

DOI: 10.17586/1023-5086-2026-93-03-4-14

УДК 535.44

Генерация векторных оптических вихрей в поляризационном интерферометре Маха–Цендера

Д. Д. РЕШЕТНИКОВ¹, М. Е. ПАВЕЛИНА², А. А. РЫЖАЯ³, Е. В. МАЛЮТИНА⁴,
А. А. СЕВРЮГИН⁵, Е. А. ВАШУКЕВИЧ⁶, В. М. ПЕТРОВ⁷, В. Ю. ВЕНЕДИКТОВ⁸✉

^{1, 2, 4, 6, 7, 8}Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^{3, 5, 8}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Корреспондирующий автор: Владимир Юрьевич Венедиктов, vlad.venediktov@mail.ru

Аннотация

Предмет исследования. Генерация векторных оптических вихрей в поляризационном интерферометре Маха–Цендера. **Цель работы.** Разработка методов генерации векторных и скалярных оптических вихрей в модифицированном поляризационном интерферометре Маха–Цендера. Экспериментальное изучение системы поляризационного интерферометра с кубическими уголковыми отражателями, а также теоретическое описание поляризационных преобразований в нем с использованием формализма Джонса. **Метод.** Для генерации скалярных и векторных оптических вихрей использована модифицированная система поляризационного интерферометра Маха–Цендера. Определение орбитального углового момента оптического вихря проводилось на основе наблюдения картины его интерференции с опорным гауссовым пучком. **Основные результаты.** Показана возможность формирования скалярных вихрей с орбитальным угловым моментом ± 1 и векторных оптических вихрей с осесимметричной поляризационной структурой. Приведено теоретическое описание поляризационных преобразований в схеме интерферометра в формализме Джонса. **Практическая значимость.** Полученные в поляризационном интерферометре состояния могут использоваться для кодирования информации в задачах квантовой связи, квантовой криптографии, а также в системах спутниковой оптической передачи данных. Конфигурация оптической схемы обладает высокой гибкостью и позволяет формировать вихревые пучки с различными параметрами, что важно для задач высокоскоростных коммуникаций.

Ключевые слова: структурированное излучение, оптический вихрь, ретрорефлекторы, кубические уголковые отражатели, поляризация излучения, поляризационный интерферометр, аксиально-симметричные поляризационные пучки

Благодарность: авторы выражают благодарность Голубевой Т.Ю. и Соколову А.Л. за полезные советы и обсуждения, способствующие подготовке данной работы.

Ссылка для цитирования: Решетников Д.Д., Павелина М.Е., Рыжая А.А., Малютина Е.В., Севрюгин А.А., Вашукевич Е.А., Петров В.М., Венедиктов В.Ю. Генерация векторных оптических вихрей в поляризационном интерферометре Маха–Цендера // Оптический журнал. 2026. Т. 93. № 3. С. 4–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2026-93-03-4-14>

Коды OCIS: 110.0110, 260.3160, 3000.30970

Generation of vector optical vortices in a Mach–Zehnder polarization interferometer

D. D. RESHETNIKOV¹, M. E. PAVELINA², A. A. RYZHAYA³, E. V. MALYUTINA⁴,
A. A. SEVRYUGIN⁵, E. A. VASHUKEVICH⁶, V. M. PETROV⁷, V. YU. VENEDIKTOV⁸✉

^{1, 2, 4, 6, 7, 8}Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^{3, 5, 8}Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Vladimir Yu. Venediktov, vlad.venediktov@mail.ru

Abstract

Subject of study. Vector optical vortices generation in a Mach–Zehnder polarization interferometer.

Aim of the study. The development of methods for the generation of vector and scalar optical vortices using a modified Mach–Zehnder polarization interferometer. Experimental study of the polarization interferometer system with cube corner reflectors is described, as well as the theoretical description of polarization transformations within this device using the Jones matrix formalism. **Method.** A modified scheme of the Mach–Zehnder polarization interferometer has been used to generate both scalar and vector optical vortices. The orbital angular momentum of these optical vortices has been determined by observing the interference pattern of its interference with a reference Gaussian beam. **Main results.** As a result of this work, the possibility of scalar vortices with orbital angular momentum ± 1 and vector optical vortices with axisymmetric polarization structures has been demonstrated. A theoretical description of polarization transformations in an interferometer setup using the Jones formalism has also been provided. **Practical significance.** The states produced in the polarization interferometer setup can be utilized to encode information for quantum communication, quantum cryptography, and satellite-based optical data transmission systems. The optical circuit's configuration is highly adaptable and enables the generation of vortex beams with diverse parameters, which is significant for high-bandwidth communication applications.

Keywords: structured light, optical vortex, retroreflectors, cubic corner reflectors, polarization of light, polarization interferometer, far field, far field diffraction pattern

Acknowledgment: the authors would like to thank T.Yu. Golubeva and A.L. Sokolov for helpful advice and discussions that facilitated the preparation of this work.

