



Исследование возможности применения рефракционного биконического аксикона для распознавания азимутальной и радиальной поляризации

П. А. Хорин^{1,2}, С. А. Дегтярев^{1,2}, С. Н. Хонина^{1,2}

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

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Самара, Россия

В работе изложены результаты исследований действия биконического аксикона, рефракционного оптического элемента с двумя коническими поверхностями, на освещение излучением различного состояния поляризации, в том числе неоднородным (с азимутальной и радиальной поляризацией). Биконический аксикон ранее был предложен для преобразования пучка с круговой поляризацией в азимутально поляризованный пучок за счет отражения и преломления лучей под углом Брюстера на одной конической поверхности с последующей коллимацией пучка за счет второй конической поверхности. Поляризационные преобразования, осуществляемые при дифракции на биконическом аксиконе пучков с различной поляризацией, рассчитаны с использованием метода конечных разностей во временной области. На основе численного моделирования показано, что биконический аксикон, выполненный из стекла K14 (показатель

Application Study of a Refractive Biconical Axicon for Azimuthal and Radial Polarization Detection

P. A. Khorin^{1,2}, S. A. Degtyarev^{1,2}, S. N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute Russian Academy of Sciences – branch of the Federal Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The paper presents the study results of the effect of a biconical axicon, a refractive optical element with two conical surfaces, on illumination by radiation of various polarization states, including inhomogeneous one (with azimuthal and radial polarization). The biconical axicon was previously proposed for converting a beam with circular polarization into a azimuthal polarized beam due to the beam reflection and refraction at the Brewster angle on one conical surface, followed by the beam collimation due to the second conical surface. The polarization transformations performed during diffraction of beams with various polarizations by a biconical axicon are calculated using the finite difference method in the time domain. Based on the numerical simulations, it is shown that the biconical axicon made of K14 glass (with the refractive index $n = 1.4958$) can be used as a detector for azimuthal and radially polarized beams based on the intensity pattern in one plane.

Keywords: biconical axicon, polarization transformations, FDTD method

Article received: July 05, 2023
Article accepted: August 16, 2023



преломления $n = 1,4958$), может быть использован в качестве детектора для распознавания азимутально и радиально поляризованного пучков на основе картины интенсивности в одной плоскости.

Ключевые слова: биконический аксикон, поляризационные преобразования, FDTD-метод

Статья получена: 05.07.2023

Статья принята: 16.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

В современной оптике распознавание поляризации оптических пучков является одной из важнейших задач [1] и имеет множество практических применений. Например, детектирование поляризации может быть использовано для улучшения производительности оптических систем передачи данных [2–5], для создания новых методов обработки информации [6, 7] и оптической диагностики [8–9], а также структурирования поверхностей материалов [10, 11].

Для распознавания поляризации оптических пучков существует множество методов, среди которых подходы, основанные на интерференционных методах [12–14], использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [15–17], пространственных модуляторов света (ПМС) [18–20], субволновых решеток, метаповерхностей, анизотропных кристаллов и пленок [21–26]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Применение ПМС ограничивается тем, что они преобразуют только часть света, что может привести к уменьшению поляризационного контраста. Субволновые решетки изменяют поляризационный контраст в зависимости от угла поворота плоскости поляризации, и для компенсации этого эффекта требуется использование комбинации поляризационных и фокусирующих элементов [26]. Отметим также, что изготовление субволновых решеток для видимого диапазона длин волн является сложным процессом. При использовании многопорядковых ДОЭ необходимым фактором распознавания поляризации оптических пучков является компьютерная обработка корреляционных картин [27].

Еще одним методом формирования неоднородно поляризованных пучков является использование специальных структур [28], а также дифракционных оптических элементов, например с использованием преломляющих или отража-

INTRODUCTION

In the field of modern optics, polarization recognition detection of the optical beams is one of the most important issues [1] that has many practical applications. For example, polarization detection can be used to improve the performance of optical data transmission systems [2–5], to develop new methods of data processing [6, 7] and optical diagnostics [8–9], as well as to structure the material surfaces [10, 11].

There are a lot of methods for recognizing the optical beam polarization, including various approaches based on the interference methods [12–14], application of diffractive optical elements (DOE) [15–17], spatial light modulators (SLMs) [18–20], subwavelength gratings, metasurfaces, anisotropic crystals and films [21–26]. Each of these methods has its own advantages and disadvantages. The use of SLMs is limited by the fact that they convert only part of the light that can lead to a decrease in the polarization contrast. The subwavelength gratings change the polarization contrast depending on the rotation angle of the polarization plane. To compensate for this effect, a combination of polarization and focusing elements is required [26]. It shall also be noted that the production of subwavelength gratings for the visible wavelength range is a comprehensive process. When using the multichannel DOEs, a necessary factor for recognizing the optical beam polarization is the computer processing of correlation patterns [27].

Another method for the generation of heterogeneously polarized beams is the application of special structures [28], as well as the refractive optical elements, for example, with the refracting or reflecting axicons that convert the radiation polarization when light is incident at the Brewster angle [29–34].

In this work, we consider the possible application of a refractive biaxicon [34] for detecting the azimuthal and radially polarized optical beams. A refractive biaxicon is an optical element that has two working conical surfaces (polarization is converted on the inner surface of the element due to the beam reflection and refraction at the Brewster angle, and the outer surface provides collimation of the converted beam) and is used to convert an optical beam with circular polarization to the azimuthal polarized beam.

We use the FDTD method in our paper to calculate the diffraction on an optical element, then we analyze the obtained data in the form of intensity patterns to recognize the type of polarization. In

ющих аксиконов, которые преобразуют поляризацию излучения при падении света под углом Брюстера [29–34].

В данной работе мы рассмотрим возможности применения рефракционного биконического аксикона [34] для распознавания азимутально и радиально поляризованных оптических пучков. Рефракционный биконический аксикон – это оптический элемент, который имеет две рабочие конические поверхности (на внутренней поверхности элемента происходит преобразование поляризации за счет отражения и преломления лучей под углом Брюстера, а внешняя поверхность обеспечивает коллимацию преобразованного пучка) и используется для преобразование оптического пучка с круговой поляризацией в азимутально поляризованный пучок.

