

Формирование цилиндрических векторных пучков высоких порядков при помощи секторных сэндвич-структур

С.В. Карпеев^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, С.А. Дегтярев^{1,2}, А.М. Алгубили²

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Рассмотрены сложные поляризационно-фазовые преобразования, которые реализуются с использованием простых в изготовлении оптических элементов. Технология изготовления таких элементов базируется на аксиально-симметричной дискретизации требуемых поляризационных и фазовых распределений. Такое представление приводит к оптическим элементам в виде секторных сэндвич-структур, состоящих из сложенных вместе поляризационной и фазовой пластин. В работе численно и экспериментально исследованы основные типы таких секторных сэндвич-структур для формирования цилиндрических поляризаций 2-го порядка.

Ключевые слова: векторные пучки, секторные сэндвич-структуры.

Цитирование: Карпеев, С.В. Формирование цилиндрических векторных пучков высоких порядков при помощи секторных сэндвич-структур / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, С.А. Дегтярев, А.М. Алгубили // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 5. – С. 682-691. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Degtyarev SA, Algubili AM. Formation of high-order cylindrical vector beams with sector sandwich structures. Computer Optics 2022; 46(5): 682-691. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.

Введение

Цилиндрические векторные пучки различных порядков [1] представляют практический интерес в таких областях, как уплотненная оптическая передача данных [2–7], амплитудно-поляризационное модулирование фокальных распределений [8–17], формирование 3D-распределений поля в фокальной области [18–24], улучшение разрешения в микроскопии [25–27], оптический захват и микроманипулирование [28–30], лазерная обработка и структурирование поверхностей [31–34], создание изображений экзопланет [35, 36]. Многие приложения могут быть основаны на явлении так называемого обратного потока [37, 38], возникающего при фокусировке радиально-поляризованных пучков высокого порядка. При этом интегральный обратный поток энергии увеличивается с ростом топологического порядка радиально поляризованного пучка [37]. Таким образом, формирование цилиндрических пучков высокого порядка является актуальной задачей.

Исследованию способов получения цилиндрических векторных пучков, в том числе и высоких порядков, посвящено в последние годы значительное число работ. Среди основных подходов можно назвать поляризационные преобразования исходного пучка на основе интерференционных схем [39–43], с использованием анизотропных кристаллов [44–47], с помощью жидкокристаллических поляризационных модуляторов (ЖПМ) [48–52] и цифровых микрзеркальных устройств (ЦМУ) [53–55], с помощью Q- и

S-пластинок [56–59], субволновых решёток [60–64], дифракционных оптических элементов и металинз [65–66], а также с помощью кристаллических [67, 68] и плёночных [69–71] секторных пластинок. Непрерывным аналогом секторных пластинок является использование интерференционного поляризатора [72, 73]. У всех методов есть свои плюсы и свои минусы. ЖПМ и ЦМУ преобразуют поляризацию лишь части прошедшего света, тем самым снижая *polarization extinction ratio*. У преобразователя на основе субволновых решёток эффективность и, следовательно, поляризационный контраст меняются в зависимости от угла поворота плоскости поляризации. Правда, минус субволновых поляризационных решёток, заключающийся в неравномерности френелевских отражений, можно обойти, комбинируя в соседних зонах Френеля субволновые решётки с ортогональными штрихами [63, 64, 74]. Следует также отметить, что для инфракрасного диапазона технология изготовления субволновых решёток несколько проще в силу большей длины волны.

Основным плюсом всех типов секторных преобразователей является самая низкая стоимость за единицу площади и простота использования. Основным фактором, ухудшающим качество сформированных пучков и, соответственно, усложняющим технологию изготовления, являются стыки секторов. Кроме того, для преобразователей, у которых в качестве исходной применяется круговая поляризация [66, 70], характерным является наличие вихревой фазы в сформированном пучке [75]. Получается так называемая «псев-

дорадиальная» поляризация, и для её коррекции требуется дополнительное преобразование фазы при помощи фазовых пластинок [36, 71]. Однако это имеет и положительный эффект, поскольку увеличивается число степеней свободы для формирования различных поляризаций высоких порядков путём простой смены взаимного углового положения секторных поляризационной и фазовой пластин. Технологически это легко осуществимо, поскольку сектора поляризационной плёнки и фазовая пластина (*phase-shifter*) исполнены в виде отдельных пластин. В настоящей работе предлагается несколько вариантов таких трансформаций.

1. Моделирование в приближении тонких оптических элементов

При моделировании действия секторных поляризаторов, собранных из поляризационных плёнок, использовалось следующее выражение для идеальных линейных поляризаторов:

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{0x}(x, y) \\ E_{0y}(x, y) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{pmatrix} E_{0x}(x, y) \\ E_{0y}(x, y) \end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix} E_{0x}(x, y) \\ E_{0y}(x, y) \end{pmatrix} -$$

вектора поперечных электрических компонент исходного и преобразованного поля соответственно, θ – угол ориентации поляризатора к оси x .

Для постоянного поля с круговой поляризацией с учётом нормировки поляризационных коэффициентов входное поле выражается значением:

$$(1/\sqrt{2})(1, i)^T.$$

С учётом этого выражение (1) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + i \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta + i \sin^2 \theta \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \theta (\cos \theta + i \sin \theta) \\ \sin \theta (\cos \theta + i \sin \theta) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \exp(i\theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Результаты моделирования для некоторых поляризационных секторных пластинок, а также поляризационных пластинок, сложенных с фазовыми секторными пластинками, приведены далее. В табл. 1 приведены структуры и обозначения неоднородных поляризаций первого и второго порядков. Очевидно, если расположить секторные плёнки вдоль радиальных линий (что соответствует первой строке в табл. 1 – тип P1r), то в результате получим радиальную поляризацию первого порядка с фазовым вихрем первого порядка:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + i \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta + i \sin^2 \theta \end{pmatrix} &= \\ &= \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - i \begin{pmatrix} -\sin 2\theta \\ \cos 2\theta \end{pmatrix} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{pmatrix} - i \begin{pmatrix} -\sin 2\theta \\ \cos 2\theta \end{pmatrix} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \exp(i2\theta) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Восьмисекторная поляризационная пластинка типа P1r при освещении пучком с круговой поляризацией будет выделять в различных секторах различное направление в соответствии с (2). В частности,

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{cases} (1, 0)^T, \theta = 0, \\ (1+i)(1, 1)^T/2, \theta = 45^\circ, \\ i(0, 1)^T, \theta = 90^\circ, \\ (1-i)(-1, 1)^T/2, \theta = 135^\circ, \\ (1, 0)^T, \theta = 180^\circ, \\ (1+i)(1, 1)^T/2, \theta = 225^\circ, \\ i(0, 1)^T, \theta = 270^\circ, \\ (1-i)(-1, 1)^T/2, \theta = 315^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

Известны возможности анализа цилиндрических поляризационных состояний с использованием дифракционных решёток [76–78] и многоканальных ДОО [79, 80], которые активно применяются для (де-)мультиплексирования структурированных пучков [81–83].

