

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ МОД СУПЕРПОЗИЦИИ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ
ЛАГЕРРА-ГАУССА ДЛЯ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ

Исполнитель НИР



подпись

С.И. Халилов

Симферополь 2024

Проект «Управление спектром мод суперпозиции векторных пучков Лагерра-Гаусса для систем беспроводной передачи информации» нацелен на разработку и исследование методов управления спектральными характеристиками оптических пучков Лагерра-Гаусса, прошедших свободное пространство. Такие пучки представляют устойчивое световое поле, характеризующие азимутальным и радиальным числом, в комбинации с третьей независимой степенью свободы-поляризации возможно создавать ортогональные каналы связи. На сегодняшний день существует несколько методов для решения проблемы передачи и сортировки данных, но каждый из них обладает своими недостатками. Все эти методы базируются на оптических подходах, включая как линейные, так и нелинейные методы. Для восстановления исходного изображения в этих методах необходимо наличие опорного пучка в системах записи голографических решеток. Однако эти методы не предоставляют возможность восстановления информации о собственных модах в пучке, что существенно ограничивает число потенциальных степеней свободы исходного пучка. В данном проекте будут впервые разработан и опробовано устройство для измерения вихревого спектра векторных пучков.

Основная **цель** данного исследования заключается в выявлении способов контроля над характеристиками векторных структурированных пучков, путем изменения начальной фазы и поляризации каждой моды, что осуществляется в свободном пространстве. И для реляции поставленной цели, были поставлены следующие **задачи**: 1) определение условий формирования массива векторного поля на основе пучков Лагерра-Гаусса; 2) определение векторной структуры и вихревого поля, после демультимплексирования по состоянию поляризации. Процесс решения поставленной задачи предполагает два аспекта: теоретический и экспериментальный. Теоретический аспект заключается в компьютерном моделировании комплексной амплитуды параксиального структурированного пучка и его векторной структуры. Экспериментальный аспект решения задачи

предполагает создание системы формирования структурированного векторного пучка с учетом возможности модуляции начальной фазы и состояния поляризации каждой моды пучка и создание системы цифровой сортировки вихревых мод после разделения по состояниям поляризации.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия оптика претерпела значительное развитие, охватывая широкий спектр исследований и технологических инноваций. Одним из наиболее интересных и многообещающих направлений в этом контексте является изучение и применение структурированного света [1-6]. В отличие от равномерного освещения, структурированный свет представляет собой оптические поля со сложными амплитудными и фазовыми структурами. Эти световые лучи имеют широкий спектр практических применений, включая манипулирование микрочастицами [7-10], модуляцию световых полей [11-15] и создание эффективных оптических систем связи [16-22] с использованием спин-орбитальных взаимодействий [23-26]. Даже стандартные оптические среды, такие как оптические волокна [27] или астигматические материалы [28-31], могут существенно изменять структуру сингулярных лучей, радикально изменяя их вихревые характеристики. Возможно настроить структурированный луч так, чтобы обеспечить целенаправленную передачу энергии между модами в ответ на внешние нарушения. Например, структурированный пучок Лагерра-Гаусса (ЛГ) [32] является показательным случаем, где его комплексная амплитуда может быть выражена как комбинация обычных световых пучков Эрмита-Гаусса (ЭГ) [33, 34], определяя их амплитуды и фазы. Эти пучки демонстрируют значительную устойчивость к различным помехам и обладают способностью к самовосстановлению по мере их распространения.

В этой работе мы фокусируемся на устойчивости таких пучков к внешним возмущениям, в частности, исследуя устойчивость структурированных пучков Лагерра-Гаусса (сЛГ) относительно простого астигматизма во время распространения в свободном пространстве с использованием метода преобразования матрицы ABCD.

ГЛАВА 1. АСТИГМАТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРАВИЛО ABCD ДЛЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПОСЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Метод матриц ABCD, разработанный в 1970-х годах [35, 36], позволяет моделировать распространение когерентных и частично когерентных структурированных световых пучков [1, 37-39]. Ключевым элементом в этом подходе является унимодулярная матрица ABCD, заданная как $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, где $\det M = AD - BC = 1$ представляет каждый оптический элемент, а полная система описывается произведением всех элементов. Эти преобразования используются для вычисления комплексного параметра $q(x)$ для фундаментального гауссова пучка с кривизной волнового фронта $R(z)$ и радиусом перетяжки пучка $w(z)$, заданными как $1/q(z) = 1/R(z) - i2/kw(z)$, где k - волновое число.

При проектировании оптических систем, использующих структурированные световые пучки, сложность значительно возрастает при использовании преобразований матрицы ABCD [40]. По сути, даже в самом простом сценарии необходимо представить моду ЛГ через моды ЭГ в соответствующей системе координат цилиндрической линзы. Связь можно сформулировать следующим образом [33, 41]:

$$LG_{n,\pm\ell}(\mathbf{r}) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{j=0}^{2n+\ell} (\pm 2i)^j P_j^{(n+\ell-j, n-j)}(0) HG_{2n+\ell-j, j}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где радиальные n и ℓ азимутальные числа, $P_j^{(n+\ell-j, n-j)}(\cdot)$ - полином Якоби. Если оси мод ЭГ повернуты на угол $\pi/4$ градусов относительно оси астигматической линзы, то расширение должно быть выражено как:

$$HG_{n, n+\ell} \left(\frac{x+y}{\sqrt{2}}, \frac{x-y}{\sqrt{2}} \right) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{j=0}^{2n+\ell} 2^j P_j^{(n+\ell-j, n-j)}(0) HG_{2n+\ell-j, j}. \quad (2)$$

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ АСТИГМАТИЧЕСКОГО ПУЧКА SLG

Рассмотрим систему, в которой пучок сЛГ [29] с комплексным параметром $q(z) = z - iz_0$, где z_0 - длина Рэлея, падает на цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием f_x , расположенную в плоскости $z = 0$. Так что, начальный комплексный параметр равен $q_0 = -iz_0$ и с радиусом перетяжки w_0 гауссова пучка. Предполагается также, что лабораторная и цилиндрическая оси линзы совпадают, образуя случай простого астигматизма [33, 41].

Поскольку ЭГ-пучки являются собственными модами астигматического элемента, представим структурированный сЛГ-пучок в терминах стандартных ЭГ-мод в выражении (2), но с различным масштабом по координатам (x, y)

$$sLG_{n,\pm l}(\mathbf{r}, z_1) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3l/2} n!} \sum_{j=0}^{2n+l} (\pm 2i)^j Q_j (1 + \varepsilon e^{ij\theta}) P_j^{(n+l-j, n-j)}(0) \times \\ \times H_{2n+l-j} \left(\frac{\sqrt{2}x}{w_x(z_1)} \right) H_j \left(\frac{\sqrt{2}y}{w_y(z_1)} \right) \exp \left[\frac{ik}{2} \left(\frac{x^2}{q_x(z_1)} + \frac{y^2}{q_y(z_1)} \right) \right], \quad (3)$$

где H_n – многочлен Эрмита, Q_n – амплитуда ЭГ-моды, которая в рамках ABCD-правила равна [36]

$$Q_x = \left(\sqrt{\frac{q_{0,x}}{A_x q_{0,x} + B_x}} \right)^n, \quad Q_y = \left(\sqrt{\frac{q_{0,y}}{A_y q_{0,y} + B_y}} \right)^n. \quad (4)$$