В нашей работе мы используем метод FDTD для расчета дифракции на оптическом элементе, затем проводим анализ полученных данных в виде картин интенсивности для распознавания типа поляризации. В предыдущих работах [33, 34] были исследованы поляризационные преобразования, происходящие на конических поверхностях, приближенно с использованием геометрической оптики. Однако данные исследования были ограничены дальней зоной дифракции. Важно отметить, что в современных применениях микро-элементов, в том числе микроаксиконов [35–37], акцент сделан на ближней зоне дифракции. Поэтому возникает необходимость изучения разработанного элемента в электромагнитном приближении, чтобы не только уточнить результаты геометрикооптических расчетов, но также исследовать поляризационные преобразования и возможность детектирования поляризационного состояния в ближней области дифракции.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В работе [34] 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). Проекции и 3D-форма биконического аксикона с указанием физических размеров представлены на рис. 1.

Предполагается, что коллимированный пучок с круговой поляризацией падает снизу вверх на внутреннюю коническую поверхность,

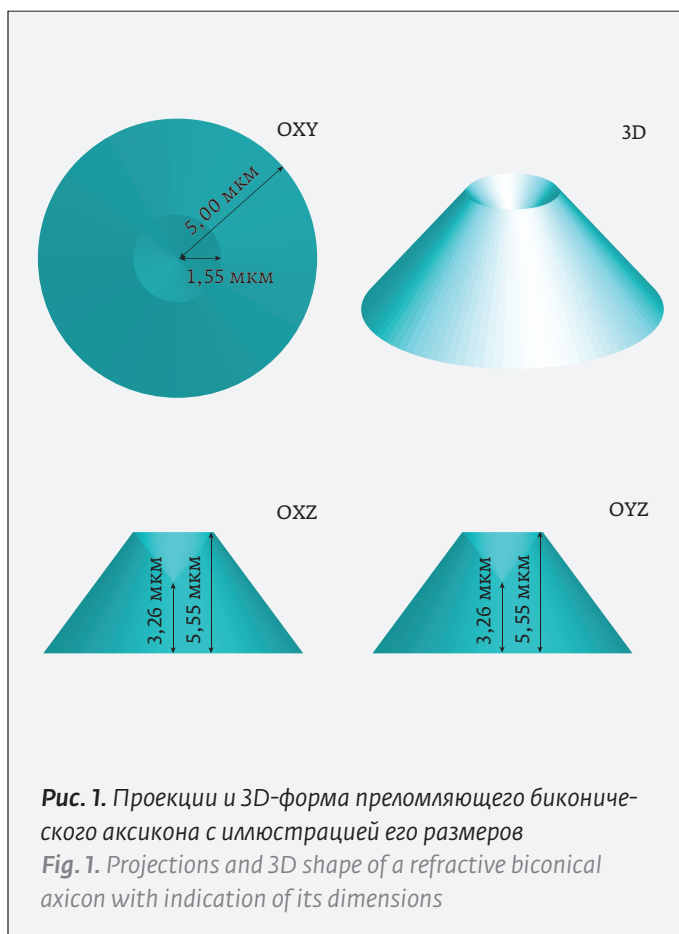


Рис. 1. Проекции и 3D-форма преломляющего биконического аксикона с иллюстрацией его размеров

Fig. 1. Projections and 3D shape of a refractive biconical axicon with indication of its dimensions

previous papers [33, 34], the polarization transformations occurring on the conical surfaces were studied in an approximate way using the geometric optics. However, these studies were limited to the far diffraction field. It is important to note that in the up-to-date applications of microelements, including microaxicons [35–37], the emphasis is on the near diffraction field. Therefore, it becomes necessary to study the developed element in the electromagnetic approximation in order not only to clarify the results of geometric and optical calculations, but also to study the polarization transformations and possible detection of the polarization state in the near diffraction field.

1. THEORETICAL BACKGROUND

In [34], a refractive biconical axicon was proposed for generation of an azimuthal polarized vortex beam from a beam with circular polarization. The element is made by two conical surfaces in such a way that it forms a rotation figure resembling a volcano (Fig. 1). The projections and 3D-shape of the biconical axicon with its physical dimensions are shown in Fig. 1.



соответствующую углу Брюстера. Преломленная часть пучка имеет азимутальную поляризацию. Вторая коническая поверхность отражает созданный пучок далее наружу так, чтобы он был коллимированным. Подробный вывод основных формул, описывающих форму оптического элемента с показателем преломления материала $n=1,4958$, представлен в работах [33, 34].

Тип поляризации светового пучка зависит от компонент вектора электрического и магнитного поля. Рассмотрим несколько наиболее известных видов поляризации светового источника. Пусть на преломляющий биконический аксикон падает Гауссов пучок с круговой поляризацией. Вектор Джонса падающего луча будет иметь вид:

$$E_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При падении исходного луча на «жерло» биконического аксикона происходит отражение полностью s-поляризованного луча. Таким образом, элемент работает как поляроид, пропускающий поляризацию вдоль полярного орта φ .

Матрица Джонса линейного поляроида имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Подействуем матрицей (2) на вектор (1):

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) - i\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) + i\cos^2(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi) \\ -\cos(\varphi) \end{bmatrix} \exp\left(i\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right). \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что выходной пучок имеет азимутальную поляризацию с вихревой фазой первого порядка.

Рассмотрим случай, когда падающий луч имеет **радиальную** поляризацию, тогда вектор Джонса будет иметь следующий вид:

$$E_0 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

It is assumed that a collimated circularly polarized beam is incident from bottom to top on the inner conical surface relevant to the Brewster angle. The refracted part of the beam has azimuthal polarization. The second conical surface reflects the developed beam further outward so that it is collimated. The detailed results of the basic formulas describing an optical element shape with a refractive index of the material $n=1,4958$ is given in [33, 34].

The type of light beam polarization depends on the components of the electric and magnetic field vectors. Let us consider several well-known types of a light source polarization. Let a Gaussian beam with circular polarization fall on a refracting biconical axicon. The Jones vector of the incident beam shall be as follows:

$$E_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

When the initial beam is incident on the “crater” of the biconical axicon, a completely s-polarized beam is reflected. Thus, the element is operated as a polaroid filter that transmits polarization along the polar vector φ .

The Jones matrix of a linear polaroid filter shall be as follows:

$$M = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Let's use the matrix (2) to influence the vector (1):

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) - i\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) + i\cos^2(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi) \\ -\cos(\varphi) \end{bmatrix} \exp\left(i\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right). \quad (3)$$

It can be seen from the formula (3) that the output beam has azimuthal polarization with a first-order vortex phase.