For citation: Reshetnikov D.D., Pavelina M.E., Ryzhaya A.A., Malyutina E.V., Sevryugin A.A., Vashukevich E.A., Petrov V.M., Venediktov V.Yu. Generation of vector optical vortices in a Mach–Zehnder polarization interferometer [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2026. V. 93. № 3. P. 4–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2026-93-03-4-14>

OCIS codes: 110.0110, 260.3160, 3000.30970

ВВЕДЕНИЕ

Скалярные оптические вихри представляют собой пучки излучения, несущие орбитальный угловой момент и характеризующиеся фазовой сингулярностью в центре пучка. В этой области амплитуда электромагнитного поля обращается в ноль, а фаза не определена [1]. Наряду со скалярными вихревыми пучками особый интерес представляют векторные оптические вихри — пучки с пространственно неоднородной поляризацией. В таких пучках направление вектора поляризации меняется при обходе вокруг оси распространения пучка, формируя область поляризационной сингулярности и кольцевое распределение ин-

тенсивности [2, 3]. Наиболее типичными примерами являются радиально и азимутально поляризованные пучки, обладающие осевой симметрией и особыми свойствами при фокусировке [4]. Радиально поляризованные пучки формируют более узкое фокусное пятно по сравнению с линейно поляризованными пучками. Такие пучки используются в сверхразрешающей микроскопии, например в методе STED¹ [4, 11], а также для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов [12] и лазерной микрообработки материалов [13].

¹ Stimulated Emission Depletion Microscopy — микроскопия на основе подавления спонтанного испускания.

Поляризационные вихри также применяются в оптических ловушках для удержания и вращения микрочастиц [14].

Векторные оптические вихри представляют интерес в качестве носителей информации в атмосферных оптических каналах связи [15–18]. Во-первых, это обусловлено возможностями их мультиплексирования по состоянию поляризации с целью увеличения пропускной способности канала связи. Во-вторых, для таких пучков хорошо разработаны теоретический и экспериментальный аппараты восстановления волнового фронта, подвергнутого искажению из-за наличия оптической атмосферной турбулентности. Перспективным направлением остается разработка быстрых перестраиваемых генераторов векторных вихрей, обеспечивающих высокую частоту переключения при сохранении поляризационной чистоты и стабильности фазы.

К настоящему времени разработан широкий спектр экспериментальных методов генерации векторных оптических вихрей. Один из первых подходов основан на интерференции мод Эрмита–Гаусса, где ортогональные моды HG_{10} и HG_{01} с различной поляризацией и определенной разностью фаз интерферируют, формируя радиально и аксиально поляризованные пучки [5]. Другой эффективный метод — использование волновых пластин, преобразующих линейно поляризованный свет в пучки с осесимметричной поляризацией [6, 7]. Широкое распространение получили пространственные модуляторы излучения, позволяющие управлять фазовой и поляризационной структурой пучка и тем самым изменять тип векторного вихря в реальном времени [8]. К наиболее известным решениям относятся дифракционные оптические элементы [9] и интерферометры с кубическими уголковыми отражателями (КУО) [10, 19], обеспечивающие стабильную генерацию пучков с осевой симметрией и управляемым топологическим зарядом.

Целью настоящей работы являются разработка методов генерации векторных и скалярных оптических вихрей в модифицированном поляризационном интерферометре Маха–Цендера и экспериментальное изучение системы поляризационного интерферометра с кубическими уголковыми отражателями, а также теоретическое описание поляризационных пре-

образований в нем с использованием формализма Джонса.

Работа построена следующим образом: в первом разделе обсуждается и экспериментально исследуется метод формирования скалярных оптических вихрей ± 1 порядков. Во втором разделе приводится описание поляризационных преобразований в системе интерферометра с использованием формализма Джонса. В третьей части работы экспериментально исследуется генерация векторных оптических вихрей 2-го порядка в поляризационном интерферометре. Заключительный раздел посвящен обсуждению результатов работы и выводам.

ФОРМИРОВАНИЕ СКАЛЯРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Свойствами скалярных оптических вихрей обладают моды Лагерра–Гаусса с отличным от 0 значением азимутального числа l . Предлагаемый в данной работе способ генерации основан на известной связи мод Лагерра–Гаусса и Эрмита–Гаусса [20]

$$LG_{0,\pm 1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(HG_{0,1} \pm iHG_{0,1}). \quad (1)$$

В работе [10] показана возможность формирования мод Эрмита–Гаусса в поляризационном интерферометре Маха–Цендера на основе КУО. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Система из двух собирающих линз предназначена для увеличения исходной апертуры пучка так, чтобы освещать КУО целиком (диаметр КУО — 1"). Первый светоделительный куб формирует предметный и опорный пучки: предметный будет преобразовываться в поляризационном интерферометре, опорный — использоваться для исследования волнового фронта предметного во вспомогательном интерферометре. Полуволновые пластинки в плечах поляризационного интерферометра позволяют управлять пространственной структурой интенсивности на выходном светоделительном кубе. Изменение относительной фазы обеспечивалось за счет линейного транслятора, на котором был установлен один из КУО.