Очевидно, что в общем случае нам придется использовать две группы матриц ABCD для направлений x и y , которые задают комплексные параметры

$$q_x = \frac{A_x q_0 + B_x}{C_x q_0 + D_x}, \quad q_y = \frac{A_y q_0 + B_y}{C_y q_0 + D_y}. \quad (5)$$

Однако цилиндрическая линза не изменяет масштаб в направлении y , то есть в области $(0, z_1)$, и мы можем написать

$$q_y(z_1) = z_1 - iz_0. \quad (6)$$

В направлении x действует матрица цилиндрической линзы и смещение на длину z , которое записывается в виде

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & z_1 \\ -\frac{1}{f_x} & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Откуда q_x параметр получается в виде:

$$q_x(z) = z_0 \frac{[Z_1(\kappa_x^2 + 1) - \kappa_x] - i}{\kappa_x^2 + 1}, \quad (8)$$

где

$$Z_1 = \frac{z_1}{z_0}, \quad \kappa_x = \frac{z_0}{f_x}. \quad (9)$$

Полученные результаты позволяют найти радиусы пучков для x и y

направлений следующим образом $\operatorname{Re}\left(\frac{ik}{2q_x(z_1)}\right) = -\frac{1}{w_x^2(z_1)} \Rightarrow$

$$w_x^2(Z_1) = w_0^2 \left[(1 - Z_1 \kappa_x)^2 + Z_1^2 \right], \quad (10)$$

$$w_y^2(Z_1) = w_0^2 (1 + Z_1^2), \quad (11)$$

в то время как фазы Γ_{xi} мод равны [36].

$$\Gamma_x(Z_1) = \arg \sqrt{\frac{q_x}{Aq_x + B}} = \frac{1}{2} \arg(1 - \kappa_x Z_1 + i Z_1), \quad (12)$$

$$\Gamma_y(Z_1) = \frac{1}{2} \arg(1 + i Z_1), \quad (13)$$

Таким образом, комплексная амплитуда астигматического луча сЛГ (асЛГ) после прохождения через цилиндрическую линзу описывается следующим образом [43]:

$$\begin{aligned}
asLG_{n,\ell}(x, y, Z_1 | \varepsilon, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{w_x(Z_1)w_y(Z_1)}} \exp\left\{-i\left[(2n + \ell + 1/2)\Gamma_x(Z_1) + \Gamma_y(Z_1)\right]\right\} \times \\
&\times \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{j=0}^{2n+\ell} (2i)^j P_j^{(n+\ell-k, n-\ell)}(0) (1 + \varepsilon e^{i\theta}) H_{2n+\ell-j}\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_x(Z_1)}\right) H_j\left(\frac{\sqrt{2}y}{w_y(Z_1)}\right) \times \\
&\times \exp(ik\Gamma_{xy}(Z_1)) \exp\left(i\left[\frac{x^2}{\bar{q}_x(Z_1)} + \frac{y^2}{\bar{q}_y(Z_1)}\right]\right),
\end{aligned} \tag{14}$$

где $\Gamma_{xy}(Z_1) = \Gamma_y(Z_1) - \Gamma_x(Z_1)$, $w_0 = \sqrt{2z_0/k}$, $x \rightarrow x/w_0$, $y \rightarrow y/w_0$ и

$$\bar{q}_x = \frac{[Z_1(\kappa_x^2 + 1) - \kappa_x] - i}{\kappa_x^2 + 1}, \quad \bar{q}_y = Z_1 - i. \tag{15}$$

ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТ

Главной целью нашего экспериментального исследования былр генерация астигматического светового пучка и исследование эволюции его тонкой структуры при распространении вдоль оси - Z . Для сравнения теории и эксперимента была собрана экспериментальная установка, как показано на рис. 1.

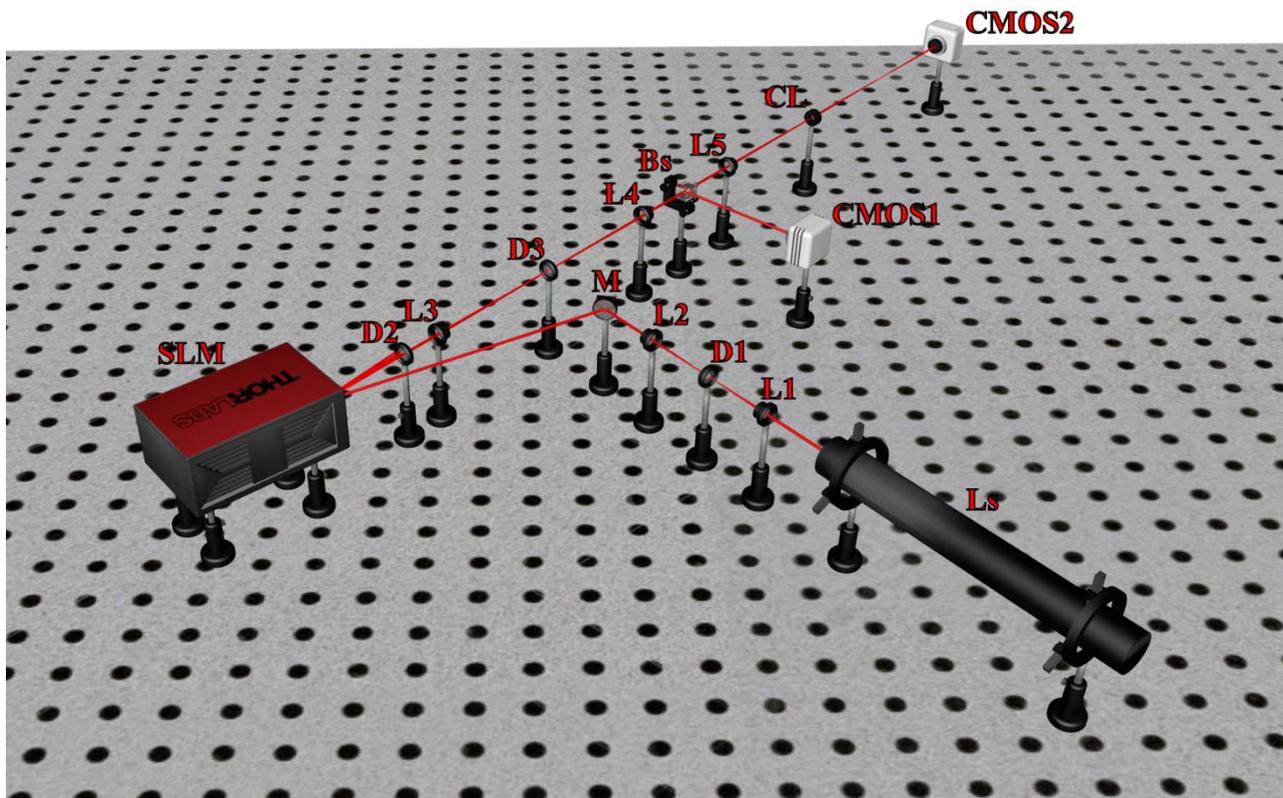


Рисунок 1. Экспериментальная установка: L_s – He-Ne лазер ($\lambda=633$ нм), SLM – пространственный модулятор света spatial, SLF – пространственный фильтр, B_s – делительная призма, M – зеркало, D – диафрагма, L – сферическая линза, Cl – цилиндрическая линза, CMOS – камера.