We will consider the case when the incident beam has **radial** polarization, then the Jones vector shall have the following form:

$$E_0 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Подействуем матрицей (2) на вектор (4):

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi)\cos(\varphi) - \sin^2(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos^2(\varphi) + \sin(\varphi)\cos^2(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что рассматриваемый элемент фактически отражает падающий пучок с радиальной поляризацией.

Если же падающий пучок имеет **азимутальную** поляризацию, описываемую вектором Джонса следующего вида:

$$E_0 = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

тогда выходное поле примет следующее поляризационное состояние:

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi)(\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)) \\ \cos(\varphi)(\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что выходной пучок сохраняет азимутальную поляризацию, что говорит об инвариантности биконического аксикона к азимутально поляризованному свету.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе представленной модели биконического аксикона и Гауссова пучка с длиной волны $\lambda=1,5$ мкм, радиусом перетяжки $\sigma=3\lambda$ и разными видами поляризации предлагается провести численный расчет дифракции на основе FDTD-метода. Учитывая проведенный теоретический анализ, предполагается, что биконический аксикон, выполненный из стекла K14 с показателем преломления $n=1,4958$ может быть использован для распознавания азимутально и радиально поляризованного пучков.

2.1. НЕОДНОРОДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Проведем моделирование распространения неоднородно поляризованного пучка (с радиальной и азимутальной поляризацией) в сво-

Let's use the matrix (2) to influence the vector (4):

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi)\cos(\varphi) - \sin^2(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos^2(\varphi) + \sin(\varphi)\cos^2(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

It can be seen from the formula (5) that the element under consideration actually reflects the incident beam with radial polarization.

If the incident beam has **an azimuthal** polarization described by the Jones vector of the following form:

$$E_0 = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

then the output field shall take the following polarization state:

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi)(\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)) \\ \cos(\varphi)(\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

It can be seen from the formula (7) that the output beam retains azimuthal polarization that indicates that the biconical axicon is invariant to the azimuthal polarized light.

2. NUMERICAL SIMULATION

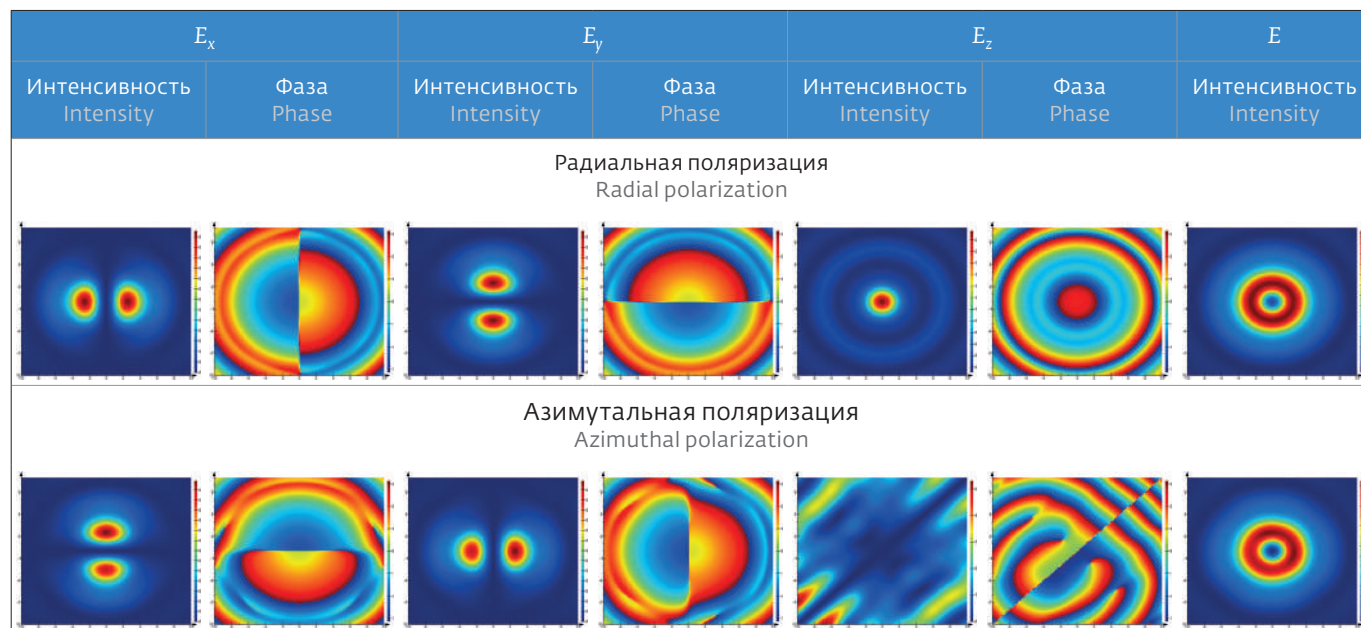
Based on the presented model of a biconical axicon and a Gaussian beam with a wavelength $\lambda=1,5$ a radius of neck $\sigma=3\lambda$ and various polarization types, it is proposed to perform a numerical calculation of diffraction based on the FDTD method. Having considered the theoretical analysis performed, it is assumed that a biconical axicon made of K14 glass with a refractive index $n = 1.4958$ can be used to detect the azimuthal and radially polarized beams.

2.1. INHOMOGENEOUS LIGHT POLARIZATION

Let us simulate the propagation of a heterogeneously polarized beam (with radial and azimuthal polarization) in free space. Table 1 shows a cross

Таблица 1. Поперечное сечение на расстоянии $z=20$ мкм компонент вектора электрического поля при распространении в свободном пространстве радиально и азимутально поляризованного пучка