Для распознавания поляризационных распределений мы также воспользовались многоканальным вихревым пространственным фильтром, согласованным с угловыми гармониками первых трёх порядков (рис. 1).

На рис. 1в показано изображение распределения интенсивности в фокусе оптической системы, состоящей из лазерного источника света с Гауссовым распределением света с круговой поляризацией (рис. 1а), фильтра, линзы. В результате таким фильтром формируется набор вихревых пучков с порядками от +1 до +3 и соответствующих им симметричных порядков от –1 до –3, расположенных вблизи оси симметрии, при освещении фильтра Гауссовым пучком с круговой поляризацией (рис. 1б). Данный фильтр может указывать на наличие вихревой составляющей в Гауссовом пучке при возникновении корреляционных пиков в соответствующих областях изображения. Наличие нескольких корреляционных пиков может указывать на вихревую сингулярность с дробным значением порядка между значениями порядков, соответствующих порядкам, в области которых возникли корреляционные пики.

Табл. 1. Структура и обозначения неоднородных поляризаций первого и второго порядков

| Обозначение | Вектор Джонса в декартовом пространстве | Взаимосвязь между ψ и φ | Поляризационная структура |
|-------------|---|--------------------------------------|---------------------------|
| P1r | $\begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = \varphi$ | |
| P1a | $\begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = \varphi + 90^\circ$ | |
| N1r | $\begin{pmatrix} \cos \varphi \\ -\sin \varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = -\varphi$ | |
| N1a | $\begin{pmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = -\varphi + 90^\circ$ | |
| P2r | $\begin{pmatrix} \cos 2\varphi \\ \sin 2\varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = 2\varphi$ | |
| P2a | $\begin{pmatrix} -\sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = 2\varphi + 90^\circ$ | |
| N2r | $\begin{pmatrix} \cos 2\varphi \\ -\sin 2\varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = -2\varphi$ | |
| N2a | $\begin{pmatrix} \sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi \end{pmatrix}$ | $\psi = -2\varphi + 90^\circ$ | |

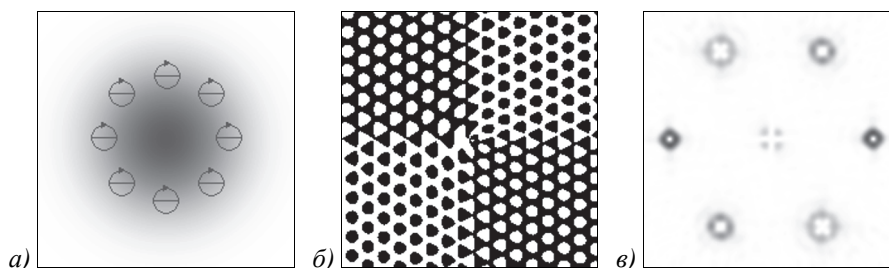


Рис. 1. Анализ Гауссова пучка с круговой поляризацией (а) многоканальным вихревым фильтром (б); распределение интенсивности в фокальной плоскости (в)

Используя аналогичный принцип, проведём моделирование работы оптической системы, состоящей из лазерного источника света, 8-секторной пластинки (рис. 2а) для формирования поля типа P1r, фазовой пластинки и линзы. Для анализа влияния на поляризационные состояния фазовой пластинки также используем многоканальный ДОЭ, описанный нами ранее. Относительное расположение 2-секторной фазо-

вой пластинки и 8-секторной поляризационной плёнки показано на рис. 2з. Как видно, использование секторной поляризационной плёнки позволяет сформировать радиальную поляризацию только на периферии сфокусированного поля (рис. 2б), а в центре сохраняется круговая поляризация. Анализ поля с помощью многоканального вихревого фильтра показывает наличие вихревой сингулярности 2-го порядка

(рис. 2в), которая возникает из-за спин-орбитального взаимодействия [71, 72, 75, 85–88]. Дополнение секторной поляризационной плёнки 2-секторной фазовой пластинкой (рис. 2з), которая фактически соот-

ветствует угловой косинусной функции первого порядка [58, 89], позволяет компенсировать вихревую сингулярность 1-го порядка и получить частично радиально поляризованное поле (рис. 2д).

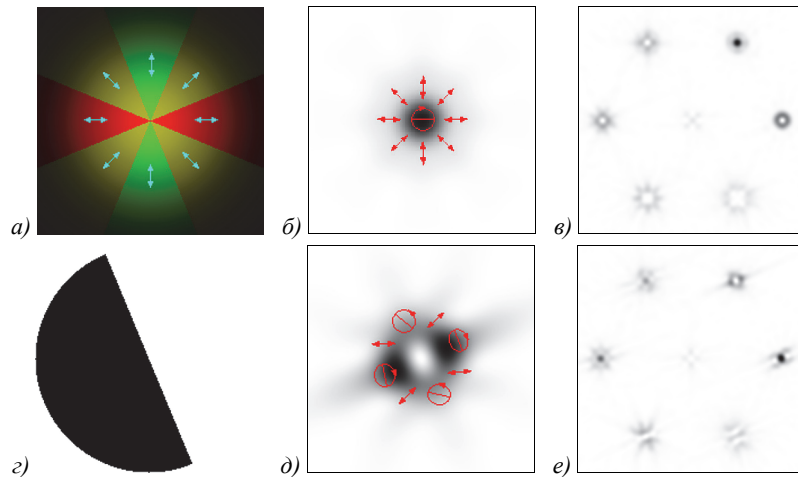


Рис. 2. Поляризационное преобразование Гауссова пучка с круговой поляризацией при прохождении 8-секторной поляризационной пленки (верхняя строка), дополненной фазовой половинной пластинкой (нижняя строка): схема расположения секторов поляризационной пленки (X-компонента – красный цвет, Y-компонента – зеленый цвет) (а) и 2-секторной фазовой пластинки (з), сфокусированное распределение интенсивности (б, д), распределение интенсивности в фокальной плоскости при наличии многоканального вихревого фильтра (в, е)