Свет от источника L_s , пройдя через пространственный фильтр SLF, состоящий из линз L_1 , L_2 и диафрагмы D_1 , образует гауссов пучок. С помощью зеркала M свет направляется на матрицу SLM, например, Thorlabs EXULUS-4K1/M, где амплитудно-фазовые решетки загружены с параметрами для режима ЛГ ($n=2$, $\ell=3$) и сЛГ ($n=10$, $\ell=1$, $\varepsilon=1$, $\theta=0.99\pi$). После отражения световой пучок дифрагирует, образуя спектр, состоящий из оптических вихрей. Диафрагма D_2 и второй пространственный фильтр SLF, состоящий из линз L_3 , L_4 и диафрагмы D_3 , выделяют первый порядок дифракции и формируют коллимированный пучок. С помощью светоделителя B_s мы создаем два плеча, где в первом плече мы видим исследуемый пучок света, а во втором плече мы

исследуем эволюцию светового пучка вдоль оси Z_1 после прохождения цилиндрической линзы CL с помощью CMOS-камеры CMOS2.

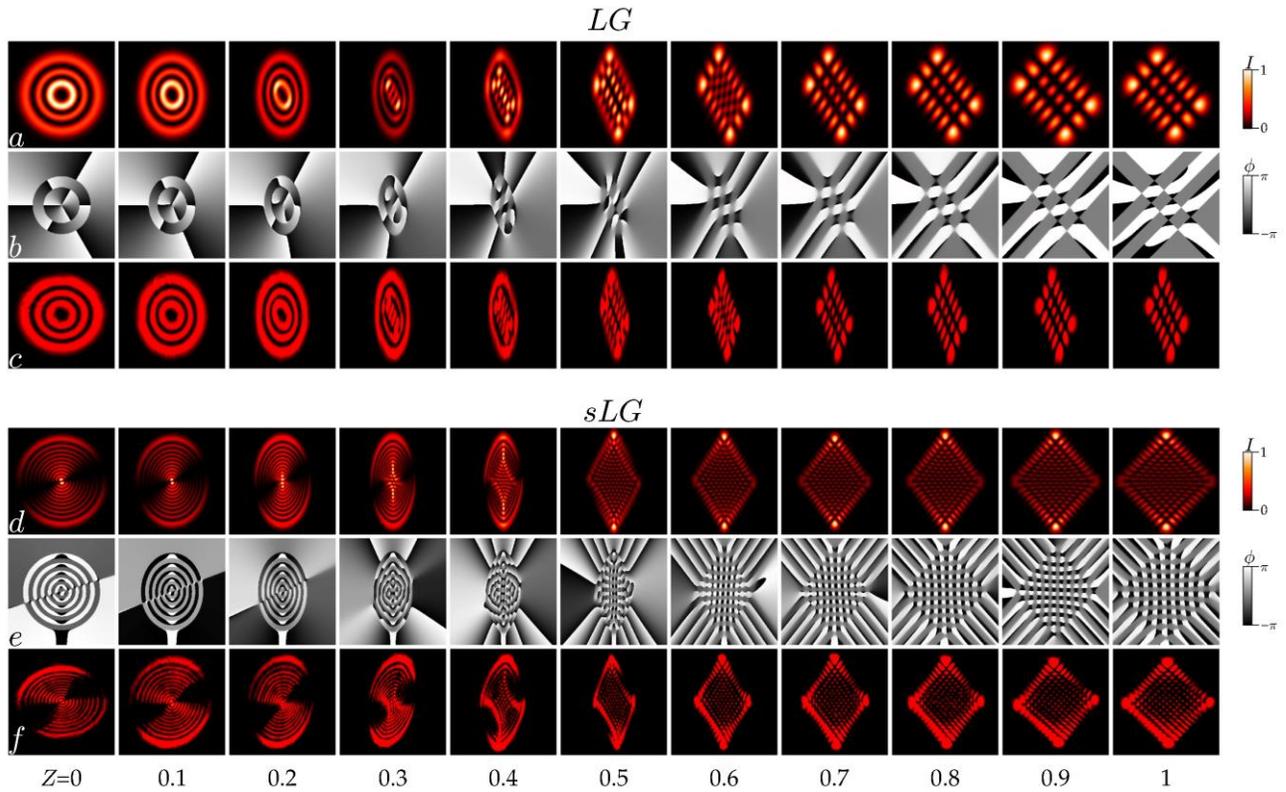


Рисунок 2. Распределение интенсивности: (a, d) теория и (c, f) эксперимент, (b, e) фазы, эволюции ЛГ- (a-в) $n=2$, $\ell=3$ и астигматического сЛГ- (г-е) $n=10$, $\ell=1$, $\varepsilon=1$, $\theta=0.99\pi$, $z_0=1$ м, $f_x=0.5$ м.

Рис. 2 демонстрирует эволюцию тонкой структуры для пучков ЛГ (a, b, c) и сЛГ (d, e, f) вдоль оси распространения Z_1 . Согласно компьютерному моделированию (a) и (d) и экспериментам (c) и (f), для пучков ЛГ и сЛГ соответственно на расстоянии $z_1=2f_x$ ($Z_1=1$) наблюдается трансформация в моду ЭГ [44-48]. Также вблизи распределения интенсивности, полученные в данной работе, хорошо согласуются с результатами, полученными в [29] с использованием метода интегральных преобразований.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОУМ СЛГ-ПУЧКА ПОСЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Орбитальный угловой момент структурированного пучка в базисе ЭГ-мод удобно представить как

$$L_z = \mathfrak{I} \int_{\mathbb{R}^2} \Psi^*(\mathbf{r})(x\partial_y - y\partial_x)\Psi(\mathbf{r})dx dy, \quad (16)$$

Очевидно, что основной вклад в ОУМ вносят амплитуды мод, которые мы находим из выражения (14) в виде

$$c_j = (2i)^j P_j^{(n+\ell-j, n-\ell)}(0)(1 + \varepsilon e^{ij\theta}) \exp(ij\Gamma_{xy}(z_1)). \quad (17)$$

Чтобы найти удельный ОУМ, вычислим поток энергии в направлении распространения пучка по формуле

$$S_z = \int_{\mathbb{R}^2} \Psi(\mathbf{r})\Psi^*(\mathbf{r})dx dy, \quad (18)$$

так что удельный ОУМ равен

$$\ell_z = L_z / S_z. \quad (19)$$

Используя выражения (16 – 19), получаем

$$L_z = 2^{2n+\ell} \pi \sum_{j=0}^{2n+\ell-1} (j+1)!(2n+\ell-j)! \mathfrak{I}(c_{j+1}c_j^*), \quad (20)$$

$$S_z = 2^{2n+\ell-1} \pi \sum_{j=0}^{2n+\ell} j!(2n+\ell-j)! c_j c_j^*. \quad (21)$$