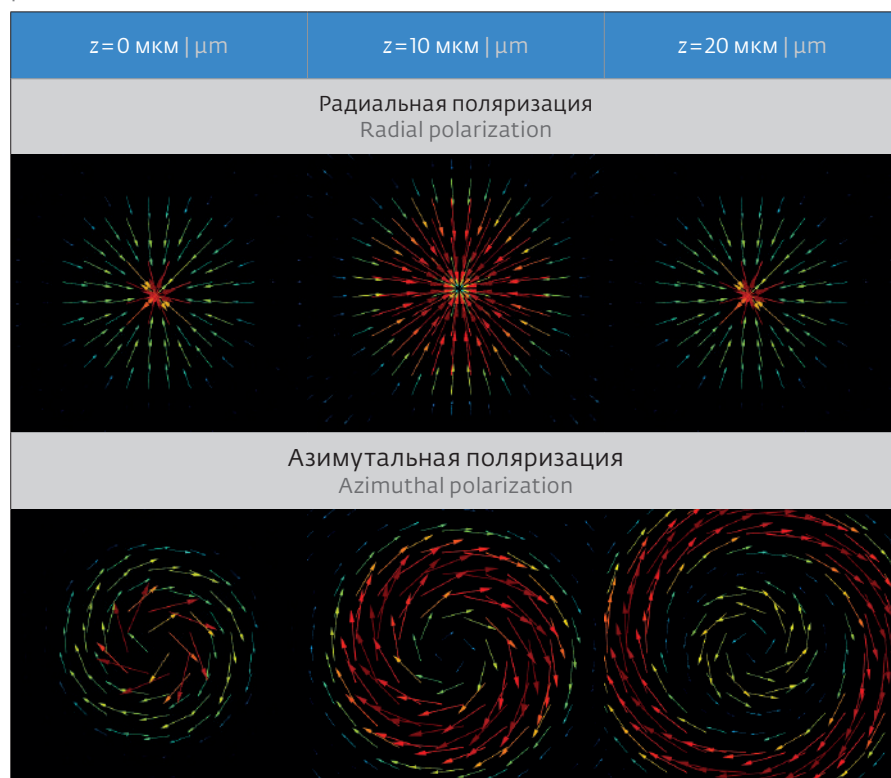
Table 1. Cross section at a distance $z=20$ μm of the electric field vector components during propagation of a radially and azimuthal polarized beam in free space



бодном пространстве. В табл. 1 представлено поперечное сечение интенсивности и фазы компонент вектора электрического поля. Полная интенсивность, которая детектируется в свободном пространстве на расстоянии $z=20$ мкм от входной плоскости, представляет собой кольцевое распределение независимо от типа поляризации (последний столбец табл. 1). Таким образом, нет возможности отличить радиальную поляризацию от азимутальной только по картине интенсивности. Как правило, в этом случае требуются дополнительные поляризационные устройства, например поляризационные анализаторы, выделяющие линейную составляющую под определенным углом. Причем в этом случае требуется дополнительный анализ расположения выделенной части интенсивности [38].

Таблица 2. Распределение вектора Джонса для радиально и азимутально поляризованного пучка

Table 2. Distribution of the Jones vector for a radially and azimuthal polarized beam



На основе данных, полученных в результате расчета дифракции в ближней зоне (расстояние z до 20 мкм), построим график вектора Джонса. В табл. 2 представлено распределением вектора Джонса в плоскости OXY на разных расстояниях для радиально и азимутально поляризованного луча. Из табл. 2 видно, что направление вектора Джонса для разных типов неоднородной поляризации имеет значительное отличие, однако построение такой диаграммы на основе экспериментальных данных требует дополнительных оптических элементов и последующей цифровой обработки [19, 20].

Таким образом, для распознавания типа поляризации требуются дополнительные элементы или устройства, при этом удобнее всего было бы использовать такие устройства, которые работают как датчик: присутствует или отсутствует сигнал (интенсивность) в определенной области детектирования. В качестве такого датчика предлагается использовать биконический аксикон [34].

2.2. ДЕЙСТВИЕ БИКОНИЧЕСКОГО АКСИКОНА

Рассмотрим биконический аксикон как рефракционный оптический элемент для распознавания азимутально и радиально поляризо-

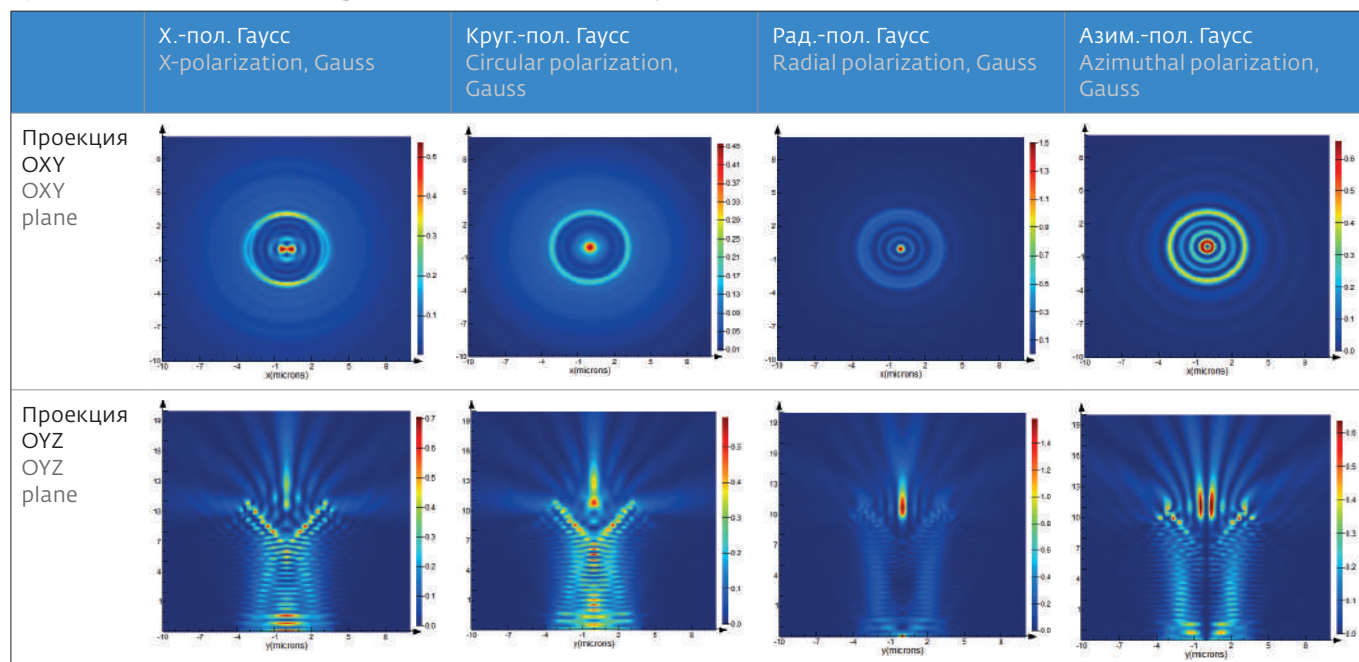
section of the intensity and phase of the electric field vector components. The total intensity that is detected in free space at a distance $z = 20 \mu\text{m}$ from the input plane, is a ring distribution regardless of the polarization type (the last column of Table 1). Thus, there is no opportunity to distinguish radial polarization from azimuthal one only by the intensity pattern. As a rule, in this case, additional polarizing devices are required, for example, the polarizing analyzers that single out the linear component at a certain angle. Moreover, in this case, an additional location analysis of the distinguished part of intensity is required [38].