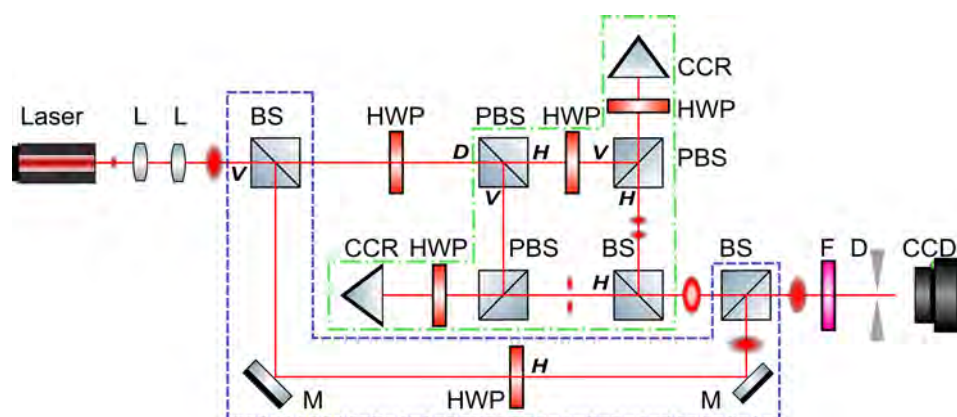


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для генерации скалярных оптических вихрей. Laser — HeNe лазер ($\lambda = 632,8$ нм), L — собирающая линза, BS — светоделительный куб, HWP — полуволновая пластинка, PBS — поляризационный светоделительный куб, CCR — кубический угловый отражатель, M — зеркало, F — нейтральный фильтр, D — диафрагма, CCD — ПЗС-камера. Буквами *H*, *V*, *D* на схеме обозначены состояния поляризации (горизонтальная, вертикальная и диагональная соответственно). Вдоль пути следования луча показаны распределения интенсивности в поперечной плоскости пучка. Штрихпунктирной линией обозначен поляризационный интерферометр Маха–Цендера. Пунктирной линией обозначены элементы вспомогательного интерферометра: входной и выходной светоделительные кубы, а также второе плечо с опорным пучком

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for the generation of scalar optical vortices. Laser is HeNe laser ($\lambda = 632.8$ nm), L is converging lens, BS is beam-splitting cube, HWP is half-wave plate, PBS is polarizing beam-splitting cube, CCR is cube corner reflector, M is mirror, F is neutral density filter, D is diaphragm, CCD is CCD camera. The letters *H*, *V*, *D* in the diagram denote the polarization states of light (horizontal, vertical and diagonal respectively). The intensity distributions in the transverse plane of the beam are depicted along the path of the beam. The dash-dotted line represents the polarization Mach–Zehnder interferometer. The dashed lines represent the components of the auxiliary interferometer, including the input and output beam splitters, as well as the second line containing the reference beam

Для определения фазовой структуры мод на выходе интерферометра использовался метод интерференции с опорным гауссовым пучком под небольшим углом. При этом в случае наличия орбитального углового момента у пучка в интерференционной картине будет наблюдаться характерная «вилка», причем число ее зубьев будет соответствовать модулю топологического заряда оптического вихря, а их взаимная ориентация — знаку топологического заряда. Представленные на рис. 2 интерференционные картины соответствуют относительной разности фаз в плечах интерферометра $\pm\pi$.

На интерференционных картинах видны характерные изображения «вилки», причем направленные в разные стороны, что говорит о разном знаке топологического заряда. Расплывчатое пятно в центре интерференционной картины характеризует точку сингулярности в центре оптического вихря — область пространства с нулевой интенсивностью и неопределенной фазой. Важно отметить, что

область сингулярности в центре пучка сохраняется при любой относительной фазе в плечах интерферометра, что обусловлено особенностями конструкции КУО. Однако необходимая картина «вилки» проявляется строго при разности фаз $\pm\pi$.

Ключевым преимуществом описанного метода генерации скалярных оптических вихрей является использование КУО. Необходимые распределения интенсивности и фазы формируются в дальней зоне дифракции. Конструкция КУО обеспечивает низкую угловую расходимость пучка, а значит, формируемые оптические вихри могут применяться для кодирования информации в протяженных атмосферных каналах связи. Кроме того, изменение типа вихря происходит за счет изменения относительной фазы. Для этого могут использоваться объемные фазовые модуляторы, частота работы которых достигает нескольких гигагерц, что будет соответствовать частоте смены кодовых состояний.

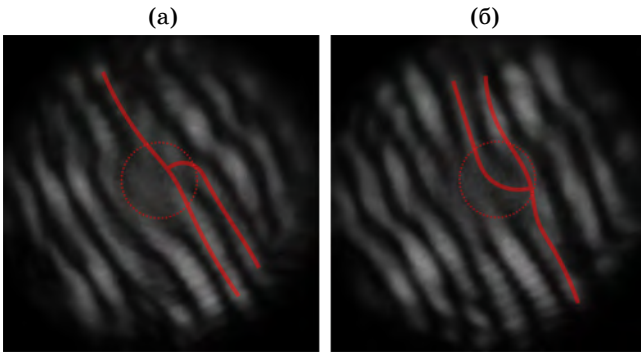


Рис. 2. Результаты интерференции оптических вихрей с зарядами -1 (а) и $+1$ (б) с опорным гауссовым пучком. Интерференционные картины соответствуют относительной разности фаз в плечах интерферометра $\pm\pi$. Сплошной линией выделены интерференционные полосы, формирующие искомую структуру в виде «вилки». Пунктирной линией выделена область сингулярности