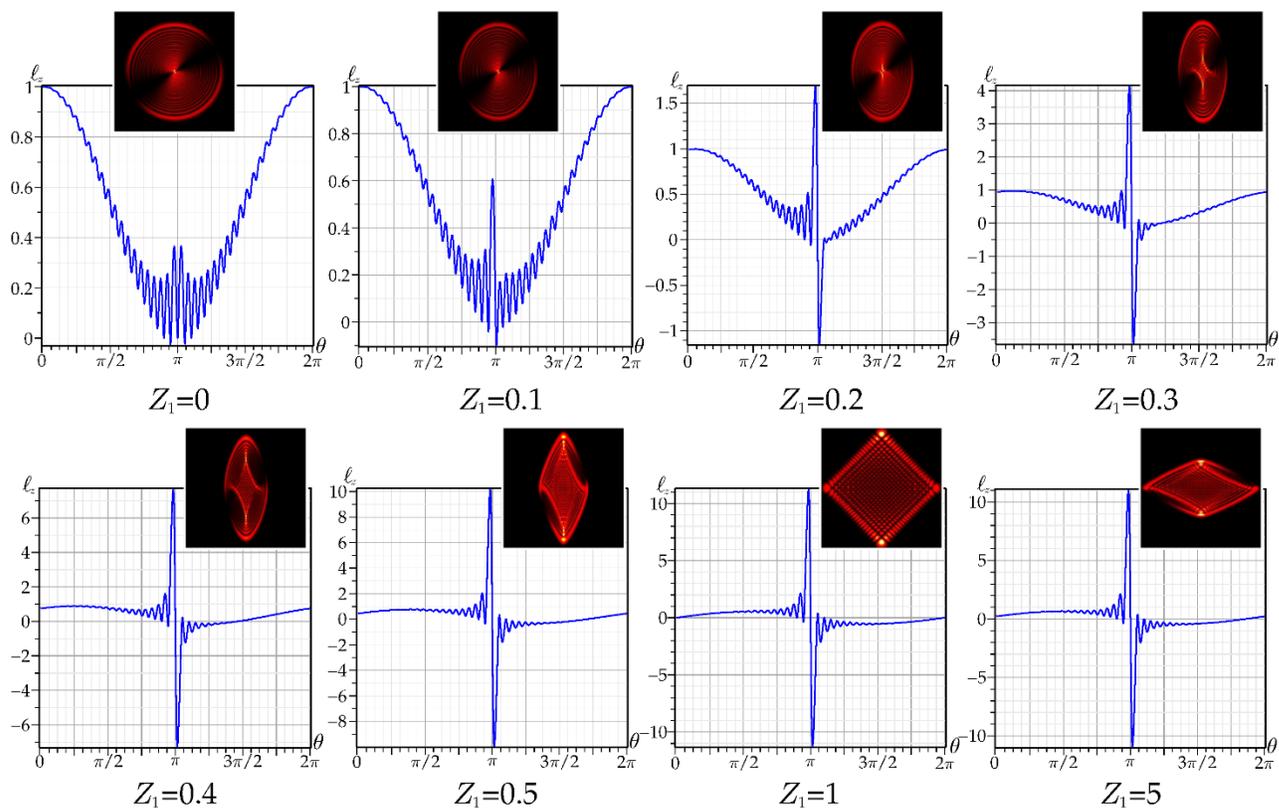


Рисунок 3. Осцилляции ОУМ $\ell_z(\theta)$ при вариации θ -управляющего параметра асЛГ-пучка с $n=20$, $\ell=1$, $\varepsilon=1$ на различных длинах пучка Z_1 . Выводы: картины интенсивности для первого всплеска ОУМ.

Полученные результаты для ОУМ представлены на рис. 3 в виде быстрых осцилляций ОУМ при изменении управляющего параметра θ в различных поперечных сечениях Z_1 пучка. Мы видим возникновение и подавление быстрых осцилляций ОУМ по мере смещения Z_1 вдоль пучка, в то время как вблизи $\theta = 0.98\pi$ зарождается и растет всплеск ОУМ. Второй всплеск ОУМ с противоположным знаком возникает вблизи $\theta = 1.02\pi$. Важно, что ОУМ при $Z_1 = 1$ хорошо согласуется с результатами нашей работы [24], использующей метод интегральных преобразований, но ABCD матричный метод позволяет проследить эволюцию быстрых осцилляций и всплесков ОУМ по всей длине Z_1 пучка. Мы также видим, что всплески ОУМ незначительно изменяются в дальнейшей зоне дифракции.

ГЛАВА 2. ЦИФРОВАЯ СОРТИРОВКА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ ЛГ МЕТОДОМ МОМЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ

Поляризация является одним из важных свойств света. Векторная природа и способность света взаимодействовать с материей делают возможным существование многих оптических устройств и систем. Распространение и взаимодействие поляризации с материалами широко изучалось в метрологии, технологиях визуализации, хранении данных, оптической связи, материаловедении и астрономии, а также в биологических исследованиях. Большинство исследований касались пространственно однородных поляризаций, т.е. параметры поляризации одинаковы во всех точках поперечного сечения лазерного луча.

Особый интерес представляют пучки с аксиальной симметрией всех параметров лазерного излучения, включая поляризацию, например, пучки с радиальной и азимутальной поляризацией [49-52]. Цилиндрические аксиально-симметричные векторные пучки имеют множество приложений, включая микроскопию, литографию, ускорение электронов, обработку материалов, метрологию высокого разрешения, микроэллипсометрию и спектроскопию [49].

Существуют две группы методов получения цилиндрических векторных пучков: внутррезонаторные и внрезонаторные. В первом случае в резонаторе используются поляризационно-селективные оптические элементы. Этот метод предпочтителен для мощных лазеров, имеющих высокий коэффициент усиления активной среды, низкую добротность резонатора и сравнительно невысокое качество излучения [53-54].

Главным преимуществом внрезонаторных методов формирования поляризационно-неоднородных мод является их универсальность. Чаще всего внрезонаторные методы основаны на когерентной суперпозиции пары обычных мод, например, с использованием интерферометра. Таким образом можно сформировать любые типы цилиндрических векторных пучков, и, в принципе,

этот метод применим к любой длине волны. Помимо интерференционных методов [55-57], известны схемы с использованием маломодовых оптических волокон [58-60] и нематических жидкокристаллических протяженных модуляторов света [61-65].

В нашей статье мы теоретически и экспериментально рассматриваем формирование векторных пучков сЛГ интерферометрическим методом и, используя метод моментов интенсивности, анализируем скалярные поля [18-20] после их демультимплексирования.

ВЕКТОРНЫЕ СИНГУЛЯРНЫЕ ПУЧКИ

Согласно [69], сЛГ [70-73] задается в базисе пучков ЭГ комплексной амплитудой:

$$sLG_{n,\ell}(\mathbf{r}|\varepsilon, \theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{k=0}^{2n+\ell} (2i)^k \varepsilon_k(\varepsilon, \theta) P_k^{(n+\ell-k, n-k)}(0) HG_{2n+\ell-k, k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $\mathbf{r} = (x, y)$, $P_k^{(m-k, n-k)}(\cdot)$ полином Якоби, $HG_{n,m}(\mathbf{r})$ обозначает комплексную амплитуду моды ЭГ, $\varepsilon_k(\varepsilon, \theta) = 1 + \varepsilon \exp(ik\theta)$ двухпараметрическая функция возбуждения каждой моды ЭГ, с управляющим амплитудным параметром ε фазовым θ , n и ℓ радиальное и азимутальное число.