Based on the data obtained as a result of the diffraction calculation in the near field (distance z up to 20 μm), it is possible to plot the Jones vector. Table 2 shows distribution of the Jones vector in the OXY plane at various distances for a radially and azimuthal polarized beam. It can be seen from Fig. 2 that the Jones vector direction for different types of inhomogeneous polarization has a significant difference. However, plotting of such a diagram based on the experimental data requires additional optical elements and subsequent digital processing [19, 20].

Thus, to recognize the type of polarization, additional elements or devices are required, while it

Таблица 3. Сравнение действия различно-поляризованного источника света (поперечное сечение распределения интенсивности на выходе после биконического аксикона, продольное сечение в проекции OYZ)

Table 3. Comparison of the differently polarized light sources (cross section of the intensity distribution at the output after the biconical axicon, longitudinal section in the OYZ plane)



ванного пучка. Для этого проведем сравнение действия биконического аксикона при падении на него излучения с различными типами поляризации. В табл. 3 представлены результаты расчета дифракции поля на выходе после прохождения оптического элемента. На поперечном распределении интенсивности видно, что полная энергия распределяется по кольцам. Стоит отметить, что при азимутальной поляризации отсутствует центральный пик по сравнению с х-поляризацией, круговой и радиальной, что сразу является признаком для определения данного типа поляризации. Кроме того, отличить радиальную поляризацию от однородной (линейной и круговой) можно по фактическому отсутствию энергии на кольце, радиус которого соответствует «жерлу» биконического аксикона. Что касается уровня интенсивности в центральном пике, то он примерно одинаковый для однородной поляризации и в 3,5 раза больше для радиальной поляризации.

Стоит отметить, что интенсивность в ближней зоне, полученная на основе FDTD-метода согласуется с результатами геометрикооптического подхода и результатами натурального эксперимента [34] с точностью до обратимости хода лучей.

Рассмотрим более подробно действия биконического аксикона на Гауссов пучок с неоднород-

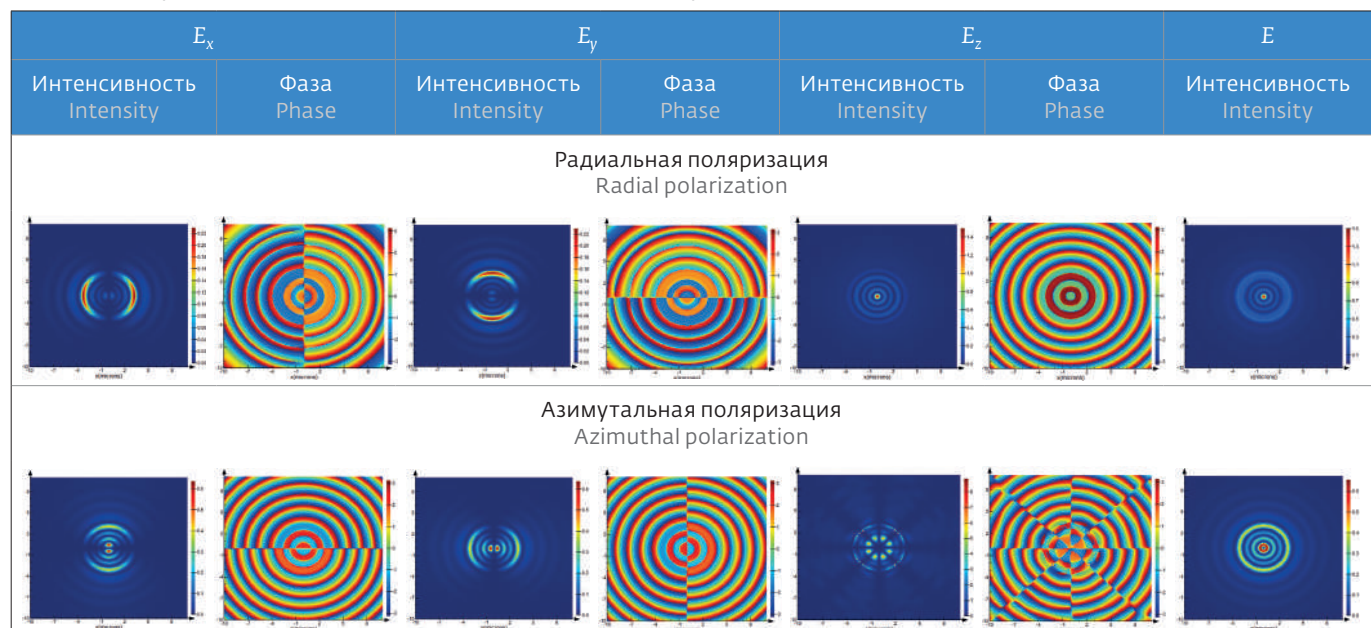
would be most convenient to use such instruments that are applied as a sensor: availability or absence of a signal (intensity) in a certain detection area. It is proposed to use a biconical axicon as such a sensor [34].

2.2. ACTION OF THE BICONICAL AXICON

Let us consider a biconical axicon as a refractive optical element for detection of an azimuthal and radially polarized beam. For this purpose, we will compare the action of a biconical axicon when radiation with various polarization types is incident on it. Table 3 shows the field diffraction calculation results at the output after passing through the optical element. The transverse intensity distribution shows that the total energy is distributed over the rings. It should be noted that in the case of azimuthal polarization there is no central peak compared to the x-polarization, circular and radial ones that is an immediate sign for determining this type of polarization. In addition, it is possible to distinguish radial polarization from homogeneous one (linear and circular) by the actual energy absence on the ring, the radius of which corresponds to the “crater” of the biconical axicon. As for the intensity level in the central peak, it is approximately the same for homogenous polarization, and 3.5 times higher for radial polarization.