Fig. 2. Results of interference of optical vortices with charges (a) -1 and (б) $+1$ with a reference Gaussian beam. The interference patterns correspond to the relative phase difference in the arms of the interferometer $\pm\pi$. A solid line in the figure indicates the interference fringes that form the desired pattern, which takes the form of a “fork.” The dotted line indicates the area of singularity

Далее поляризационное состояние последовательно преобразуется полу- и четвертьволновой пластинками. Данное преобразование можно записать как

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta)^2 + i\sin(\theta)^2 & (1-i)\cos(\theta)\sin(\theta) \\ (1-i)\cos(\theta)\sin(\theta) & \sin(\theta)^2 + i\cos(\theta)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(2\theta') & \sin(2\theta') \\ \sin(2\theta') & -\cos(2\theta') \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где θ' , θ — углы поворота полу- и четвертьволновой пластинок соответственно, а выражение в квадратных скобках — вектор Джонса вертикально поляризованного излучения.

Преобразование поляризационной структуры при отражении от КУО с нулевым сдвигом фазы $\delta = 0$ описывается матрицей, представленной в работе [21],

$$\begin{pmatrix} \cos(\beta_2) & \sin(\beta_2) \\ -\sin(\beta_2) & \cos(\beta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\beta_1) & \sin(\beta_1) \\ -\sin(\beta_1) & \cos(\beta_1) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где угол α — угол между гранями КУО, а β_i — углы между координатными осями поляризационного базиса и входной (β_1) и выходной (β_2) гранями КУО. Важно отметить, что при отражении от КУО формируется характерное распределение интенсивности в виде 6 пятен, и матрица M описывает преобразование поляризации в каждом из этих

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛЯРИЗАЦИОННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАХА–ЦЕНДЕРА

В разделе будет описано прохождение лазерного пучка через оптический тракт поляризационного интерферометра (рис. 3), используя формализм Джонса. Первый поляризационный светоделительный куб формирует в обоих плечах интерферометра излучение с линейной горизонтальной (выходной канал светоделителя «на пропускание») и вертикальной (выходной канал светоделителя «на отражение») поляризациями.

Рассмотрим преобразования поляризационного состояния, происходящие в плече с вертикальной поляризацией излучения (преобразования во 2-ом плече описываются аналогично). Для вертикально поляризованного излучения действие 2-го поляризационного светоделителя эквивалентно действию поляризатора с вертикальной осью пропускания, которое описывается следующей матрицей Джонса:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

пятен в зависимости от поляризации падающего на КУО излучения. В случае линейной поляризации матрица M имеет более простой вид

$$\begin{pmatrix} \cos(2\varphi) & -\sin(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

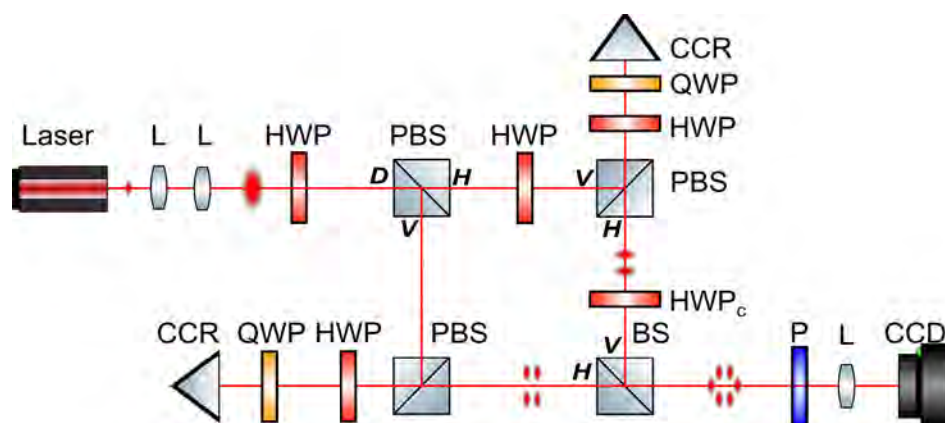


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для генерации векторных оптических вихрей. Laser — HeNe лазер ($\lambda = 632.8$ нм), L — собирающая линза, BS — светоделительный куб, HWP, HWP_c — полуволновые пластинки, QWP — четвертьволновая пластинка, PBS — поляризационный светоделительный куб, CCR — кубический уголкового отражатель, P — поляризатор, CCD — камера ПЗС. Буквами H, V, D на схеме обозначены состояния поляризации света (горизонтальная, вертикальная и диагональная соответственно). Вдоль пути следования луча показаны распределения интенсивности в поперечной плоскости пучка

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup for the generation of vector optical vortices. Laser means HeNe laser ($\lambda = 632.8$ nm), L means converging lens, BS means beam-splitting cube, HWP, HWP_c are half-wave plates, PBS means polarizing beam-splitting cube, CCR means cube corner reflector, P means polarizer, CCD means CCD camera. The letters H, V, D in the diagram denote the polarization states of light (horizontal, vertical and diagonal, respectively). The intensity distributions in the transverse plane of the beam are depicted along the path of the beam

что соответствует матрице преобразования излучения с линейной поляризацией в векторный оптический вихрь 2-го порядка. Аналогичным образом матрица M упрощается и в случае падающего света с правой или левой круговыми поляризациями и приобретает вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Такая матрица соответствует преобразованию правой циркулярной поляризации в левую и наоборот.