Используя описанный нами подход по анализу работы оптической системы с секторной пластинкой, рассмотрим работу 8-секторной пластинки для формирования поля типа P2a. На рис. 3 показано формирование и анализ поля типа P2a на основе поляризационного преобразования Гауссова пучка с круговой поляризацией при прохождении 8-секторной поляризационной плёнки, дополненной 4-секторной фазовой пластинкой. Как видно, использование 8-секторной поляризационной плёнки с другим расположением секторов (рис. 3а) позволяет сформировать поле с азимутальной поляризацией 2-го порядка на периферии и круговой поляризацией в центре (рис. 3б). Ана-

лиз поля с помощью многоканального вихревого фильтра показывает отсутствие вихревых сингулярностей, которые принципиально должны быть у цилиндрически поляризованных пучков. Поэтому для внесения их использовалась 4-секторная фазовая пластинка (рис. 3з), которая фактически соответствует угловой синусной функции второго порядка [58, 89]. В результате удалось получить азимутально поляризованное поле хорошего качества (рис. 3д), что и подтверждает анализ с помощью многоканального вихревого фильтра (рис. 3е), где наилучшим образом выделяются корреляционные пики, соответствующие второму порядку.

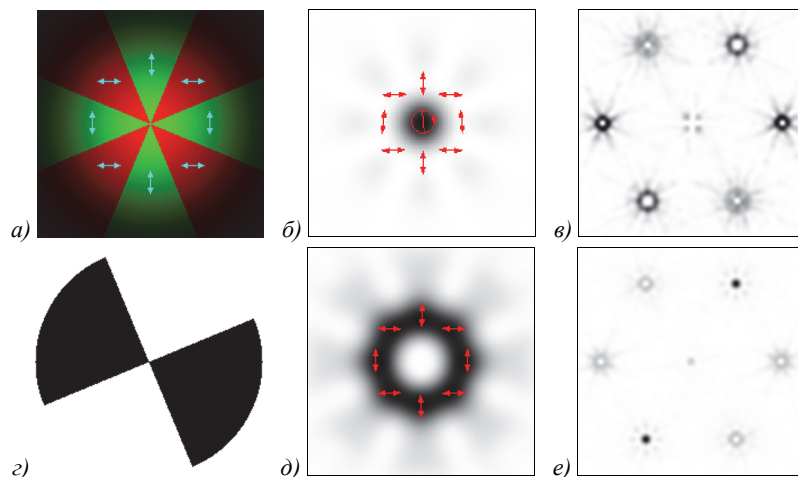


Рис. 3. Поляризационное преобразование Гауссова пучка с круговой поляризацией при прохождении 8-секторной поляризационной плёнки (верхняя строка), дополненной фазовой половинной пластинкой (нижняя строка): схема расположения секторов поляризационной плёнки (X-компонента – красный цвет, Y-компонента – зелёный цвет) (а) и 4-секторной фазовой пластинки (з), сфокусированное распределение интенсивности (б, д), распределение интенсивности в фокальной плоскости при наличии многоканального вихревого фильтра (в, е)

2. Моделирование с использованием метода конечных элементов

Пусть на секторную пластинку падает лазерный пучок с круговой поляризацией, оптические оси пучка и пластинки совпадают и направлены вдоль оси z .

Общий вид 8-секторной пластинки представлен на рис. 4.

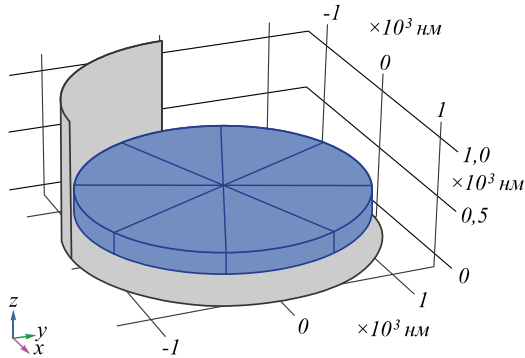


Рис. 4. Модель 8-секторной дихроичной пластинки в системе моделирования Comsol

Секторная пластинка состоит из 8 секторов, выполненных из дихроичного материала. Рассматриваемый материал пропускает электромагнитную волну с линейно поляризованным электрическим вектором, ориентированным вдоль одной выделенной оси. Все остальные волны поглощаются. В простейшем случае данный материал можно описать следующим образом. Если требуется, чтобы пластинка, выполненная из данного материала, пропускала поляризацию

$$\epsilon_l = \begin{pmatrix} 2,7556 + 16i \cdot \sin^2\left(\frac{\pi l}{4}\right) & -16i \cdot \sin\left(\frac{\pi l}{4}\right) \cos\left(\frac{\pi l}{4}\right) & 0 \\ -16i \cdot \sin\left(\frac{\pi l}{4}\right) \cos\left(\frac{\pi l}{4}\right) & 2,7556 + 16i \cdot \cos^2\left(\frac{\pi l}{4}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 2,7556 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Данное выражение для тензора диэлектрической проницаемости и использовалось при моделировании в программном пакете Comsol. В качестве исходных параметров моделирования были выбраны: толщина пластинки – 200 нм; длина волны составляла 633 нм; диаметр пластинки равен 1066 нм; диаметр расчётной области – 4λ ; высота расчётной области – 3λ .

Результаты моделирования работы элемента представлены на рис. 5. Луч с круговой поляризацией проходит через элемент и теряет одну из компонент вектора Джонса из-за дихроичного поглощения. Для моделирования используется программное обеспечение Comsol.

