

# Перестраиваемый формирователь радиально- и азимутально-поляризованных пучков Бесселя на основе интерференционного поляризатора

С.В. Карпеев<sup>1,2</sup>, В.Д. Паранин<sup>2</sup>, М. Рохас<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Предложена новая оптическая система для генерации азимутально и радиально-поляризованных лазерных пучков Бесселя. Система основана на преобразовании конических волновых фронтов при прохождении через интерференционную поляризующую пластину. Управление поляризационными характеристиками при формировании пучка осуществляется путем изменения расходимости пучка, падающего на дифракционный аксикон. Экспериментально получены радиально и азимутально-поляризованные пучки Бесселя с использованием бинарно-фазового аксикона.

## 1. Введение

Азимутально- и радиально-поляризованные лазерные пучки Бесселя на сегодняшний день имеют множество приложений [1], в частности для связи в свободном пространстве [2] и обработки материалов [3]. В работе [4] рассмотрены теоретические основы непараксиального распространения и преобразования неоднородно поляризованных пучков Бесселя. Методы формирования лазерных пучков Бесселя с неоднородной поляризацией различаются как по методам формирования исходного пучка Бесселя, так и по свойствам оптических систем, формирующих требуемое поляризационное состояние. Универсальным средством решения обеих задач представляются жидкокристаллические модуляторы света [5], однако низкое разрешение этих устройств, сказалось на качестве экспериментальных результатов полученных в работе [5]. В работе [6] было экспериментально продемонстрировано свойство самовосстановления не только амплитудного распределения, но и поляризационного состояния пучков Бесселя-Гаусса, полученных с использованием пространственного модулятора света, поляризационное состояние которых формировалось при помощи секторной пластинки (генератора радиальной поляризации). К сожалению, применение секторной пластинки [7] приводит к ухудшению качества пучков. Пучки более высокого качества могут быть получены, если исходный пучок Бесселя получают при помощи рефракционного аксикона, а дальнейшее формирование поляризационного состояния осуществляется в двухосном двулучепреломляющем кристалле [8]. Такой метод позволил экспериментально получить в одной и той же оптической системе как радиальную, так и азимутальную поляризации путем поворота направления оси поляризации падающего пучка на  $90^\circ$ . Более простым решением

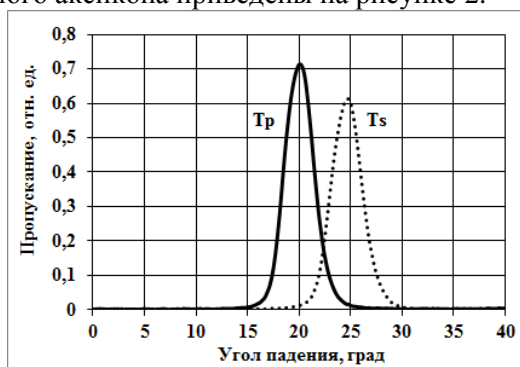
является применение многослойной структуры (одномерного фотонного кристалла) для формирования поляризации пучка Бесселя [9], причем, при использовании нелинейных оптических материалов возможно управление свойствами кристалла с помощью дополнительного облучения вспомогательным лазерным источником. В таком варианте оптической системы, предложенном в работе [9], перестройка поляризационного состояния осуществляется просто путем управления нелинейным фотонным кристаллом без всяких изменений в оптической системе. Однако этот принцип до сих пор экспериментально не реализован. Упрощенный вариант такой системы [10], который был реализован на практике, содержит вместо рефракционного аксикона дифракционный, а вместо многослойной структуры включает стопу Столетова, которая также позволяет формировать радиальную поляризацию. Применение дифракционного аксикона повышает качество пучка в дополнение к тем преимуществам, которые дает дифракционная оптика. Однако диаметр пучка после прохождения стопы Столетова сильно увеличивается из-за требуемого большого угла расходимости, и коллимация пучка становится сложной задачей, требующей применения высокоапертурной оптики большого диаметра. К тому же энергетическая эффективность стопы Столетова весьма низкая для достижения достаточного поляризационного контраста. Никакое управление поляризационным состоянием пучка в такой системе невозможно. В нашей работе мы предлагаем взять за основу оптическую систему предложенную в работе [11], основанную на преобразовании конических пучков в многослойной интерференционной структуре. Такая система эффективно использовалась для формирования двухкольцевого радиально поляризованного пучка [12]. Пригодность данной системы для формирования радиально поляризованных пучков Бесселя была экспериментально показана в работе [13]. Однако управление поляризационным состоянием в ней не осуществлялось. Причиной тому были достаточно большие углы падения света на многослойную структуру для получения радиальной поляризации. Дальнейшее увеличение углов для получения азимутальной поляризации не представлялось возможным из-за технологических ограничений при изготовлении дифракционных оптических элементов и сильного снижения энергетической эффективности при увеличении углов падения. Основой создания оптической системы с возможностью управления поляризационным состоянием послужило применение интерференционного поляризатора с меньшими углами падения, более эффективного для *s*-поляризованного излучения и дающего больший поляризационный контраст. В работе показано, что изменением расходимости излучения можно управлять поляризационным состоянием пучка без потери качества и энергетической эффективности.