На обратном проходе в каждом из секторов поперечного профиля пучка поляризационное состояние преобразуется последовательно четверть- и полуволновой пластинками, а затем поляризационным светоделительным кубом, который в случае рассматриваемой оптической системы играет роль поляризатора с горизонтальной осью пропускания

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При этом еще раз подчеркнем, что после отражения света от КУО действие матрицы M и всех последующих применяется независимо к каждому из 6 секторов в поперечной плоскости пучка.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Векторные оптические вихри представляют собой оптические пучки, вектор напряженности электрического поля E которых в поперечной плоскости можно записать с помощью формализма Джонса как

$$\mathbf{E}(r, \varphi) = A(r) \begin{bmatrix} \cos(p\varphi + \theta) \\ \sin(p\varphi + \theta) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где p — поляризационный топологический заряд, θ — направление поляризации в точке $\varphi = 0$, $A(r, \varphi)$ — функция распределения амплитуды поля (мода Лагерра–Гаусса или Бесселя–Гаусса). Основными объектами рассмотрения в схеме поляризационного интер-

ферометра являются векторные оптические вихри 2-го порядка, описываемые векторами Джонса,

$$\mathbf{J}_{vv1} = \begin{bmatrix} \cos(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_{vv2} = \begin{bmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Векторные поляризационные состояния (9), (10) могут быть сформированы при отражении линейно-поляризованного излучения от КУО с нулевым сдвигом [21]. Схема поляризационного интерферометра с такими КУО представлена на рис. 3. Поляризационные светоделительные кубы для излучения, отраженного от КУО, играют роль линейных поляризаторов с оптической осью, ориентированной горизонтально. Это приводит к изменению пространственного распределения поляризации и интенсивности пучков. Для формирования векторного оптического вихря 2-го порядка требуется восстановление обоих распределений.

Идея метода заключается в формировании выходным светоделительным кубом аддитивной смеси поляризационно неоднородной (векторной) HG_{11} и однородной (скалярной) HG_{01} мод Эрмита–Гаусса. Причем линейные поляризации двух мод должны быть ортогональны друг другу так, чтобы соответствовать распределению на рис. 4. Изменение относительной поляризации двух пучков осуществляется с помощью дополнительной волновой

пластинки в верхнем плече интерферометра (рис. 3).

В эксперименте с помощью полуволновых пластинок менялись состояния поляризации в обоих плечах интерферометра так, чтобы сформировать необходимые моды Эрмита–Гаусса. Четвертьволновые пластины использовались для компенсации эллиптичности поляризации от лазера. Распределения интенсивности наблюдались с помощью ПЗС-камеры, установленной на выходе интерферометра. Распределение поля в дальней зоне дифракции формировалось собирающей линзой, установленной перед камерой. Для исследования пространственной структуры поляризации перед камерой был установлен пленочный линейный поляризатор.

Как видно из рис. 5а и 5г, два сектора итогового пучка обладают линейной горизонтальной поляризацией, а остальные четыре — вертикальной (рис. 5б и 5д), что соответствует распределению поляризации векторного оптического вихря, представленного на рис. 4а. Второй вариант поляризационного распределения (рис. 4б) формируется путем изменения линейной поляризации пучков, падающих на уголки отражатели, на ортогональную ей поляризацию с помощью полуволновых пластинок. Поляризационные структуры таких пучков представлены на рис. 6.

В рассматриваемой схеме (рис. 3) могут быть также получены векторные вихри 2-го порядка с другими распределениями поляризации за счет изменения относительной разности

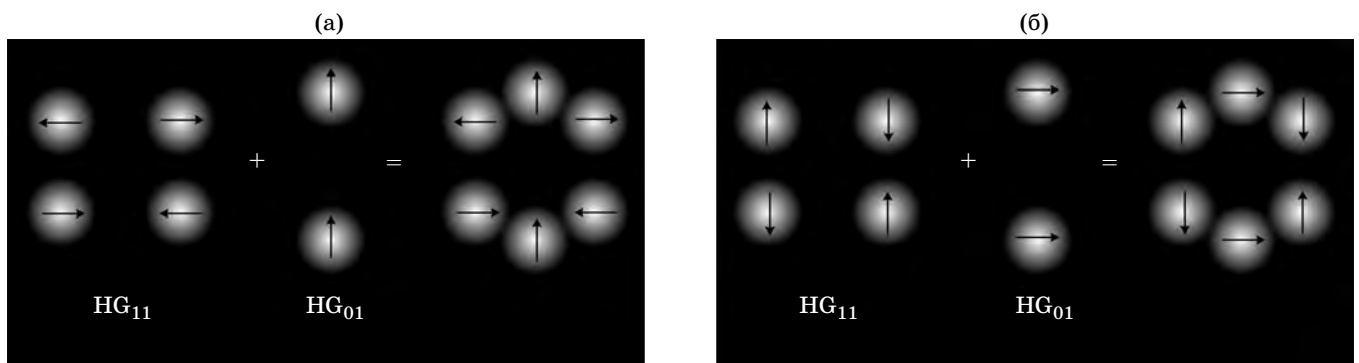


Рис. 4. Формирование поляризационных векторных вихрей 2-го порядка как аддитивной смеси мод Эрмита–Гаусса. Первая конфигурация (а), вторая конфигурация (б). Стрелками обозначены векторы поляризации

