N, de Saint DR, Ait-Ameur K, Treussart F, Hierle R, Roch JF. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam. *J Opt Soc Am A* 2005; 22: 984-991. DOI: 10.1364/JOSAA.22.000984.
- [38] Liu S, Li P, Peng T, Zhao J. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer. *Opt Express* 2012; 20: 21715-21721. DOI: 10.1364/OE.20.021715.
- [39] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [40] Sokolov AL, Murashkin VV. Diffraction polarization optical elements with radial symmetry. *Opt Spectrosc* 2011; 111: 859-865. DOI: 10.1134/S0030400X11130212.
- [41] Porfirev AP, Ustinov AV, Khonina SN. Polarization conversion when focusing cylindrically polarized vortex beams. *Sci Rep* 2016; 6: 6. DOI: 10.1038/s41598-016-0015-2.
- [42] Moreno I, Davis JA, Hernandez TM, Cottrell DM, Sand D. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator. *Opt Express* 2012; 20: 364-376. DOI: 10.1364/OE.20.000364.
- [43] Karpeev SV, Podlipnov VV, Aljubili AM. An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator. *Computer Optics* 2020; 44(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.
- [44] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27: 285-287. DOI: 10.1364/OL.27.000285.
- [45] Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Opt Lett* 2008; 33: 2782-2784. DOI: 10.1364/OL.33.002782.
- [46] Rubin NA, Zaidi A, Juhl M, Li RP, Devlin RC, Leosson K, Capasso F. Polarization state generation and measurement with a single metasurface. *Opt Express* 2018; 26: 21455-21478. DOI: 10.1364/OE.26.021455.
- [47] Khonina SN, Degtyarev SA, Ustinov AV, Porfirev AP. Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density. *Opt Express* 2021; 29(12): 18651-18662. DOI: 10.1364/OE.428453.
- [48] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S, Davidson N. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes. *Appl Opt* 2007; 46: 3304-3310. DOI: 10.1364/AO.46.003304.
- [49] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Parani VD, Tukmakov KN. Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams. *Opt Eng* 2019; 58(8): 082402. DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
- [50] Loussert C, Brasselet E. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media. *Opt Lett* 2010; 35: 7-9. DOI: 10.1364/OL.35.000007.
- [51] Fadeyeva TA, Shvedov VG, Izdebskaya YV, Volyar AV, Kivshar YS. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals. *Opt Express* 2010; 18: 10848-10863. DOI: 10.1364/OE.18.010848.
- [52] Khonina SN, Karpeev SV, Parani VD, Morozov AA. Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals. *Phys Lett A* 2017; 381(30): 2444-2455. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
- [53] Khonina SN, Porfirev AP, Kazanskiy NL. Variable transformation of singular cylindrical vector beams using anisotropic crystals. *Sci Rep* 2020; 10: 5590. DOI: 10.1038/s41598-020-62546-2.
- [54] Tovar AA. Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre-Gaussian laser beams. *J Opt Soc Am A* 1998; 15: 2705-2711. DOI: 10.1364/JOSAA.15.002705.
- [55] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt Lett* 2005; 30: 3063-3065. DOI: 10.1364/OL.30.003063.
- [56] Radwell N, Hawley RD, Gotte JB, Franke-Arnold S. Achromatic vector vortex beams from a glass cone. *Nat Commun* 2016; 7: 10654. DOI: 10.1038/ncomms10564.
- [57] Khonina S, Degtyarev S, Savelyev D, Ustinov A. Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles. *Opt Express* 2017; 25(16): 19052-19064. DOI: 10.1364/OE.25.019052.
- [58] Savelyev DA, Degtyarev SA. Investigation of vortex evanescent fields in the near zone of fiber taper and subwavelength diffractive axicon. *Proc SPIE* 2018; 10774: 107740J. DOI: 10.1117/12.2318740.
- [59] Savelyev DA. Diffraction of the Gaussian beam on layered lens and similar a conical and diffraction axicons. *CEUR Workshop Proc* 2016; 1638: 117-124. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-117-124.
- [60] Zhang Y, Zeng A, Wang Y, Huang HA. method for measuring the base angle of axicon lens based on chromatic dispersion. *Opt Commun* 2015; 346: 69-73. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.02.021.
- [61] Wei Z, Yuan Q, Ma X, Hu J, Zeng A, Huang H. Measurement of base angle of an axicon lens based on autocollima-