## 2. Экспериментальное исследование

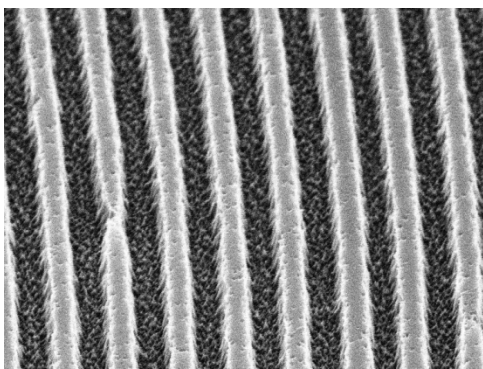
Интерференционный поляризатор с рабочим углом  $20^\circ$  для длины волны 632,8 нм был спроектирован и изготовлен ОАО «ИЗОВАК» (Республика Беларусь, г. Минск). Поляризатор состоял из 43 чередующихся слоев  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  различной толщины, нанесенных на кварцевую подложку диаметром 25,4 мм толщиной 3 мм. Поляризационные характеристики пропускания элемента исследовались на спектральном эллипсометре J.A. WollamV-VASE в диапазоне углов  $0 - 40^\circ$  с шагом  $0,2^\circ$ . Длина волны зондирующего излучения устанавливалась равной 632,8 нм, ширина спектра – не более 0,5 нм. Для большей точности перед каждым измерением определялся уровень излучения спектрального блока эллипсометра (базовая линия), а результаты измерений усреднялись во времени по 10 точкам. Зависимости пропускания *p*- и *s*-поляризованного излучения от угла падения приведены на рисунке 1. Из измеренных характеристик следует, что интерференционный поляризатор обеспечивает отношение коэффициентов пропускания радиальной и азимутальной компонент  $T_p/T_s$  не менее 80:1 – 90:1 для рабочего угла около  $20^\circ$ . При этом пропускание для  $T_p$  составляет 72%, пропускание для  $T_s$  – 62 %.

Расчет показывает, что для получения таких углов дифракции аксикон должен иметь период 1,8 – 1,9 мкм. Для создания пучка Бесселя нулевого порядка в работе использовался фазовый дифракционный аксикон с периодом 2 мкм и диаметром 20 мм, изготовленный на кварцевой

подложке с помощью фотопостроителя CLWS-200S. Электронная фотография фрагментов микрорельфа дифракционного аксикона приведены на рисунке 2.



**Рисунок 1.** Пропускание радиальной  $T_r$  и азимутальной  $T_s$  компонент интерференционным поляризатором.



**Рисунок 2.** Электронная фотография микрорельфа дифракционного аксикона.

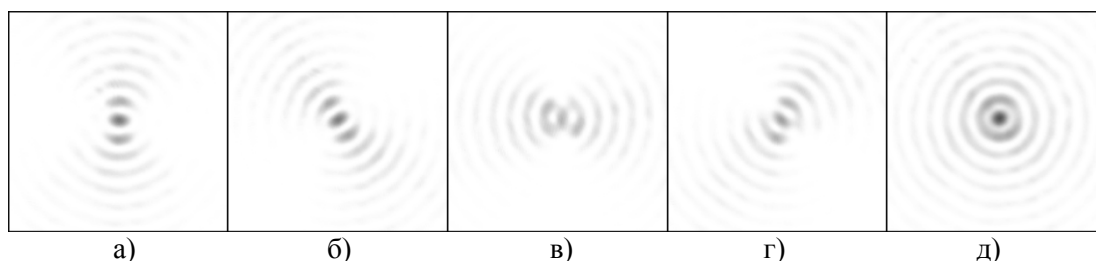
Исследование формирования радиально- и азимутально-поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка осуществлялось на оптической установке, схема которой приведена на рисунке 3. Она включала: линейно-поляризованный гелий-неоновый лазер, пространственный фильтр – расширитель пучка, четвертьволновую пластину  $\lambda/4$ , дифракционный аксикон, интерференционный поляризатор (ИП), изображающий объектив 40 $\times$ , пленочный анализатор (А), видеоматрицу DCM310 (ПЗС). Расширитель пучка состоял из объектива 20 $\times$ , точечной диафрагмы диаметром 15 мкм и коллимирующей линзы Л1 с фокусным расстоянием 200 мм.



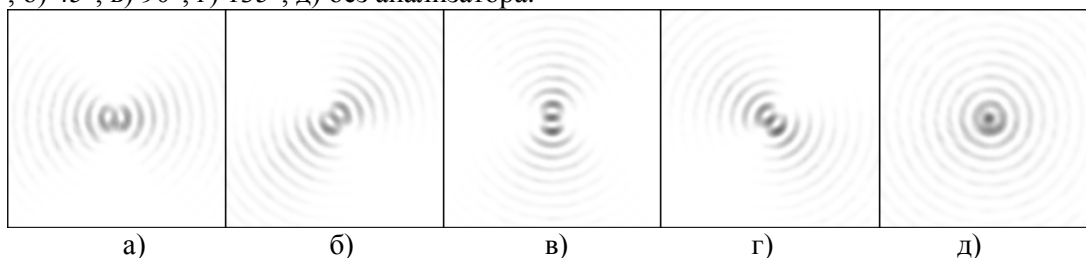
**Рисунок 3.** Схема экспериментальной установки для получения радиально-поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка.