Fig. 4. The formation of second-order polarization vector vortices as an additive combination of Hermite–Gaussian modes. (a) First configuration, (b) second configuration. The arrows denote the polarization vectors

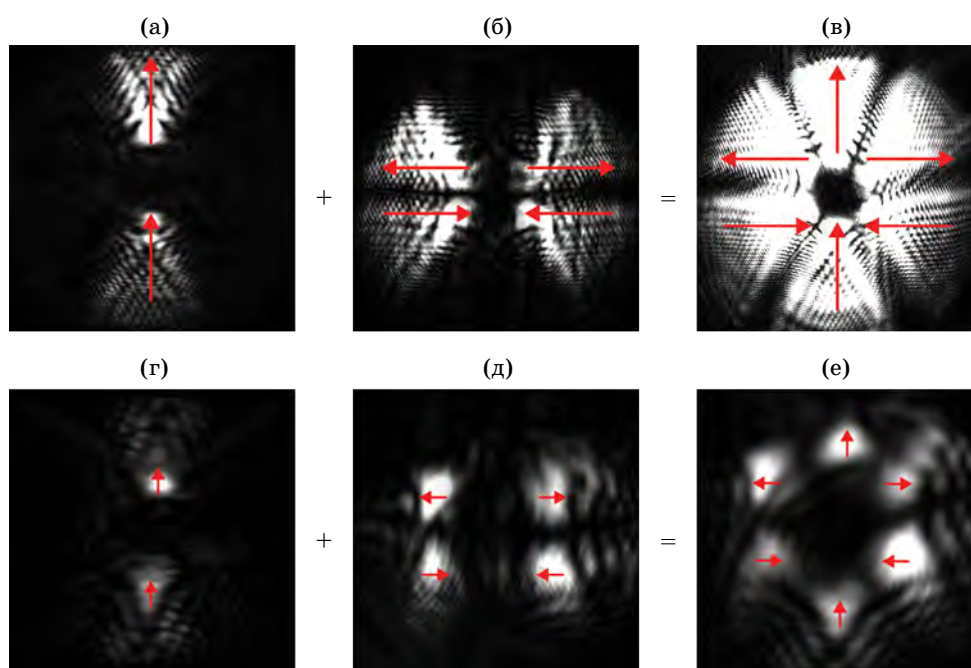


Рис. 5. Распределения интенсивности с поляризатором, установленным горизонтально — (а), (г), вертикально — (б), (д), и без него — (в), (е). Изображения (а), (б) и (в) получены в ближней зоне дифракции, изображения (г), (д), (е) — в дальней. Стрелками обозначены векторы поляризации

Fig. 5. Intensity distributions with a polarizer installed ((а), (г)) horizontally, ((б), (д)) vertically and ((в), (е)) without it. Images (а)–(в) were obtained in the near diffraction zone, images (г)–(е) — in the far zone. The arrows in the picture denote the polarization vectors

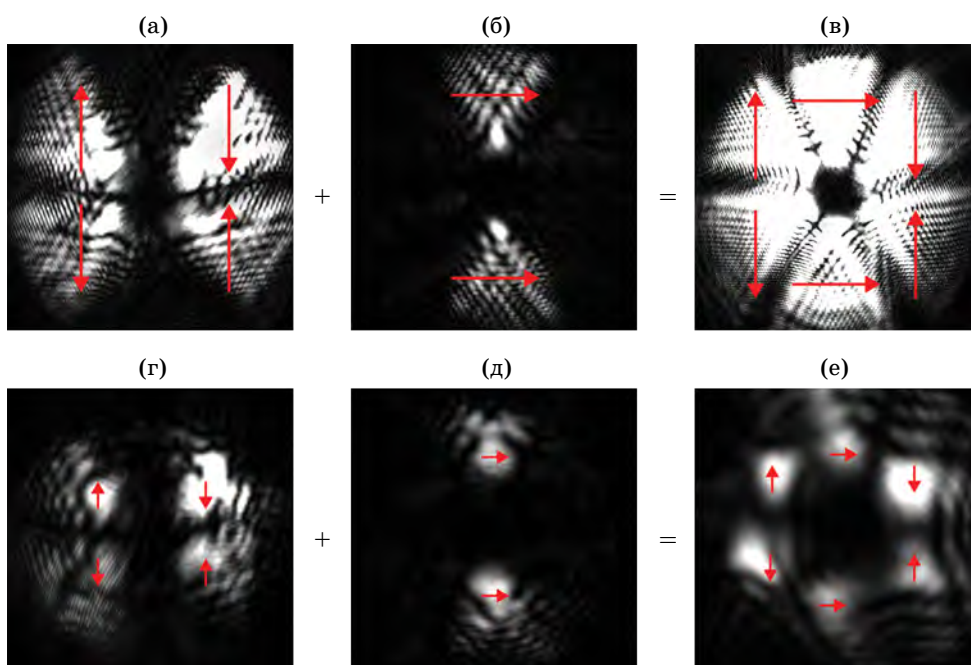


Рис. 6. Распределения интенсивности с поляризатором, установленным горизонтально — (а), (в) и вертикально — (б), (г). Изображения (а) и (б) получены в ближней зоне дифракции, изображения (в), (г) — в дальней. Стрелками на рисунке обозначены векторы поляризации