Векторный структурированный пучок $s\mathbf{L}G_{n,\ell}(r|\varepsilon, \theta)$ будет сформирован как суперпозиция пучка sLG с правосторонней круговой поляризацией e_+ и положительным ТС >0 в уравнении (1), и левосторонней круговой поляризацией e_- с топологическим зарядом ТС <0 , как показано на рис. 4.

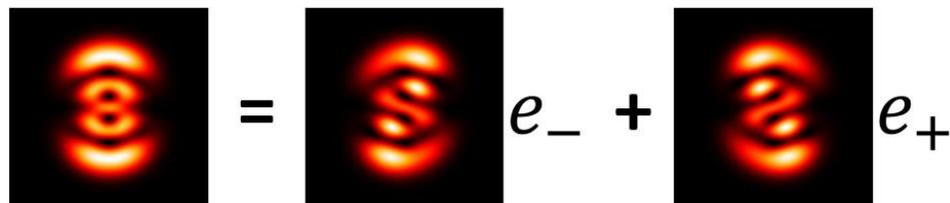


Рисунок 4. Эскиз формирования векторного сЛГ пучка

Его комплексная амплитуда описывается выражением

$$\mathbf{sLG}_{n,\ell}(\mathbf{r}|\varepsilon,\theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2}n!} \sum_{k=0}^{2n+\ell} \left[\mathbf{e}_+(2i)^k + \mathbf{e}_-(-2i)^k \right] \varepsilon_k(\varepsilon,\theta) P_k^{(n+\ell-k,n-k)}(0) HG_{2n+\ell-k,k}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

Поляризационная матрица (матрица когерентности $(J_{\nu,\mu}, (\nu,\mu) = (x,y))$ или Стоксова матрица $(S_i, i=0,1,2,3)$ [74-75]) J представляет собой эрмитову матрицу 2×2 , определяемую ее компонентами

$$J = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S_0 + S_1 & S_2 + iS_3 \\ S_2 - iS_3 & S_0 - S_1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} S_0 &= |\psi_R|^2 + |\psi_L|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ S_1 &= 2\operatorname{Re}(\psi_R^* \psi_L) = |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ S_2 &= 2\operatorname{Im}(\psi_R^* \psi_L) = 2\operatorname{Re}(E_x^* E_y) \\ S_3 &= |\psi_R|^2 - |\psi_L|^2 = 2\operatorname{Im}(E_x^* E_y) \end{aligned} \quad (4)$$

где ψ_R и ψ_L циркулярные и, E_x и E_y линейные компоненты поля. Выражение (4) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0;0) + I(90;0); \\ S_1 &= I(0;0) - I(90;0); \\ S_2 &= I(45;0) - I(135;0); \\ S_3 &= I(45;45) - I(135;45), \end{aligned} \quad (5)$$

здесь, $I(\theta;\varepsilon)$ интенсивность световых колебаний в направлении, образует угол θ с осью Ox , когда их y -компонента запаздывает на величину ε по отношению к x -компоненте. Эллиптичность Q и угол Ψ наклона большой полуоси к оси лабораторной системы координат вычисляются по формулам (6) и (7) соответственно (рис.5, 6):

$$Q = \tan\left(\frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{S_1}{S_0}\right)\right), \quad (6)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right), \quad (7)$$

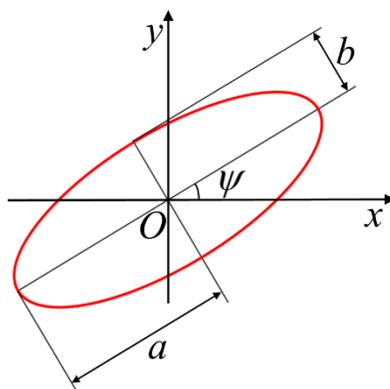


Рисунок 5. Поляризационный эллипс

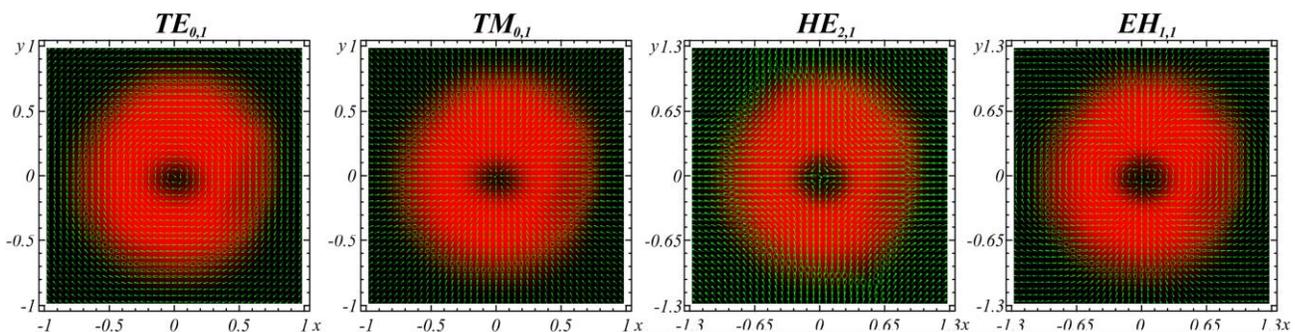


Рисунок 6. Экспериментально полученные векторные распределения поляризации типа TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} , EH_{11} .

ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

Экспериментальные исследования по формированию векторных световых пучков проводились на установке, представленной на рис. 7.