Согласно формуле (2) при освещении секторной пластинки круговой поляризацией формируется вихревой радиально-поляризованный пучок. Картины распределения электромагнитного поля пучка после прохождения секторной пластинки показаны на

вдоль оси x , тогда тензор диэлектрической проницаемости материала должен иметь вид:

$$\epsilon = \begin{pmatrix} 2,7556 & 0 & 0 \\ 0 & 2,7556 + 16i & 0 \\ 0 & 0 & 2,7556 \end{pmatrix} \quad (5)$$

В матрице (1) на позиции (2,2) член имеет мнимую часть, что говорит о том, что составляющая электрического вектора вдоль оси y затухает в материале. Для того чтобы на выходе формировался пучок с радиальной поляризацией, каждый сектор должен быть ориентирован таким образом, чтобы пропускать поляризацию, ориентированную по радиусу. Таким образом, в каждом из восьми секторов тензор диэлектрической проницаемости (1) должен быть повернут на угол, соответствующий пропусканию волны, поляризованной вдоль радиуса. Если секторов 8, то угол поворота должен быть равен:

$$\phi = \frac{2\pi}{8}l = \frac{\pi}{4}l, \quad (6)$$

где l – номер сектора.

Тогда тензор диэлектрической проницаемости l -го сектора будет иметь вид:

$$\epsilon_l = R_\phi \epsilon R_{-\phi}, \quad (7)$$

где $R_\phi, R_{-\phi}$ – матрицы, поворачивающие системы координат на угол ϕ .

В итоге имеем:

рис. 5. Картины распределения электромагнитного поля пучка после прохождения секторной пластинки с добавлением вихревой фазы показаны на рис. 6. Чёрные стрелочки показывают направление вектора электрического поля.

Рассмотрим прохождение радиально поляризованного вихревого пучка с фокусирующей фазой ($NA=0,5$) через дихроичную секторную пластинку. Картины распределения электромагнитного поля и отдельных компонент показаны на рис. 7.

Как видно, результаты моделирования сендвич-структуры на основе 8-секторной пластинки и фазовой пластинки методом конечных элементов и моделирование в приближении тонких элементов показали хорошее сходство картин распределений электромагнитного поля как в случае с фокусировкой, так и в её отсутствие. Далее проведём экспериментальную проверку и сравнение теоретических моделей с результатами эксперимента.

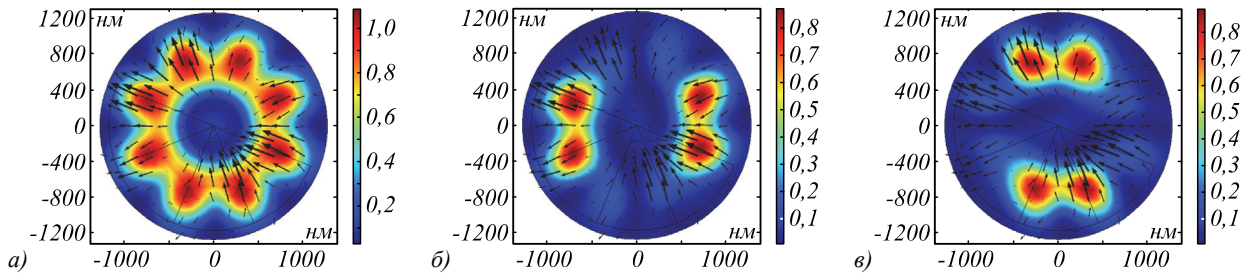


Рис. 5. Формирование радиально-поляризованного пучка с вихрем при освещении секторной пластинки пучком с круговой поляризацией: а) при отсутствии анализатора, б) при положении анализатора 90°, в) при положении анализатора 0°

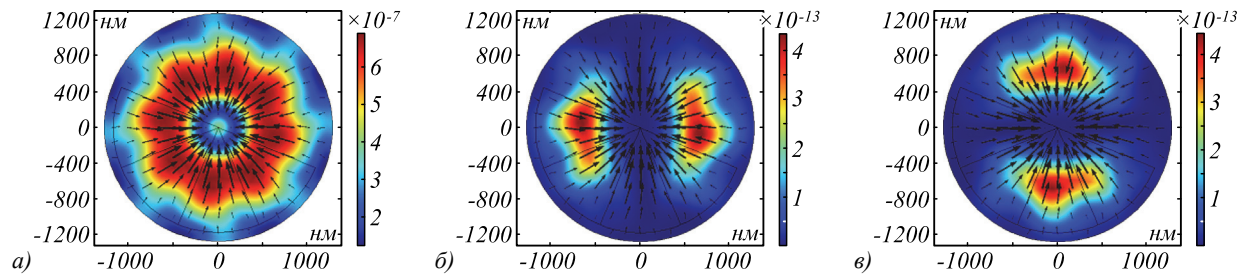


Рис. 6. Формирование радиально поляризованного пучка с плоским волновым фронтом при освещении секторной пластинки пучком с круговой поляризацией и вихревой фазой порядка -1 : а) при отсутствии анализатора, б) при положении анализатора 90°, в) при положении анализатора 0°

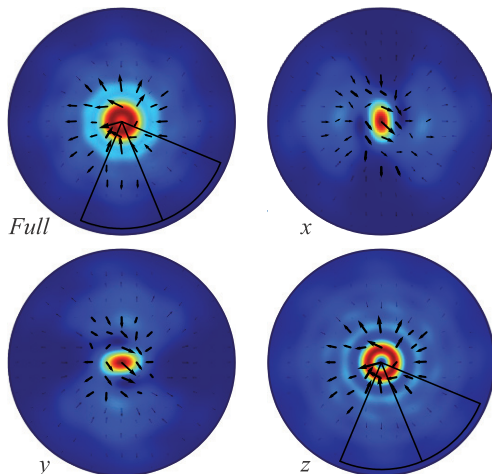


Рис. 7. Формирование сфокусированного радиально поляризованного пучка при освещении секторной пластинки пучком с круговой поляризацией, вихревой фазой порядка -1 , также в фазу добавлена фокусирующая ($NA = 0,5$)

3. Экспериментальные исследования

Для исследований были изготовлены поляризационные секторные пластинки для формирования радиальной поляризации первого порядка и азимутальной второго порядка (P1r и P2a, см. табл. 1). Пластинки составлялись из секторов, вырезанных на плоттере с необходимым направлением поляризационных осей, которые затем собирались на стеклянной подложке. Как следует из результатов моделирования, к ним необходимы фазовые пластинки, имеющие фазосдвигающие области в виде полуплоскости и в виде квадрантов. Такие пластинки были протравлены на кварцевых подложках по фотошаблонам, изготовленным на лазерном фотопостроителе CLWS-200S.

Экспериментальная установка представлена на рис. 8.