На рисунке 4 приведены полученные распределения интенсивности для различных положений оси пропускания анализатора. Из полученных данных следует, что сформированный пучок Бесселя нулевого порядка имеет радиальную поляризацию.

Для формирования азимутально-поляризованного пучка Бесселя в соответствии с рисунком 1 необходимо увеличить угол дифракции с 20° до 25°. С этой целью из оптической установки изымалась коллимирующая линза Л1 с фокусным расстоянием 200 мм, а непосредственно перед интерференционным поляризатором устанавливалась линза с фокусным расстоянием 50 мм. На рисунке 5 приведены полученные распределения интенсивности для различных положений оси анализатора. Из полученных данных следует, что сформированный пучок Бесселя нулевого порядка имеет азимутальную поляризацию.



**Рисунок 4.** Выходной пучок Бесселя при различных положениях поляризатора: а)  $0^\circ$ , б)  $45^\circ$ , в)  $90^\circ$ , г)  $135^\circ$ , д) без анализатора.



**Рисунок 5.** Выходной пучок Бесселя при различных положениях поляризатора: а)  $0^\circ$ , б)  $45^\circ$ , в)  $90^\circ$ , г)  $135^\circ$ , д) без анализатора.

### 3. Заключение

Таким образом, предложена перестраиваемая оптическая система для формирования радиально и азимутально поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка, включающая бинарно-фазовый аксикон и интерференционный поляризатор. Перестройка системы основана на изменении расходимости конического волнового фронта проходящего через многослойную структуру. Формирование радиальной и азимутальной поляризаций осуществлялось интерференционным поляризатором при углах падения  $20^\circ$  и  $25^\circ$  соответственно, а изображение полученного неоднородно поляризованного пучка строилось при помощи высокоапертурного микрообъектива. Радиально- и азимутально-поляризованные пучки Бесселя могут применяться для оптической связи и обработки материалов.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26).

### 5. Литература

- [1] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
- [2] Soifer, V. Vortex beams in turbulent media: review / V. Soifer, O. Korotkova, S. Khonina, E. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624.
- [3] Алферов, С.В. О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алферов, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н.Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065.
- [4] Ornigotti, M. Radially and azimuthally polarized nonparaxial Bessel beams made simple / M. Ornigotti, A. Aiello // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21(13). – P. 15530-15537.
- [5] Shiyao, F. Bessel beams with spatial oscillating polarization / F. Shiyao, Z. Shikun, G. Chunqing // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6 – P. 30765.
- [6] Gaofeng, W. Generation and self-healing of a radially polarized Bessel-Gauss beam / W. Gaofeng, W. Fei, C. Yangjian // *Physical Review A*. – 2014. – Vol. 89. – P.043807.
- [7] Алфёров, С.В. Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В.

- Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
- [8] Khilo, N. A high-efficient method for generating radially and azimuthally polarized Bessel beams using biaxial crystals / N. Khilo, T.S. Al-Saud, S.H. Al-Khowaiter, M.K. Al-Muhanna, S. Solonevich, N. Kazak, A. Ryzhevich // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285. – P. 4807-4810.
- [9] Kurillkina, S. Formation of azimuthally and radially polarized Bessel light beams using one-dimensional photonic nonlinear crystals / S. Kurillkina, V. Belyi, N. Kazak // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2006. – Vol. 13. – P. 114-120.
- [10] Скиданов, Р.В. Дифракционные аксиконы для формирования радиально-поляризованного света на основе использования стопы Столетова / Р.В. Скиданов, А.В. Морозов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 614-618.
- [11] Паранин, В.Д. Расчёт формирования радиально-поляризованных пучков на основе рефракционных элементов с интерференционными поляризующими покрытиями / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 492-499.
- [12] Karpeev, S. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S. Karpeev, V. Paraniin, S. Khonina // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19(5). – P. 055701.
- [13] Карпеев, С.В. Формирование радиально-поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка методами дифракционной и поляризационной оптики / С.В. Карпеев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 583-587. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.

## Tunable generator of radially and azimuthally polarized Bessel beams based on the interference polarizer

S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>, V.D. Pararin<sup>1</sup>, M. Rojas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** We proposed the new optical system to generate azimuthally and radially polarized Bessel laser beams. The base of system is the transformation of the conical wave fronts when passing through interference polarizing plate. The polarization control characteristics when forming the beam by changing the divergence of the beam incident on the diffractive axicon. We experimentally obtained the radially and azimuthally polarized Bessel beams using binary phase axicon.

**Keywords:** Bessel laser beams, diffractive optical elements, inhomogeneous polarization, mode-polarization, transformations, interference polarizing plate.