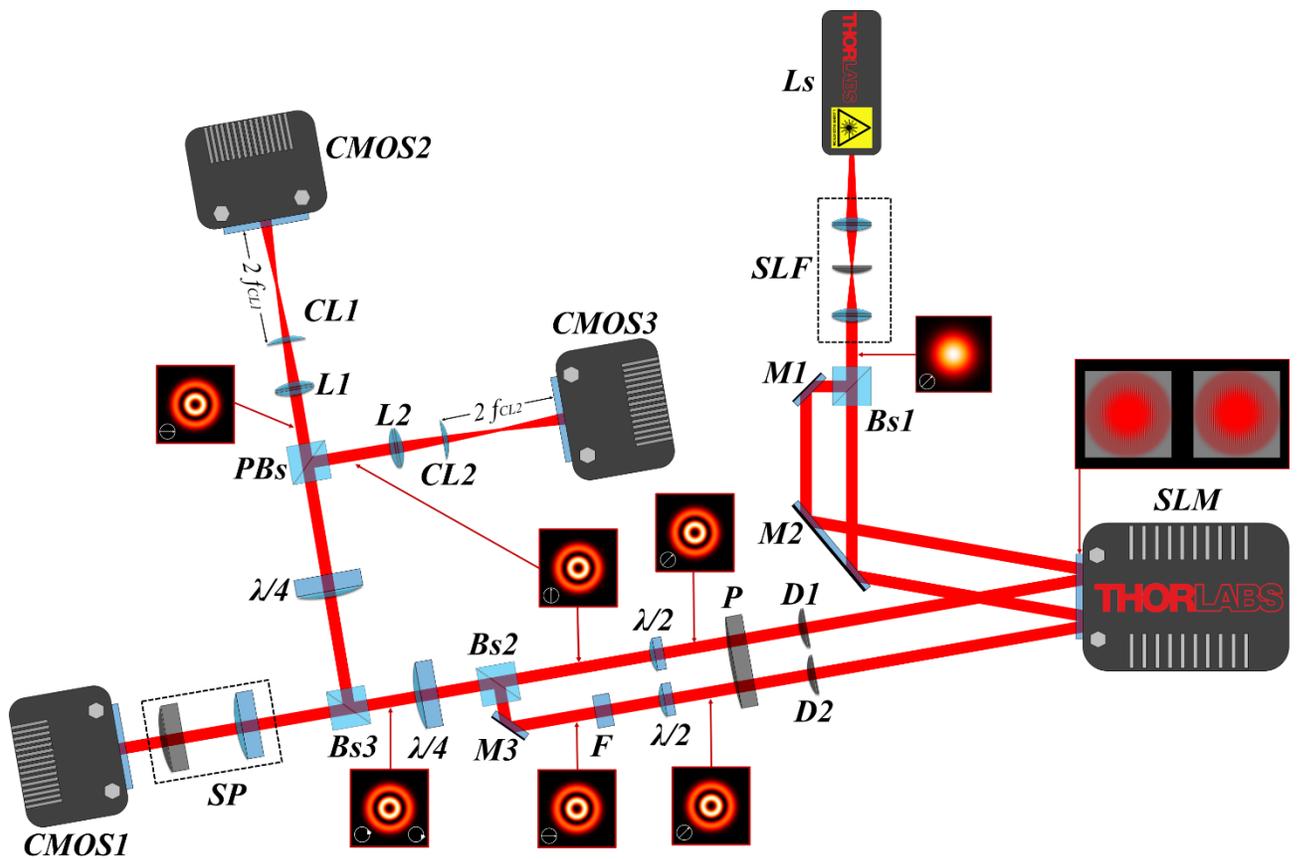


Рисунок 7. Экспериментальная установка: *Ls* – He-Ne лазер ($\lambda=633$ нм), *SLM* – пространственный модулятор света, *SLF* – пространственный фильтр, *Bs* – делительная призма, *M*- зеркало, *D*- диафрагма, *P*- поляризатор, $\lambda/2$ – полуволновая пластина, $\lambda/4$ - четверть волновая пластина, *PBs* – поляризационная делительная призма, *L*-сферическая линза, *Cl* – цилиндрическая линза, *F*-фильтр, *SP*- Стокс поляриметр, *CMOS* – камера.

Свет от источника *Ls* после пространственного фильтра *SLF*, пройдя через делительную призму *Bs1*, образует равноплечий интерферометр Маха-Цендера. Через зеркала *M1* и *M2* свет попадает на матрицу *SLM* типа Thorlabs EXULUS-4K 1/M, на которой записаны 2 амплитудные голограммы, как показано на рис. 7, свет дифрагируя, образуя спектр, состоящий из оптических вихрей. С помощью диафрагм *D1* и *D2* выделяем в обоих плечах порядки дифракции $k=+1$, несущие оптические вихри с топологическим зарядом $\ell = +1$ и $\ell = -1$. Поляризатором *P* и полуволновыми пластинами $\lambda/2$ формируем в обоих плечах ортогональные

линейные состояния поляризации. На светоделительной призме Bs2, являющемся мультиплексором, складываем пучки света. Для того чтобы каждая мода пучка содержала оптические вихри в явном виде, необходимо перейти к циркулярно поляризованному базису. В эксперименте это преобразование осуществляется пластиной $\lambda/4$, расположенной после светоделительного кубика Bs2. Далее для параллельного измерения векторной и скалярной структуры света с помощью делительной призмы Bs3 создаем 2 плеча. В первом плече с помощью Стокса поляриметра, состоящего из поляризатора и четвертьволновой пластины, измеряем распределение интенсивности 6 стоксовых компонент на камере CMOS1 и с помощью дифференциального поляриметра строим векторную структуру [74] Рис. 7. Второе плечо в нашей экспериментальной установке мы использовали для измерения модового спектра вихрей с помощью метода, предложенного в [76-79]. Для этого, мы ориентировали выходную пластину $\lambda/4$ под углом 90° относительно входной пластины, чтоб обратно преобразовать в сумму двух ортогонально линейно поляризованных состояний. И для разделения линейно поляризованных состояний, мы использовали поляризационную призму PBs. Результаты измерений представлены на диаграммах рис. 8. Как видно из 3D-диаграмм спектра мод, для x-поляризованного пучка основной вклад вносит вихрь с топологическим зарядом, а в y-компоненте поля преобладает пучок с топологическим зарядом, что свидетельствует о корректном разделении мод по поляризации и орбитальному угловому моменту.