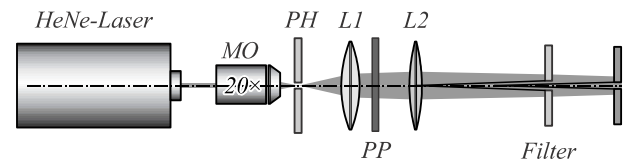


Рис. 8. Экспериментальная оптическая установка: HeNe – лазер ($\lambda = 633$ нм), MO – микрообъектив ($NA = 0,1$), PH – пинхол (размер апертуры 10 мкм), L1, L2 – коллимирующая и фокусирующая линзы соответственно с фокусным расстоянием 250 и 600 мм, QP – четвертьволновая пластинка, PP – поляризационная пластинка, DOE – многоканальный пространственный фильтр-анализатор

Оптическая установка содержит He-Ne лазер, четвертьволновую пластинку ПП, расширитель пучка в виде 20× микрообъектива и линзы Л1, ДОЭ, который может представлять собой соответствующую секторную поляризационную пластинку, сложенную при необходимости с фазовой пластинкой, многоканальный пространственный фильтр, Фурье-преобразующую линзу Л2 и ПЗС-камеру (CCD).

Для демонстрации работы секторов секторной пластики из оптической схемы уберём пространственный фильтр и фокусирующую линзу Л2. При этом мы получим на ПЗС-камере распределение излучения, прошедшее сквозь сектора, и при анализе состояния поляризации поворачиванием на различные углы поляризатора, установленного в схему, можно отметить поочерёдное «переключение» интенсивности в областях экрана, соответствующих определённым секторам секторной пластинки. Данные распределения приведены в табл. 2.

По табл. 2 можно отметить, что положение осей секторов пластинки полностью соответствует поло-

жению осей, указанных в табл. 1 для формирования азимутальных и радиальных пучков.

Табл. 2. Распределения интенсивности, сформированные секторными пластинками, полученные при различных положениях анализатора

| Положения оси | 0° | -45° | 45° | 90° |
|---------------|----|------|-----|-----|
| Элемент Pr1 | | | | |
| Элемент Pa2 | | | | |

Для получения радиальной и азимутальной поляризации сфокусированного Гауссова пучка дополним секторную пластинку фазовой пластинкой и проведём анализ с использованием изготовленного многоканального пространственного фильтра. Распределения интенсивности, полученные с использованием восьмисекторных поляризационных пластин "P1r" и "P2a" и двухсекторной или четырёхсекторной фазовой пластины, показаны на рис. 9а, б и 10а, б.

Заключение

Таким образом, нами было проведено моделирование фокусировки пучков, сформированных секторными сэндвич-структурами, состоящими из секторных поляризационных пластинок, аппроксимирующих неоднородные поляризации первого и второго порядков, и фазовых секторных пластинок. Моделирование проведено как в приближении тонкого элемента, так и в трёхмерном векторном виде на основе численного решения уравнений Максвелла, реализованного в программном пакете Comsol. Последняя модель учитывает характер распространения излучения через толщу дихроичного материала и более точно описывает процесс формирования радиально поляризованного пучка. Проведённое моделирование показало возможность определения порядка неоднородной поляризации при помощи вихревого многопорядкового фильтра. На основе численного моделирования показана возможность формирования радиально поляризованного пучка с помощью дихроичной восьмисекторной пластинки. Показано, что при освещении восьмисекторной дихроичной пластинки лазерным пучком с круговой поляризацией формируется вихревой радиально поляризованный пучок, а при освещении пластинки вихревым пучком с круговой поляризацией и порядком вихря -1 формируется радиально поляризованный пучок с плоским волновым фронтом. Изготовлены секторные пластинки для формирования радиальной поляризации первого порядка и азимутальной второго порядка и необходимые к ним фазовые пластинки. Результаты экспериментов, проведённые с изготовленными пластинками, согласуются с результатами моделирования по методу конечных элементов и в приближении тонкого элемента. Предложенный подход на основе использования секторных пластинок к формированию радиальной и азимутальной поляризации высоких порядков обусловлен простотой изготовления, а сами элементы имеют компактные размеры и хорошо комбинируются с другими подходами для сочетания с ДОЭ, как, например, [90].

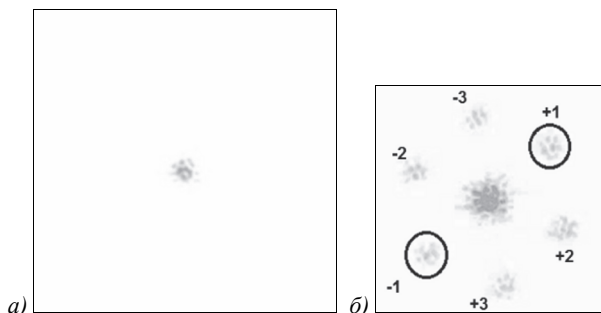


Рис. 9. Распределение интенсивности P1r в фокусе объектива с использованием дополнительной двухсекторной фазовой пластины: а) без пространственного фильтра, б) с пространственным фильтром

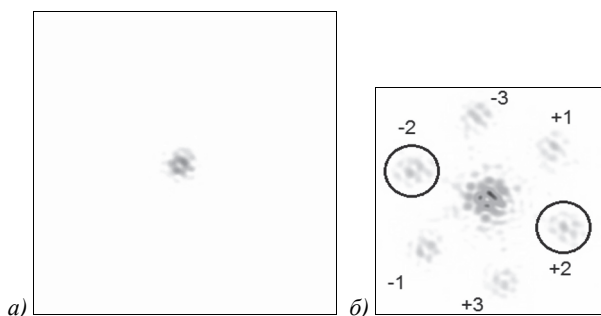


Рис. 10. Распределение интенсивности, соответствующей положению секторов, для формирования пучка "P2a" в фокусе объектива использования фазовой пластины с применением дополнительной 4-секторной фазовой пластины: а) без пространственного фильтра, б) с использованием дополнительного пространственного фильтра

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00041.