Таблица 4. Поперечное сечение на выходе после биконической аксикона компонент вектора электрического поля при освещении элемента Гауссовым пучком с радиальной и азимутальной поляризацией

Table 4. Cross section at the output after the biconical axicon of the electric field vector component when the element is illuminated by the Gaussian beam with radial and azimuthal polarization



ной поляризацией (см. табл. 4). На основе данных о компонентах вектора электрического поля для радиальной поляризации (верхняя строка табл. 4) можно сделать вывод, что вихревая фаза отсутствует во всех компонентах, а распределение интенсивности в x и y компонентах представляет собой незамкнутые кольца, повернутые друг относительно друга на 90 градусов. Интенсивность z -компоненты практически полностью соответствует полной интенсивности и представляет собой ярко выраженный центральный пик.

Что касается азимутальной поляризации, на основе полученных данных (нижняя строка табл. 4) видно, что распределение интенсивности в x и y компонентах также представляет собой незамкнутые кольца с точностью до угла поворота. Сумма интенсивностей в X -компоненте и Y -компоненте соответствует полной интенсивности и представляет собой концентрические кольца. Отметим, что продольная компонента имеет сложную структуру в виде восьми ярких точек, расположенных по кольцу, центральный пик отсутствует.

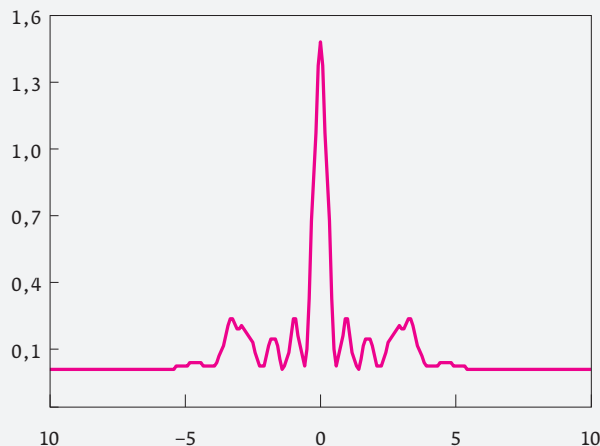
Также стоит отметить, что симметрия распределения поперечных компонент электрического поля в табл. 4 соответствуют аналогичным распределениям в табл. 1, что подтверждают теоретические выкладки о селективном действии биконического аксикона к радиальной и азимутальной поляризации.

Таким образом, в численном моделировании показано, что на основе использования биконического аксикона можно провести распознавание азимутальной и радиальной поляризации пучка только по распределению интенсивности в одной плоскости.

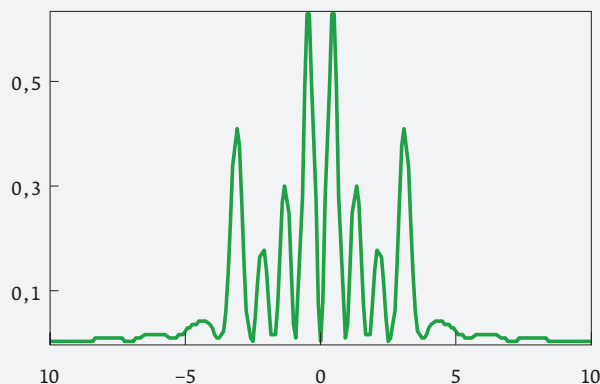
Критерием для радиальной поляризации выступает детектирование яркого корреляционного пика в центре (рис. 2а) и фактически отсутствие интенсивности на кольце, радиус которого соответствует «жерлу» биконического аксикона. Для азимутальной поляризации критерием является отсутствие центрального корреляционного пика (рис. 2б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование действия биконическим аксикона при освещении его излучением с различным состоянием поляризации на основе метода конечных разностей во временной области. Аналитически и численно показано селективное действие рас-



a)



b)

Рис. 2. Поперечное сечение в проекции OX ($y=0$) интенсивности E на выходе после биконического аксикона при освещении элемента Гауссовым пучком: а) с радиальной поляризацией; б) азимутальной поляризацией

Fig. 2. Cross section in the plane OX ($y=0$) of the intensity E at the output after the biconical axicon when the element is illuminated with the Gaussian beam: a) with radial polarization; b) with azimuthal polarization

It should be noted that the intensity in the near field obtained by the FDTD method coordinates with the results of geometric-optical approach and the results of a full-scale experiment [34] up to the reversibility of the beam path.

Let us consider in more detail the influence of a biconical axicon on the Gaussian beam with inhomogeneous polarization (see Table 4). Based on the data on the electric field vector components for radial polarization (top line in Table 4), it can be concluded that the vortex phase is absent in all components, and the intensity distribution in the



смаатриваемого оптического элемента по отношению к двум типам цилиндрической поляризации (радиальной и азимутальной). Показана возможность использования биконического аксикона в качестве поляризационного анализатора, а именно датчика/детектора радиальной и азимутальной поляризации по наличию или отсутствию центрального пика интенсивности. Данный фактор является легко измеряемым и информативным.

Полученные результаты открывают новые возможности для развития технологий, связанных с лазерами и оптикой, а также могут найти применение в различных отраслях науки и техники, таких как медицина, космические исследования, нанотехнологии и другие. Предполагается, что результаты данной работы могут быть использованы для улучшения производительности оптических систем передачи данных, а также для создания новых методов обработки информации и оптического распознавания. В дальнейшем планируется проведение более подробных исследований, направленных на расширение возможностей рефракционного биаксикона и улучшение точности распознавания различных состояний поляризации оптических пучков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках СЧ НИР «Исследования в интересах создания многофункционального аналогового фотонного вычислительного устройства на основе схемы Фурье-коррелятора и динамических пространственных модуляторов света» РФЯЦ-ВНИИЭФ (в обзорной части), за счет средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (в части численного моделирования), а также в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (в теоретической части).