Fig. 6. Result of observing the intensity distribution with a polarizer installed ((а), (в)) horizontally and ((б), (г)) vertically. Images (а) and (б) were obtained in the near diffraction zone, images (в), (д) — in the far zone. The arrows in the picture denote the polarization vectors

фаз пучков в плечах интерферометра, так как это напрямую влияет на параметр θ в выражении для вектора напряженности электрического поля, записанного в формализме Джонса (8). Таким образом было продемонстрировано, что поляризационный интерферометр Маха–Цендера может быть использован для эффективной генерации кодовых состояний в коммуникационных атмосферных каналах на основе векторных оптических вихрей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Продemonстрированы возможности поляризационного интерферометра Маха–Цендера с кубическими уголковыми отражателями для управляемой генерации скалярных оптических вихрей ± 1 порядков и векторных оптических вихрей 2-го порядка. Переключение между скалярными и векторными вихрями происходит посредством изменения поляризации в плечах интерферометра с помощью полу- и четвертьволновых пластин, а генерация различных скалярных и векторных состояний осуществляется изменением относительной фазы в плечах интерферометра. Это позволяет использовать предложенную систему в качестве генератора кодовых состояний для оптических атмосферных каналов связи на основе скалярных и/или векторных оптических вихрей.

Описанная в статье работа системы с использованием формализма Джонса позволяет рассчитывать параметры схемы (углы поворота кубических уголкового отражателей и волновых пластинок) для переключения между разными режимами генерации. Кроме того, построенные матрицы Джонса могут быть использованы для компьютерного моделирования распределения интенсивности и поляризации на выходе оптической системы.

Использование кубических уголкового отражателей для генерации осесимметричных состояний позволяет формировать пучки с хорошей пространственной поляризационной и фазовой структурой, а также низкой угловой расходимостью, что существенно отличает предложенную систему в контексте задач атмосферных оптических коммуникаций. Исследование влияния метода генерации на статистические особенности малофотонного лазерного излучения также свидетельствует о ее применимости для генерации кодовых состояний в протоколах квантового распределения ключей на основе аксиально-симметричных векторных вихрей [22]. Отдельным вопросом является оценка возможных скоростей генерации аксиально-симметричных состояний в поляризационном интерферометре, а также исследование влияния методов детектирования таких состояний на скорость передачи информации в атмосферном канале связи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Phys. Rev. A*. 1992. V. 45. P. 8185–8189. <http://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
- Soskin M.S., Vasnetsov M.V. Singular optics // *Progress in Optics*. 2001. V. 42. P. 219–276. [http://doi.org/10.1016/S0079-6638\(01\)80018-4](http://doi.org/10.1016/S0079-6638(01)80018-4)
- Zhan Q. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications // *Adv. Opt. Photon.* 2009. V. 1. № 1. P. 1–57. <http://doi.org/10.1364/AOP.1.000001>
- Dorn R., Quabis S., Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91. № 23. P. 233901. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.233901>
- Tidwell S.C., Kimura W.D., Robert C.G. Generating radially polarized beams interferometrically // *Appl. Opt.* 1990. V. 29. № 15. P. 2234–2239. <http://doi.org/10.1364/AO.29.002234>
- Bomzon Z., Kleiner V., Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings // *Opt. Lett.* 2002. V. 27. № 5. P. 285–287. <http://doi.org/10.1364/OL.27.000285>
- Marrucci L., Manzo C., Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. № 16. P. 163905. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.163905>
- Wang X.-L., Ding J., Ni W.-J., et al. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement // *Opt. Lett.* 2007. V. 32. № 24. P. 3549–3551. <http://doi.org/10.1364/OL.32.003549>
- Toussaint K.C., Park J., Gil D.J., et al. Polarization-based diffractive optical elements for the generation of vector beams // *Opt. Lett.* 2005. V. 30. № 21. P. 2846–2848. <http://doi.org/10.1364/OL.30.002846>
- Решетников Д.Д., Рыжая А.А., Павелина М.Е. и др. Интерферометр Маха–Цендера на основе уголкового отражателя и пучки с управляемой поляризационной структурой // *Оптический журнал*. 2025. Т. 92.