References

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon* 2009; 1(1): 1-57.
- [2] Zhou P, Wang X, Ma Y, Ma H, Xu X, Liu Z. Propagation property of a nonuniformly polarized beam array in turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2011; 50: 1234-1239.
- [3] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Leach J, Lavery MPJ, Padgett MJ, Boyd RW. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding. *Opt Express* 2012; 20(12): 13195-13200.
- [4] Dong Y, Cai Y, Zhao C, Yao M. Statistical properties of a cylindrical vector partially coherent beam in turbulent atmosphere. *Appl Phys B* 2013; 112(2): 247-259.
- [5] Millione G, Nguyen ThA, Leach J, Nolan DA, Alfano RR. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication. *Opt Lett* 2015; 40(21): 4887-4890.
- [6] Chen ZY, Yan LS, Pan Y, Jiang L, Yi AL, Pan W, Luo B. Use of polarization freedom beyond polarization-division multiplexing to support high-speed and spectral-efficient data transmission. *Light Sci Appl* 2017; 6: e16207.
- [7] Qiao W, Lei T, Wu Z, Gao S, Li Z, Yuan X. Approach to multiplexing fiber communication with cylindrical vector beams. *Opt Lett* 2017; 42(13): 2579-2582.
- [8] Borghi R, Santarsiero M, Alonso MA. Highly focused spirally polarized beams. *J Opt Soc Am A* 2005; 22(7): 1420-1431.
- [9] Kozawa Y, Sato S. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams. *J Opt Soc Am A* 2007; 24(6): 1793-1798.
- [10] Rashid M, Marago OM, Jones PH. Focusing of high order cylindrical vector beams. *J Opt* 2009; 11(6): 065204.
- [11] Rao L, Pu J, Chen Z, Yei P. Focus shaping of cylindrically polarized vortex beams by a high numerical-aperture lens. *Opt Laser Technol* 2009; 41(3): 241-246.
- [12] Khonina SN, Golub I. Enlightening darkness to diffraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(7): 1470-1474. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001470.
- [13] Zhou Z, Zhu L. Tight focusing of axially symmetric polarized beams with fractional orders. *Opt Quant Electron* 2015; 48(44): 44.
- [14] Porfirev AP, Ustinov AV, Khonina SN. Polarization conversion when focusing cylindrically polarized vortex beams. *Sci Rep* 2016; 6(1): 6. DOI: 10.1038/s41598-016-0015-2.
- [15] Man Z, Bai Z, Zhang S, Li X, Li J, Ge X, Zhang Y, Fu S. Redistributing the energy flow of a tightly focused radially polarized optical field by designing phase masks. *Opt Express* 2018; 26(18): 23935-23944.
- [16] Porfirev AP, Khonina SN. Astigmatic transformation of optical vortex beams with high-order cylindrical polarization. *J Opt Soc Am B* 2019; 36(8): 2193-2201. DOI: 10.1364/JOSAB.36.002193.
- [17] Khonina SN. Vortex beams with high-order cylindrical polarization: features of focal distributions. *Appl Phys B* 2019; 125: 100. DOI: 10.1007/s00340-019-7212-1.
- [18] Youngworth KS, Brown TG. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams. *Opt Express* 2000; 7: 77-87.
- [19] Chen W, Zhan Q. Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams. *Opt Commun* 2006; 265: 411-417.
- [20] Wang XL, Ding J, Qin JQ, Chen J, Fan YX, Wang HT. Configurable three-dimensional optical cage generated from cylindrical beams. *Opt Commun* 2009; 282: 3421-3425.
- [21] Khonina SN, Golub I. Engineering the smallest 3D symmetrical bright and dark focal spots. *J Opt Soc Am A* 2013; 30(10): 2029-2033. DOI: 10.1364/JOSAA.30.002029.
- [22] Khonina SN, Ustinov AV, Volotovskiy SG. Shaping of spherical light intensity based on the interference of tightly focused beams with different polarizations. *Opt Laser Technol* 2014; 60: 99-106. DOI: 10.1016/j.optlastec.2014.01.012.
- [23] Qin F, Huang K, Wu J, Jiao J, Luo X, Qiu C, Hong M. Shaping a subwavelength needle with ultra-long focal length by focusing azimuthally polarized light. *Sci Rep* 2015; 5: 9977.
- [24] Man Z, Bai Z, Li J, Zhang S, Li X, Zhang Y, Ge X, Fu S. Optical cage generated by azimuthal- and radial-variant vector beams. *Appl Opt* 2018; 57: 3592-3597.
- [25] Török P, Munro PRT. The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy. *Opt Express* 2004; 12: 3605-3617.
- [26] Bokor N, Iketabi Y, Watanabe T, Daigoku K, Davidson N, Fujii M. On polarization effects in fluorescence depletion microscopy. *Opt Commun* 2007; 272: 263-268.
- [27] Khonina SN, Golub I. How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(10): 2242-2246. DOI: 10.1364/JOSAA.29.002242.
- [28] Yan S, Yao B. Radiation forces of a highly focused radially polarized beam on spherical particles. *Phys Rev A* 2007; 76(5): 053836.
- [29] Xue Y, Wang Y, Zhou S, Chen H, Rui G, Gu B, Zhan Q. Focus shaping and optical manipulation using highly focused second-order full Poincaré beam. *J Opt Soc Am A* 2018; 35: 953-958.
- [30] Shi P, Du L, Yuan X. Structured spin angular momentum in highly focused cylindrical vector vortex beams for optical manipulation. *Opt Express* 2018; 26(18): 23449-23459.
- [31] Kraus M, Ahmed MA, Michalowski A, Voss A, Weber R, Graf T. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization. *Opt Express* 2010; 18: 22305-22313.
- [32] Nivas JJJ, Cardano F, Song Z, Rubano A, Fittipaldi R, Vecchione A, Paparo D, Marrucci L, Bruzzese R, Amoroso S. Surface structuring with polarization-singular femtosecond laser beams generated by a q-plate. *Sci Rep* 2017; 7: 42142.
- [33] Kudryashov SI, Danilov PA, Porfirev AP, Saraeva IN, Rudenko AA, Busleev NI, Umanskaya SF, Kuchmizhak AA, Zayarny DA, Ionin AA, Khonina SN. Symmetry-wise nanopatterning and plasmonic excitation of ring-like gold nanoholes by structured femtosecond laser pulses with different polarizations. *Opt Lett* 2019; 44(5): 1129-1132. DOI: 10.1364/OL.44.001129.
- [34] Syubaev SA, Zhizhchenko AY, Pavlov DV, Gurbatov SO, Pustovalov EV, Porfirev AP, Khonina SN, Kulinich SA, Rayappan JBB, Kudryashov SI, Kuchmizhak AA. Plasmonic nanolenses produced by cylindrical vector beam printing for sensing applications. *Sci Rep* 2019; 9: 19750. DOI: 10.1038/s41598-019-56077-8.
- [35] Mawet D, Riaud P, Surdej J, Baudrand J. Subwavelength surface-relief gratings for stellar coronagraphy. *Appl Opt* 2005; 44(34): 7313-7321.