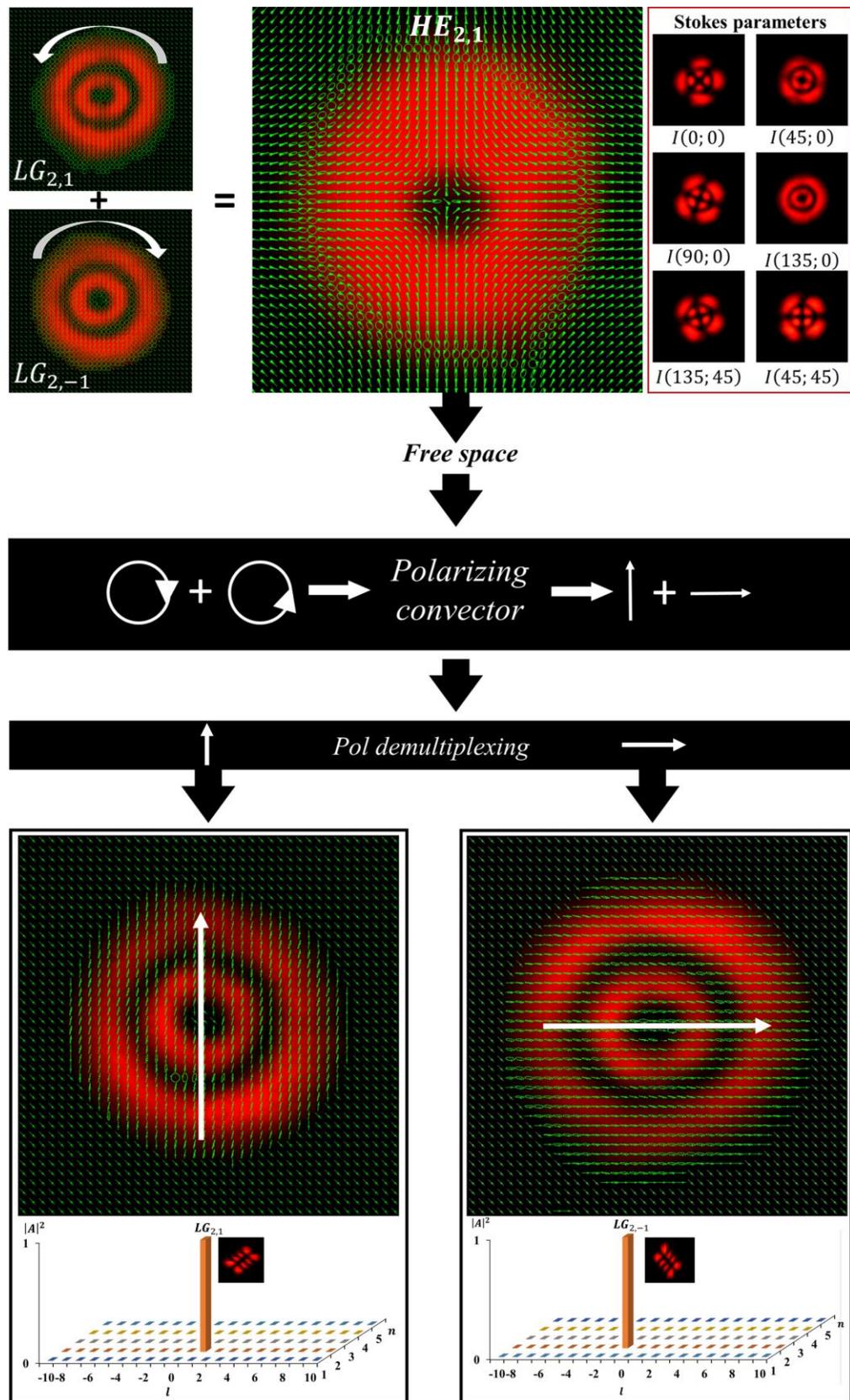


Рисунок 8. Схема формирования векторного сЛГ пучка интерферометрическим методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем проекте были получены результаты теоретических и экспериментальных исследований, сопровождающиеся компьютерным моделированием процессов: управления осцилляциями и резкими всплесками сЛГ пучков после цилиндрической линзы. Продемонстрирована актуальная схема по формированию векторного пучка и его разделения по состояниям поляризации и методом моментов интенсивности второго порядка, анализ модового состава.

Использование ABCD матричного подхода, рассмотренного в статье, значительно упростило и расширило математическое описание астигматических преобразований структурированных пучков по сравнению с интегральными преобразованиями. Мы продемонстрировали эффективность использования матриц ABCD для преобразования ЭГ-мод высокого порядка в структурированных сЛГ-пучках. Было показано, что астигматическое преобразование приводит к возникновению всплесков ОУМ, амплитуда которых превышает половину радиального числа асЛГ пучка с минимальным азимутальным числом. Более того, в отличие от метода интегральных преобразований, мы продемонстрировали эволюцию тонкой структуры интенсивности и ОУМ по всей длине пучка. Было показано, что ОУМ незначительно изменяется в дальней области дифракции цилиндрической линзы несмотря на то, что сЛГ-пучок теряет свою структурную устойчивость.

Проведены экспериментальные исследования по формированию векторных цилиндрических пучков света интерферометрическим методом. Впервые метод измерения вихревого спектра применен для анализа скалярной структуры поля в ортогональных компонентах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Государственного Совета Республики Крым.

**По результатам проекта было опубликовано 3 научных работ
индексируемых в Scopus & Web of Science и 2 работы в РИНЦ**

Yakubov S.I. Formation and Control of the Polarization Structure of Vector Structured Laguerre-Gaussian Beams / S.I. Yakubov, M.V. Bretsko, S.I. Khalilov, D.V. Maksimov, S.N. Lapaeva, Ya.E. Akimova // Optical Memory and Neural Networks. – 2024. – V. 33., Suppl. 1. – P. S90-S97. DOI: 10.3103/S1060992X24700334.

Khaliov S.I. Astigmatic Laguerre–Gaussian Beams with Rapid Oscillations of Orbital Angular Momentum / S.I. Khaliov, M.V. Bretsko, S.I. Yakubov, S.N. Lapaeva, D.V. Maksimov, A.V. Volyar, Ya.E. Akimova // Optical Memory and Neural Networks. – 2024. – V. 33., Suppl. 1. – P. S114-S122. DOI: 10.3103/S1060992X2470036X.

Volyar AV. Direct measurement of Stokes orbital parameters / A.V. Volyar, M.V. Bretsko, S.I. Khalilov, Ya.E. Akimova // Computer Optics. – 2025. – V. 34., No. 5.

Формирование и управление поляризационной структурой векторных структурированных пучков Лагерра-Гаусса / С. И. Якубов, М. В. Брецько, С. И. Халилов [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2024) : сборник трудов по материалам X Международной конференции и молодежной школы : в 6 т., Самара, 20–24 мая 2024 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2024. – С. 11232. – EDN ХКРТМА.

Астигматические Лагер-Гауссовы пучки света с быстрыми осцилляциями ОУМ / С. И. Халилов, С. И. Якубов, М. В. Брецько [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2024) : сборник трудов по материалам X Международной конференции и молодежной школы : в 6 т., Самара, 20–24 мая 2024 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2024. – С. 12502. – EDN УТННУС.

Апробация результатов реализации Проекта на научных мероприятиях:

1. Устный доклад С.И. Халилов, М.В. Брецько, А.В. Воляр, С.И. Якубов, С.Н. Лапаева, Д.В. Максимов, на тему: Astigmatic Laguerre-Gaussian beams with rapid oscillations of the OAM. X Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии», 20-24 мая 2024 год.
2. Стендовый доклад С.И. Халилов, М.В. Брецько, С.И. Якубов, С.Н. Лапаева, Д.В. Максимов на тему: Formation and polarization control of vector structured Laguerre-Gaussian beams. X Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии», 20-24 мая 2024 год.
3. Стендовый доклад С.И. Халилов, А.А. Богуславская-Гапешина, Д.В. Максимов, С.И. Якубов, М.В. Брецько.. на тему: Поляризационная структура векторных структурированных пучков Лагерра–Гаусса. XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике, 24-26 января 2024 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Forbes, A., De Oliveira, M., Dennis, M.R., Structured light, *Nat. Photonics*, 2021, vol. 15, pp. 253–262. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00780-4>.
- [2] Rubinsztein-Dunlop, H., Forbes, A., Berry, M.V., Roadmap on structured light, *J. Opt.*, 2017, vol. 19, no. 1, 013001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/19/1/013001>.
- [3] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Sinusoidal Gaussian optical vortex as a superposition of two hypergeometric beams, *Comput. Opt.*, 2022, vol. 46, no. 1, pp. 16–21. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1008>.
- [4] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Nalimov, A.G., Astigmatic transformation of a set of edge dislocations embedded in a Gaussian beam, *Comput. Opt.*, 2021, vol. 45, no. 2, pp. 190–199. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-849>.
- [5] Kovalev, A.A., Kotlyar, V.V., Kalinkina, D.S., Orbital angular momentum and topological charge of a Gaussian beam with multiple optical vortices, *Comput. Opt.*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 34–39. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-632>.
- [6] Volotovskiy, S.G., Karpeev, S.V., Khonina, S.N., Algorithm for reconstructing the complex coefficients of the Laguerre–Gauss modes from the intensity distribution for their coherent superposition, *Comput. Opt.*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 352–362. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-727>.
- [7] Shostka, N.V., Sokolenko, B.V., Karakcheva, O.S., Prisyazhniuk, A.V., Voytitsky, V.I., Poletaev, D.A., Halilov, S.I., Digital holographic visualization of microparticles retained by an optical spatial trap, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1697, no. 1, 012161. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012161>.
- [8] Porfirev, A.P., Kovalev, A.A., Kotlyar, V.V., Optical trapping and moving of microparticles using asymmetrical Bessel-Gaussian beams, *Comput. Opt.*, 2016, vol. 40, no. 2, pp. 152–7. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157>.
- [9] Kovalev, A.A., Kotlyar, V.V., Porfirev, A.P., Transfer of orbital angular momentum from asymmetric Laguerre-Gaussian beams to dielectric microparticles,

Comput. Opt., 2016, vol. 40, no. 3, pp. 305–11. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-3-305-311>.