- tion optical path. Opt Commun 2019; 434: 23-27. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.10.034.
- [62] Skidanov RV, Morozov AA. Diffractive optical elements for forming radially polarized light, based on the use stack of Stoletov. Computer Optics 2014; 38(4): 614-618. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-614-619.
- [63] Karpeev SV, Parinin VD, Khonina SN. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer. J Opt 2017; 19: 055701. DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
- [64] Degtyarev SA, Karpeev SV, Ivliev NA, Podlipnov VV, Khonina SN. Refractive bi-conic axicon (volcone) for polarization conversion of monochromatic radiation. Photonics 2022; 9(6): 421. DOI: 10.3390/photonics9060421.
- [65] Gubaev MS, Saveliev DA, Strelkov YS, Degtyarev SA. Polarization transformation with refractive axicon. 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2021; 867-876. DOI: 10.1109/PIERS53385.2021.9694866.
- [66] Gubaev MS, Degtyarev SA, Strelkov YS, Volotovskiy SG, Ivliev NA, Khonina SN. Vectorial beam generation with a conical refractive surface. Computer Optics 2021; 45(6): 828-838. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1036.
- [67] Khonina SN, Tukmakov KN, Degtyarev SA, Reshetnikov AS, Pavelyev VS, Choporova YY. Design, fabrication and investigation of a subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming. Computer Optics 2019; 43(5): 756-764. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-756-764.
- [68] Pavelyev VS, Degtyarev SA, Tukmakov KN, Knyazev BA, Choporova YY. Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation. J Phys: Conf Ser 2021; 1745(1): 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012022.
- [69] Khonina SN. Vortex beams with high-order cylindrical polarization: Features of focal distributions. Appl Phys B 2019; 125: 100. DOI:10.1007/s00340-019-7212-1
- [70] Kharitonov SI, Khonina SN. Conversion of a conical wave with circular polarization into a vortex cylindrically polarized beam in a metal waveguide. Computer Optics 2018; 42(2): 197-211. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-197-211.
- [71] Helseth LE. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens system. Opt Commun 2001; 191: 161-172. DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01150-6.
- [72] Khonina SN, Golub I. Optimization of focusing of linearly polarized light. Opt Lett 2011; 36(3): 352-354. DOI: 10.1364/OL.36.000352.

Сведения об авторах

Хорин Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Самарского университета; ст. исследователь ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: математическое моделирование, дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: paul.95.de@gmail.com / khonin.pa@ssau.ru.

Алгубили Абрар Мохаммед Кхухур, аспирант Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования пучков, векторные пучки. E-mail: abrar.algubili78@gmail.com.

Дегтярев Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент Самарского университета, научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. E-mail: sealek@gmail.com.

Сергунин Станислав Константинович, магистр Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, лазеры сверхкоротких импульсов. E-mail: stas.serg.99@mail.ru.

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; ведущий научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@ipsiras.ru.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 17 октября 2022 г. Окончательный вариант – 8 января 2023 г.

Investigation of polarization transformations performed with a refractive bi-conical axicon using the FDTD method

P.A. Khorin ^{1,2}, Algubili A.M. ^{1,3}, S.A. Degtyarev ^{1,2}, S.K. Sergunin ¹, S.V. Karpeev ^{1,2}, S.N. Khonina ^{1,2}

¹ Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151;

³ University of Kufa, 540011, Kufa, Iraq, P.O Box 21

Abstract

We investigate polarization transformations carried out with a refractive bi-conical axicon using the FDTD method. The approach is based on the transformation of a circularly polarized optical beam into an azimuthally polarized beam due to the use of a single refractive element with two conical surfaces. On the inner surface of the element, polarization conversion occurs due to the reflection and refraction of rays at the Brewster angle, while the outer surface operates as a converted beam collimator. The distributions of the components of the electric field vector and the polarization vector at different distances from the optical element are considered as criteria for a successful polarization transformation. By numerical simulation of the performance of a bi-conical axicon made of glass with a refractive index of $n = 1.4958$, the efficiency of the proposed approach for a circularly polarized Gaussian beam with a wavelength of $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ is shown. The proposed element is shown to be immune to chromatic aberrations in a significant range of changes in the refractive index of the element material and incident wavelengths ($1.5 \leq n \leq 1.7$; $1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.5 \mu\text{m}$).

Keywords: bi-conical axicon, polarization transformations, FDTD method, chromatic stability.

Citation: Khorin PA, Algubili AM, Degtyarev SA, Sergunin SK, Karpeev SV, Khonina SN. Investigation of polarization transformations performed with a refractive bi-conical axicon using the FDTD method. *Computer Optics* 2023; 47(5): 742-750. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1326.

Acknowledgements: This work was funded within the State assignment of Federal Scientific Research Center "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences.

Authors' information

Pavel Alekseevich Khorin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Senior researcher in the research laboratory of automated systems for scientific research “NIL-35” of Samara National Research University; research assistant of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: mathematical modeling, diffractive optics, optical and digital image processing. E-mail: paul.95.de@gmail.com, khorin.pa@ssau.ru.

Abrar Mohammed Khudhur Algubili, graduate student of Samara National Research University. Research interests: diffraction optics, singular optics, mode and polarization transformations laser beams, vector beams. E-mail: abrar.algubili78@gmail.com.

Sergey Alexandrovich Degtyarev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Docent of Samara National Research University; research fellow of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: wave optics. E-mail: sealek@gmail.com.

Stanislav Konstantinovich Sergunin, master of Samara National Research University. Research interests: diffraction optics, singular optics, ultrashort pulse. E-mail: stas.serg.99@mail.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Leading researcher of the IPSI 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@ipsiras.ru.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI 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: khonina@ipsiras.ru.

Received October 17, 2022. The final version – January 8, 2023.