- № 3. С. 58–67. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-03-58-67>
- Reshetnikov D.D., Ryzhaya A.A., Pavelina M.E., et al. Mach-Zehnder interferometer based on corner-cube retroreflectors and beams with controlled polarization structure // *J. Opt. Technol.* 2025. V. 92. № 3. P. 176–182. <http://doi.org/10.1364/JOT.92.000176>
11. Wang B., Shi J., Zhang T., et al. Improved lateral resolution with an annular vortex depletion beam in STED microscopy // *Opt. Lett.* 2017. V. 42. № 23. P. 4885–4888. <http://doi.org/10.1364/OL.42.004885>
12. Man Z., Shi W., Zhang Y., et al. Properties of surface plasmon polaritons excited by generalized cylindrical vector beams // *Appl. Phys. B.* 2015. V. 119. P. 125–134. <http://doi.org/10.1007/s00340-015-6064-6>
13. Matsusaka S., Kozawa Y., Sato S. Micro-hole drilling by tightly focused vector beams // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. № 7. P. 1542–1545. <http://doi.org/10.1364/OL.43.001542>
14. Roxworthy B.J., Toussaint K.C.Jr. Optical trapping with π -phase cylindrical vector beams // *New J. Phys.* 2010. V. 12. P. 073012. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/12/7/073012>
15. Ren Y., Wang Z., Xie G., et al. Free-space optical communications using orbital-angular-momentum multiplexing combined with MIMO-based spatial multiplexing // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 18. P. 4210–4213. <https://doi.org/10.1364/OL.40.004210>
16. Milione G., Lavery M.P.J., Huang H., et al. 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 9. P. 1980–1983. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001980>
17. Ndagano B., Nape I., Cox M.A., et al. Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication // *J. Lightwave Technol.* 2018. V. 36. № 2. P. 292–301. <http://doi.org/10.1109/JLT.2017.2766760>
18. Parigi V., D'Ambrosio V., Arnold C., et al. Storage and retrieval of vector beams of light in a multiple-degree-of-freedom quantum memory // *Nature Commun.* 2015. V. 6. P. 7706. <http://doi.org/10.1038/ncomms8706>
19. Sokolov A.L., Murashkin V.V. Retroreflective spatial-polarization interferometer // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. № 32. P. 9912–9923. <http://doi.org/10.1364/AO.403232>
20. Nagali E., Sciarrino F. Manipulation of photonic orbital angular momentum for quantum information processing // *Advanced Photonic Sci. InTech*; 2012. <http://doi.org/10.5772/27653>
21. Соколов А.Л., Мурашкин В.В. Дифракционные поляриационные оптические элементы с радиальной симметрией // *Оптика и спектроскопия.* 2011. Т. 111. С. 900–907.
- Sokolov A.L., Murashkin V.V. Diffraction polarization optical elements with radial symmetry // *Opt. Spectrosc.* 2011. V. 111. P. 859–865. <https://doi.org/10.1134/S0030400X11130212>
22. Решетников Д.Д., Соколов А.Л., Вашукевич Е.А. и др. Протокол квантового распределения ключа на аксиально-симметричных поляриационных пучках в атмосферном канале // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2024. Т. 67. № 1. С. 58–72. https://doi.org/10.5245/2/00213462_2024_67_01_58
- Reshetnikov D.D., Sokolov A.L., Vashukevich E.A., et al. Quantum key distribution protocol using axially symmetric polarization beams in an atmospheric channel // *Radiophys Quantum El.* 2024. V. 67. P. 51–63. <http://doi.org/10.1007/s11141-025-10352-z>

АВТОРЫ

Даниил Дмитриевич Решетников — аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 58996059000; <https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>; d.d.reshetnikov@gmail.com

Мария Евгеньевна Павеллина — аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0009-0009-6176-1421>; pavelina.maria@yandex.ru

Анастасия Александровна Рыжая — аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-9574-1802>; ryzhaya.nastya1999@gmail.com

Екатерина Владимировна Малютина — магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0009-0008-4693-2037>; emmaljutina@gmail.com

Александр Алексеевич Севрюгин — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 56352113900; <https://orcid.org/0000-0002-5982-7892>; sevr_sasha@mail.ru

Евгений Александрович Вашукевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский госу-

AUTHORS

Daniil D. Reshetnikov — PhD Student, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 58996059000; <https://orcid.org/0009-0001-5587-3306>; d.d.reshetnikov@gmail.com

Maria Evgenevna Pavelina — PhD Student, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0009-0009-6176-1421>; pavelina.maria@yandex.ru

Anastasia A. Ryzhaya — PhD Student, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, 197022, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9574-1802>; ryzhaya.nastya1999@gmail.com

Ekaterina V. Malyutina — Master Student, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-4693-2037>; emmaljutina@gmail.com

Alexander A. Sevryugin — PhD (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, 197022, Russia; Scopus ID: 56352113900; <https://orcid.org/0000-0002-5982-7892>; sevr_sasha@mail.ru

Evgenii A. Vashukevich — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Saint Petersburg State University, St. Peters-

дарственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 57205020217; <https://orcid.org/0000-0002-5815-0103>; vashukevichea@gmail.com

Виктор Михайлович Петров — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 24773525500; <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>; vikpetroff@mail.ru

Владимир Юрьевич Венидиктов — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, 197022, Россия; профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 7004670701; <https://orcid.org/0000-0002-0728-2050>; vlad.venediktov@mail.ru

burg, 199034, Russia; Scopus ID: 57205020217; <https://orcid.org/0000-0002-5815-0103>; vashukevichea@gmail.com

Viktor Mikhailovich Petrov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor at the Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 24773525500; <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>; vikpetroff@mail.ru

Vladimir Yu. Venediktov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor at the Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russia; Professor at the Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 7004670701; <https://orcid.org/0000-0002-0728-2050>; vlad.venediktov@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 31.10.2025
Одобрена после рецензирования 11.12.2025
Принята к печати 30.01.2026*

*The article was submitted to the editorial office 31.10.2025
Approved after review 11.12.2025
Accepted for publication 30.01.2026*