REFERENCES

1. Goldstein D. H. *Polarized Light*. – CRC Press: Boca Raton. FL. USA. 2003.
2. Wang X. L., Li Y., Chen J., Guo C. S., Ding J. Wang H. T. A new type of vector fields with hybrid states of polarization. *Opt. Express*. 2010; 18: 10786–10795.
3. Bauer T., Banzer P., Bouchard F., Orlov S., Marrucci L., Santamato E., Boyd R. W., Karimi E., Leuchs G. Multi-twist polarization ribbon topologies in highly-confined optical fields. *New J. Phys.* 2019; 21: 053020.
4. Milione G., Nguyen, T.A., Leach J., Nolan D. A., Alfano R. R. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication. *Opt. Lett.* 2015; 40: 4887–4890.
5. Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Butt M. A., Karpeev S. V. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review. *Opto-Electronic Advances*. 2022; 5(8): 210127–(25pp). <https://doi.org/10.29026/oea.2022.210127>.
6. Akent'ev A.S., Sadovnikov M. A., Sokolov A. L., Simonov G. V.

x and y components is represented by the open rings rotated by 90 degrees relative to each other. The z-component intensity almost completely corresponds to the total intensity and is a significant central peak.

As for the azimuthal polarization, it can be seen on the basis of the obtained data (bottom line in Table 4) that the intensity distribution in the x and y components also represents the open rings up to the angle of rotation. The sum of intensities in the X-component and the Y-component corresponds to the total intensity and is shown by the concentric rings. It should be noted that the longitudinal component has a comprehensive structure in the form of eight bright dots located along the ring; there is no central peak.

It is also worth noting that the distribution symmetry of the transverse electric field components in Table 4 correspond to the similar distributions in Table 1 while confirming the theoretical assumptions about the selective effect of biconical axicon on radial and azimuthal polarization.

Thus, the numerical simulation shows that, based on the use of a biconical axicon, it is possible to recognize the azimuthal and radial beam polarization only from the intensity distribution in one plane.

The criterion for radial polarization is detection of a bright correlation peak in the center (Fig. 2a) and, in fact, the absence of intensity on the ring, the radius of which corresponds to the “crater” of the biconical axicon. For the azimuthal polarization, the criterion is absence of a central correlation peak (Fig. 2b).

CONCLUSION

In this paper, we study the action of a biconical axicon when it is illuminated by radiation with various polarization states based on the finite difference method in the time domain. The selective action of the considered optical element in relation to two types of cylindrical polarization (radial and azimuthal) is shown on an analytical and numerical level. Possible application of a biconical axicon as a polarization analyzer, namely, a radial and azimuthal polarization sensor/detector by availability or absence of a central intensity peak, is shown. This factor is easily measurable and informative.

The results obtained open up new opportunities for the development of technologies related to the lasers and optics, and can also be used in various branches of science and technology, such as medicine, space research, nanotechnology, etc. It is assumed that the results of this paper can be used



- Polarization analysis of the beam-steering device of quantum optical systems. *Opt. Spectrosc.* 2017; 122:1008–1014.
7. **Ndagano B., Nape I., Cox M. A., Rosales-Guzman C., Forbes A.** Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication. *J. Lightwave Technol.* 2018; 36: 292–301.
 8. **Oron D., Tal E., Silberberg Y.** Depth-resolved multiphoton polarization microscopy by third-harmonic generation. *Opt. Lett.* 2003; 28: 2315–2317.
 9. **Serrels K., Ramsay E., Warburton R., Reid D.** Nanoscale optical microscopy in the vectorial focusing regime. *Nat. Photonics.* 2008; 2:311–314.
 10. **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.
 11. **Porfirev A. P., Khonina S. N., Ivliev N. A., Porfirev D. P.** Laser processing of chalcogenide glasses using laser fields with a spatially varying polarization distribution. *Optics & Laser Technology.* 2023;167:109716. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109716>.
 12. **Passilly N., de Saint D. R., Ait-Ameur K., Treussart F., Hierle R., Roch J.-F.** Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2005; 22: 984–991.
 13. **Tidwell S. C., Ford D. H., Kimura W. D.** Generating radially polarized beams interferometrically. *Appl. Opt.* 1990; 29: 2234–2239.
 14. **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.
 15. **Sokolov A. L., Murashkin V. V.** Diffraction polarization optical elements with radial symmetry. *Opt. Spectrosc.* 2011; 111:859–865.
 16. **Khonina S. N., Karpeev S. V.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of diffractive optical elements. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2011; 28:2115–2123.
 17. **Khonina S. N., Karpeev S. V., Alferov S. V.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Optics Letters.* 2012; 37(12): 2385–2387. <https://doi.org/10.1364/OL.37.002385>.
 18. **Karpeev S. V., Podlipnov V. V., Algbili A. M.** An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator. *Comput. Opt.* 2020; 4: 214–218.
 19. **Ru-Yue Zhong, Zhi-Han Zhu, Hai-Jun Wu, Carmelo Rosales-Guzmán, Shu-Wei Song, Bao-Sen Shi.** Gouy-phase-mediated propagation variations and revivals of transverse structure in vectorially structured light. *Physical Review A.* 2021;103:053520. DOI: 10.1103/PhysRevA.103.053520.
 20. **Khonina S. N., Porfirev A. P.** Harnessing of inhomogeneously polarized Hermite–Gaussian vector beams to manage the 3D spin angular momentum density distribution. *Nanophotonics.* 2022;11(4): 697–712. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0418>.
 21. **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.
 22. **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.
 23. **Zh. Man, Ch. Min, Y. Zhang, Z. Shen, and X.-C. Yuan.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films. *Laser Phys.* 2013; 23(10): 105001.
 24. **Rubin N. A., Zaidi A., Juhl M., Li R. P., Mueller J. B., Devlin R. C., Leosson K., Capasso F.** Polarization state generation and measurement with a single metasurface. *Opt. Express.* 2018 26: 21455–21478.
 25. **Khonina S. N., Karpeev S. V., Pararin V. D., Morozov A. A.** Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals. *Physics Letters A.* 2017; 381: 2444–2455. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.05.025>.
 26. **Khonina S. N., Degtyarev S. A., Ustinov A. V., Porfirev A. P.** Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density. *Optics Express.* 2021;29(12):18651–18662. <https://doi.org/10.1364/OE.428453>.
 27. **Khonina S. N., Porfirev A. P., Karpeev S. V.** Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of

to improve the performance of optical data transmission systems, as well as to develop new methods of data processing and optical recognition. In the future, it is planned to perform more detailed studies aimed at expanding the capabilities of the refractive biaxicon and improving the recognition accuracy of various polarization states of the optical beams.