- [36] Mawet D, Serabyn E, Liewer K, Burruss R, Hickey J, Shemo D. The vector vortex coronagraph: Laboratory results and first light at palomar observatory. *Astrophys J* 2010; 709(1): 53-57.
- [37] Khonina SN, Ustinov AV, Degtyarev SA. Inverse energy flux of focused radially polarized optical beams. *Phys Rev A* 2018; 98(4): 043823. DOI: 10.1103/PhysRevA.98.043823.
- [38] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Energy backflow in the focus of a lightbeam with phase or polarization singularity. *Phys Rev A* 2019; 99(3): 033840. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
- [39] Tidwell SC, Ford DH, Kimura WD. Generating radially polarized beams interferometrically. *Appl Opt* 1990; 29(15): 2234-2239.
- [40] Khonina SN, Karpeev SV. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams. *Appl Opt* 2010; 49(10): 1734-1738. DOI: 10.1364/AO.49.001734.
- [41] Liu S, Li P, Peng T, Zhao J. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer. *Opt Express* 2012; 20(19): 21715-21721.
- [42] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Opt Lett* 2012; 37(12): 2385-2387. DOI: 10.1364/OL.37.002385.
- [43] Mendoza-Hernández J, Ferrer-García MF, Rojas-Santana JA, Lopez-Mago D. Cylindrical vector beam generator using atwo-element interferometer. *Opt Express* 2019; 27: 31810-31819. DOI: 10.1364/OE.27.031810.
- [44] 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.
- [45] Fadeyeva TA, Shvedov VG, Izdebskaya YV, Volyar AV, Brasselet E, Neshev DN, Desyatnikov AS, Krolikowski W, Kivshar YS. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals. *Opt Express* 2010; 18(10): 10848-10863.
- [46] Khonina SN, Karpeev SV, Parinin VD, Morozov AA. Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals. *Phys Lett A* 2017; 381: 2444-2455. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
- [47] Khonina SN, Porfirev AP, Kazanskiy NL. Variable transformation of singular cylindrical vector beams using anisotropic crystals. *Sci Rep* 2020; 10: 5590. DOI: 10.1038/s41598-020-62546-2.
- [48] Davis JA, McNamara DE, Cottrell DM, Sonehara T. Two-dimensional polarization encoding with a phase-only liquid crystal spatial light modulator. *Appl Opt* 2000; 39: 1549-1554. DOI: 10.1364/AO.39.001549.
- [49] Moreno I, Davis JA, Hernandez TM, Cottrell DM, Sand D. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator. *Opt Express* 2012; 20: 364-376.
- [50] Rong Z-Y, Han Y-J, Wang S-Z, Guo C-S. Generation of arbitrary vector beams with cascaded liquid crystal spatial light modulators. *Opt Express* 2014; 22(2): 1636-1644. DOI: 10.1364/OE.22.001636.
- [51] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM. *Opt Express* 2017; 25(21): 25697-25706. DOI: 10.1364/OE.25.025697.
- [52] Khonina SN, Ustinov AV, Porfirev AP. Vector Lissajous laser beams. *Opt Lett* 2020; 45(15): 4112-4115. DOI: 10.1364/OL.398209.
- [53] Ren Y-X, Lu R-D, Gong L. Tailoring light with a digital micromirror device. *Annalen der Physik* 2015; 527: 447-470. DOI: 10.1002/andp.201500111.
- [54] Mitchell KJ, Turtaev S, Padgett MJ, Čížmár T, Phillips DB. High-speed spatial control of the intensity, phase and polarisation of vector beams using a digital micro-mirror device. *Opt Express* 2016; 24(25): 29269-29282. DOI: 10.1364/OE.24.029269.
- [55] Scholes S, Kara R, Pinnell J, Rodríguez-Fajardo V, Forbes A. Structured light with digital micromirror devices: a guide to bestpractice. *Opt Eng* 2019; 59(4): 041202. DOI: 10.1117/1.OE.59.4.041202.
- [56] Karimi E, Piccirillo B, Nagali E, Marrucci L, Santamato E. Efficient generation and sorting of orbitalangular momentum eigenmodes of light by thermally tuned q-plates. *Appl Phys Lett* 2009; 94: 231124.
- [57] Shu W, Ling X, Fu X, Liu Y, Ke Y, Luo H. Polarization evolution of vector beams generated by q-plates. *Photon Res* 2017; 5: 64-72.
- [58] Khonina SN, Ustinov AV, Fomchenkov SA, Porfirev AP. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates. *Sci Rep* 2018; 8: 14320. DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
- [59] Rubano A, Cardano F, Piccirillo B, Marrucci L. Q-plate technology: a progress review [Invited]. *J Opt Soc Am B* 2019; 36: D70-D87.
- [60] Niv A, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam–Berry phase optical elements. *Opt Lett* 2004; 29(3): 238-240.
- [61] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27(5): 285-287.
- [62] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light. *Photonics Nanostruct* 2017; 27: 32-41. DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
- [63] Degtyarev SA, Volotovskiy SG, Khonina SN. Sublinearly chirped metalenses for forming abruptly autofocusing cylindrically polarized beams. *J Opt Soc Am B* 2018; 35(8): 1963-1969. DOI: 10.1364/JOSAB.35.001963.
- [64] Khonina SN, Degtyarev SA, Ustinov AV, Porfirev AP. Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density. *Opt Express* 2021; 29(12): 18651-18662. DOI: 10.1364/OE.428453.
- [65] Khonina SN, Tukmakov KN, Degtyarev SA, Reshetnikov AS, Pavelyev VS, Knyazev BA, Choporova YuYu. Design, fabrication and investigation of a subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming. *Computer Optics* 2019; 43(5): 756-764. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-756-764.
- [66] Pavelyev VS, Khonina SN, Degtyarev SA, Tukmakov KN, Reshetnikov AS, Gerasimov VV, Osintseva ND, Knyazev BA. Subwavelength silicon terahertz optics for generation of coherent beams with pre-given polarization state. 46th Int Conf on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2021: 1-1. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567286.
- [67] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams. *Opt Lett* 2007; 32(11): 1468-1470. DOI: 10.1364/OL.32.001468.
- [68] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-1-57-64.
- [69] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Parinin VD, Reshetnikov AS. A four-sector polarization converter integrated in a calcite crystal. *Computer Optics* 2018; 42(3): 401-407. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407.
- [70] Man Zh, Min Ch, Zhang Y, Shen Z, Yuan X-C. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films. *Laser Phys* 2013; 23(10): 105001. DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.