ACKNOWLEDGEMENT

The paper was prepared as a part of R&D “Research for development of a multifunctional analog photonic computing device based on the Fourier correlator circuit and dynamic spatial light modulators” of the Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (in the Introduction part), at the expense of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (in the part of numerical simulation), as well as a part of the state task of the Federal Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences (in the theoretical part).

AUTHORS

Khonin Pavel Alekseevich, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher in the Research Laboratory of Automated Systems for Scientific Research (NIL-35) of Samara National Research University; Senior Researcher, Image Processing Systems Institute Russian Academy of Sciences – Branch of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia. Research interests: mathematical modeling, diffractive optics, optical and digital image processing. E-mail: paul.95.de@gmail.com, khonin.pa@ssau.ru.
ORCID: 0000-0002-2248-614X

Degtyarev Sergey Aleksandrovich, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Samara National Research University; Researcher, Image Processing Systems Institute Russian Academy of Sciences – Branch of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia. Research interests: wave and singular optics.
ORCID: 0000-0002-0874-005X

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Samara National Research University; Main Researcher, Image Processing Systems Institute Russian Academy of Sciences – Branch of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulation, optical and digital image processing.
ORCID: 0000-0001-6765-4373

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

23–26.10.2023

ТЕХНОФОРУМ

МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.technoforum-expo.ru

«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Реклама



12+

 ЭКСПОЦЕНТР



- nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures. *Optics Express*. 2019; 27(13):18484–18492. <https://doi.org/10.1364/OE.27.018484>.
28. **Beresna M., Gecevičius M., Kazansky P. G., Gertus T.** Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass. *Appl. Phys. Lett.* 2011; 98: 201101.
 29. **Tovar A. A.** Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre–Gaussian laser beams. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1998;1: 2705–2711.
 30. **Kozawa Y., Sato, S.** Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt. Lett.* 2005; 30, 3063–3065.
 31. **Radwell N., Hawley R. D., Gotte J. B., Franke-Arnold S.** Achromatic vector vortex beams from a glass cone. *Nat. Commun.* 2016; 7, 10654.
 32. **Zhang, Y., Zeng A., Wang Y., Huang H.** A method for measuring the base angle of axicon lens based on chromatic dispersion. *Opt. Commun.* 2015; 346, 69–73.
 33. **Gubaev M. S., Degtiarev S. A., Strelkov I. U. S., Volotovskii S. G., Ivliev N. A., Khonina S. N.** Formirovanie vektornogo puchka s pomoshchju konicheskoi prelomliaiushchei poverkhnosti *Kompiuternaia optika*. 2021;45(6): 828–838. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1036.
 34. **Degtyarev S. A., Karpeev S. V., Ivliev N. A., Strelkov Yu. S., Podlipnov V. V. and Khonina S. N.,** Refractive Bi-Conic Axicon (Volcone) for Polarization Conversion of Monochromatic Radiation. *Photonics*. 2022;9:421. <https://doi.org/10.3390/photonics9060421>.
 35. **Ahluwalia B. P. S., Yuan X.-C., Tao S. H., Cheong W. C., Zhang L. S., Wang H.** Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon. *J. Appl. Phys.* 2006;99(11): 113104.
 36. **Alferov S. V., Khonina S. N., Karpeev S. V.** Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2014;31(4), 802–807.
 37. **Kuchmizhak A., Gurbatov S., Nepomniaschii A., Vitrik O., Kulchin Y.** High-quality fiber microaxicons fabricated by a modified chemical etching method for laser focusing and generation of Bessel-like beams. *Appl. Opt.* 2014;53(5):937–943.
 38. **Pavelyev V., Khonina S., Degtyarev S., Tukmakov K., Reshetnikov A., Gerasimov V., Osintseva N., Knyazev B.** Subwavelength Diffractive Optical Elements for Generation of Terahertz Coherent Beams with Pre-Given Polarization State. *Sensors*. 2023;23, 1579. <https://doi.org/10.3390/s23031579>.

АВТОРЫ

Хорин Павел Алексеевич, к. ф.-м. н., с. н. с. научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований (НИЛ-35) Самарского университета; ст.-исследователь ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Самара, Россия. Область научных интересов: математическое моделирование, дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: paul.95.de@gmail.com / khorin.pa@ssau.ru. ORCID: 0000-0002-2248-614X

Дегтярев Сергей Александрович, к. ф.-м. н., доц. Самарского университета, н. с. ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Самара, Россия. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. ORCID: 0000-0002-0874-005X

Хонина Светлана Николаевна, д. ф.-м. н., проф. Самарского университета; г. н. с. ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Самара, Россия. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. ORCID: 0000-0001-6765-4373

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

Лазеры в науке, технике, медицине: «Лазеры – 2023»

Московское отделение научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова приглашает принять участие в XXXIV Международной конференции лазеры в науке, технике, медицине: «Лазеры – 2023». Среди организаторов мероприятия: МИРЭА, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, НИЯУ «МИФИ», Лазерная ассоциация. Конференция состоится в МИРЭА с 14 по 16 ноября 2023 года. Основные направления работы конференции:

- лазерные системы локации и связи;
- лазерные магистрали передачи энергии;
- фотоника в исследовании и освоении Мирового океана;
- современные лазерные измерительные системы;
- генерация мощного терагерцевого излучения;
- воздушное лазерное сканирование;
- новые оптические схемы и режимы работы твердотельных лазеров;
- перспективные активные и нелинейные среды;
- волоконные кольцевые лазеры фемтосекундных импульсов;
- твердотельные лазеры среднего ИК-диапазона;
- ИК-фотодетекторы;
- лазеры в хирургии;
- применение низкоинтенсивных лазеров в терапии;
- люминесцентная диагностика и тераностика в онкологии;
- фотодинамическая и светокислородная терапия;
- современные лазерные медицинские приборы;
- современные технологии в оптотехнике;
- лазерное он-лайн детектирование изотопов молекулярных газов;
- исследование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом;
- лазерные сварка, наплавка и ударная обработка различных материалов.

Более подробную информацию можно найти по адресу: www.mntores.inlife.ru.

www.mntores.ru/las



XXVII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

INTERPOLITEX



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

17—19 ОКТЯБРЯ 2023
МОСКВА, ВДНХ, ПАВИЛЬОН № 57



INTERPOLITEX.RU