- [71] Khonina SN, Karpeev SV, Porfirev AP. Sector sandwich structure: an easy-to-manufacture way towards complex vector beam generation. *Opt Express* 2020; 28(19): 27628-27643. DOI: 10.1364/OE.398435.
- [72] Karpeev S, Parani V, Khonina S. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer. *J Opt* 2017; 19(5): 055701. DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
- [73] Parani VD, Karpeev SV, Khonina SN. Generation of radially polarized beams based on the refractive elements with interference polarizing coatings. *Computer Optics* 2015; 39(4): 492-499. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.
- [74] Stafeyev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, Gibson D, Song S, O'Faolain L, Kotlyar VV. Microlens-aided focusing of linearly and azimuthally polarized laser light. *Opt Express* 2016; 24(26): 29800-29813. DOI: 10.1364/OE.24.029800.
- [75] Kharitonov SI, Khonina SN. Conversion of a conical wave with circular polarization into a vortex cylindrically polarized beam in a metal waveguide. *Computer Optics* 2018; 42(2): 197-211. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-197-211.
- [76] Moreno I, Davis JA, Ruiz I, Cottrell DM. Decomposition of radially and azimuthally polarized beams using a circular-polarization and vortex-sensing diffraction grating. *Opt Express* 2010; 18: 7173-7183.
- [77] Fu S, Zhang S, Wang T, Gao C. Rectilinear lattices of polarization vortices with various spatial polarization distributions. *Opt Express* 2016; 24(16): 18486-18491.
- [78] Moreno I, Davis JA, Badham K, Sánchez-López MM, Holland JE, Cottrell DM. Vector beam polarization state spectrum analyzer. *Sci Rep* 2017; 7(1): 2216.
- [79] Khonina SN, Porfirev AP, Karpeev SV. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of non-uniformly polarized laser beams with singular phase structures. *Opt Express* 2019; 27(13): 18484-18492. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
- [80] Pachava S, Dharmavarapu R, Vijayakumar A, Jayakumar S, Manthalkar A, Dixit A, Viswanathan NK, Srinivasan B, Bhattacharya S. Generation and decomposition of scalar and vector modes carrying orbital angular momentum: A review. *Opt Eng* 2019; 59(4): 041205.
- [81] Wang Z, Zhang N, Yuan X-C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication. *Opt Express* 2011; 19: 482-492.
- [82] Qiu H, Yu H, Hu T, Jiang G, Shao H, Yu P, Yang J, Jiang X. Silicon mode multi/demultiplexer based on multimode grating-assisted coupler. *Opt Express* 2013; 21(15): 17904-17911.
- [83] Kazanskiy NL, Khonina SN, Karpeev SV, Porfirev AP. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams. *Quantum Electron* 2020; 50(7): 629-635. DOI: 10.1070/QEL17276.
- [84] Khonina SN, Porfirev AP, Volotovskiy SG, Ustinov AV, Fomchenkov SA, Pavelyev VS, Schröter S, Duparré M. Generation of multiple vector optical bottle beams. *Photonics* 2021; 8(6): 218. DOI: 10.3390/photonics8060218.
- [85] Zhao Y, Edgar JS, Jeffries GDM, McGloin D, Chiu DT. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam. *Phys Rev Lett* 2007; 99(7): 073901.
- [86] Zhu J, Chen Y, Zhang Y, Cai X, Yu S. Spin and orbital angular momentum and their conversion in cylindrical vector vortices. *Opt Lett* 2014; 39(15): 4435-4438.
- [87] Bliokh KY, Rodriguez-Fortuno F, Nori F, Zayats AV. Spin-orbit interactions of light. *Nat Photon* 2015; 9(12): 796-808.
- [88] Khonina SN, Golub I. Generation of an optical ball bearing facilitated by coupling between handedness of polarization of light and helicity of its phase. *J Opt Soc Am B* 2019; 36(8): 2087-2091. DOI: 10.1364/JOSAB.36.002087.
- [89] Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV. 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. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
- [90] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Opt Lasers Eng* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@ipsiras.ru.

Подлипов Владимир Владимирович, младший научный сотрудник НИЛ-602, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов, оптимизация, моделирование, изготовление и исследование оптических характеристик дифракционных оптических элементов. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Дегтярев Сергей Александрович, доцент Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. E-mail: sealek@gmail.com.

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

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 14 января 2022 г. Окончательный вариант – 25 мая 2022 г.

Formation of high-order cylindrical vector beams with sector sandwich structures

S.V. Karpeev^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, S.A. Degtyarev^{1,2}, A.M. Aljubili²

¹ IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

² Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

Abstract

Complex polarization-phase transformations are considered, which are implemented using easy-to-manufacture optical elements. The manufacturing technology of such elements is based on the axially symmetric discretization of the required polarization and phase distributions. This representation leads to optical elements in the form of sector sandwich structures consisting of polarizing and phase plates stacked together. The paper numerically and experimentally investigates the main types of such sector sandwich structures for the formation of second-order cylindrical polarizations.

Keywords: vector bundles, sector sandwich structures.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Degtyarev SA, Aljubili AM. Formation of high-order cylindrical vector beams with sector sandwich structures. *Computer Optics* 2022; 46(5): 682-691. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.

Acknowledgements: The work was financially supported by the Russian Science Foundation (RSF) under grant No. 22-12-00041.

Authors' information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@ipsiras.ru.

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, researcher at the Micro- and Nanotechnology Laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: mathematical modeling of physical processes, optimization, modeling, manufacturing and research of diffractive optical elements. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Sergey Alexandrovich Degtyarev, docent of Samara National Research University, research fellow of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: wave optics. E-mail: sealek@gmail.com.

Abrar Mohammed khudhur Aljubili graduate student of Samara University. Research interests: diffraction optics, singular optics, mode and polarization transformations laser beams, vector beams. E-mail: abrar.aljubili78@gmail.com.

Received January 14, 2022. The final version – May 25, 2022.