[10] Rykov, M.A., Skidanov, R.V., Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap, *Appl. Opt.*, 2014, vol. 53, no. 2, pp. 156–164. <https://doi.org/10.1364/AO.53.000156>.

[11] Georgieva, A., Belashov, A.V., Petrov, N.V., Optimization of DMD-based independent amplitude and phase modulation by analysis of target complex wavefront, *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, 7754. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11443-x>.

[12] Rodin, V.G., A non-coherent holographic correlator based on a digital micromirror device, *Comput. Opt.*, 2018, vol. 42, no. 3, pp. 347–353. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353>.

[13] Juday, R.D., Correlation with a spatial light modulator having phase and amplitude cross coupling, *Appl. Opt.*, 1989, vol. 28, no. 22, pp. 4865–4869. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004865>.

[14] Watanabe, E., Kodate, K., Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter, *Opt. Review*, 2005, vol. 12, no. 6, pp. 460–466. <https://doi.org/10.1007/s10043-005-0460-9>.

[15] Zeng, X., Bai, J., Hou, C., Yang, G., Compact optical correlator based on one phase only spatial light modulator, *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 1383–1385. <https://doi.org/10.1364/OL.36.001383>.

[16] Wang, J., Advances in communications using optical vortices, *Photonics Res.*, 2016, vol. 4, no. 5, pp. B14–B28. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000B14>.

[17] Halilov, S., Ilyasova, A., Rubass, A., Pogrebnaya, A., Multiplexing and demultiplexing of the complex signal in the singular beams propagating in a few-mode optical fibers: An experiment, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, vol. 737, no. 1, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012003>.

- [18] Liu, J., Li, S.M., Zhu, L., et al., Direct fiber vector eigenmode multiplexing transmission seeded by integrated optical vortex emitters, *Light Sci. Appl.*, 2018, vol. 7, 17148. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.148>.
- [19] Gibson, G., Courtial, J., Padgett, M.J., Vasnetsov, M., Pas'ko, V., et al., Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum, *Opt. Express*, 2004, vol. 12, no. 22, pp. 5448–5456. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448>.
- [20] Wang, J., Yang, J.Y., Fazal, I., et al., Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing, *Nat. Photon.*, 2012, vol. 6, pp. 488–496. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>.
- [21] Milione, G., Lavery, M.P.J., Huang, H., Ren, Y., Xie, G., Nguyen, T.A., Karimi, E., Marrucci, L., Nolan, D.A., Alfano, R.R., Willner, A.E., 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer, *Opt. Lett.*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 1980–1983. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001980>.
- [22] Kazanskiy, N.L., Khonina, S.N., Karpeev, S.V., Porfirev, A.P., Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams, *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 7, pp. 629–635. <https://doi.org/10.1070/QEL17276>.
- [23] Barshak, E.V., Lapin, B.P., Vikulin, D.V., Alieva, S.S., Alexeyev, C.N., Yavorsky, M.A., All-fiber SWAP-CNOT gate for optical vortices, *Comput. Opt.*, 2021, vol. 45, no. 6, pp. 853–859. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-938>.
- [24] Halilov, S.I., Rubass, A.F., Sokolenko, B.V., Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Shostka, V.I., Yakubov, S.I., Onikienko, E.V., Spiral fiber optic filter, *2022 VIII International Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848766.
- [25] Volyar, A.V., Khalilov, S.I., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Egorov, Yu.A., Measuring Singularities of Vector Structured LG Beams and Stokes Vortices via

Intensity Moments Technique, *Opt. Mem. Neural Networks*, 2023, vol. 32, no. Suppl. 1, pp. S63–S74. <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050193>.

[26] Khalilov, S.I., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Volyar, A.V., Apatova, N.V., Ivakhnenko, A.O., Digital Sorting of Structured Vector LG Beams by the Moment of Intensity Method, *Opt. Mem. Neural Networks*, 2023, vol. 32, no. Suppl. 1, pp. S90–S96. <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050089>.

[27] Lyubopytov, V.S., Tlyavlin, A.Z., Sultanov, A.K., Bagmanov, V.K., Khonina, S.N., Karpeev, S.V., Kazanskiy, N.L., Mathematical model of completely optical system for detection of mode propagation parameters in an optical fiber with few-mode operation for adaptive compensation of mode coupling, *Comput. Opt.*, 2013, vol. 37, no. 3, pp. 352–359.

[28] Abramochkin, E., Razueva, E., Volostnikov, V., General astigmatic transform of Hermite-Laguerre-Gaussian beams, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, vol. 27, no. 11, pp. 2506–2513. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.27.002506>.

[29] Volyar, A., Abramochkin, E., Bretsko, M., Khalilov, S., Akimova, Y., General Astigmatism of Structured LG Beams: Evolution and Transformations of the OAM Super-Bursts, *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 7, 727. <https://doi.org/10.3390/photonics10070727>.

[30] Volyar, A.V., Abramochkin, E.G., Akimova, Y.E., Bretsko, M.V., Huge spikes and dips of the orbital angular momentum in structured Laguerre-Gaussian beams resistant to simple astigmatism, *Comput. Opt.*, 2023, vol. 47, no. 3, pp. 350–360. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1243>.

[31] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Orbital angular momentum of an astigmatic Gaussian laser beam, *Comput. Opt.*, 2017, vol. 41, no. 5, pp. 609–616. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-5-609-616>.

[32] Volyar, A., Abramochkin, E., Akimova, Y., Bretsko, M., Egorov, Y., Fast oscillations of orbital angular momentum and Shannon entropy caused by radial

numbers of structured vortex beams, *Appl. Opt.*, 2022, vol. 23, no. 21, pp. 6398–6407. <https://doi.org/10.1364/AO.464178>.

[33] Abramochkin, E., Volostnikov, V., Beam transformations and nontransformed beams, *Opt. Commun.*, 1991, vol. 83, no. 1–2, pp. 123–135. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(91\)90534-k](https://doi.org/10.1016/0030-4018(91)90534-k).

[34] Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Y.E., Egorov, Y.A., Digital analysis of a speckle pattern of chaotic mode composition and restoration of a regular intensity pattern after a multimode fiber, *Comput. Opt.*, 2021, vol. 45, no. 2, pp. 179–189. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-831>.

[35] Kogelnik, H., Li, T., Laser Beams and Resonators, *Appl. Opt.*, 1966, vol. 5, no. 10, pp. 1550–1567. <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>.

[36] Siegman, A.E. Lasers, University Science Books: Mill Valley, CA, USA, 1986.

[37] Fadeyeva, T., Alexeyev, C., Rubass, A., Volyar, A., Vector erf-Gaussian beams: Fractional optical vortices and asymmetric TE and TM modes, *Opt. Lett.*, 2012, vol. 37, no. 9, pp. 1397–1399. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001397>.

[38] Fadeyeva, T., Rubass, A., Egorov, Y., Volyar, A., Swartzlander, G., Quadrefringence of optical vortices in a uniaxial crystal, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, vol. 25, no. 7, pp. 1634–1641. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.001634>.

[39] Shen, Y., Yang, X., Naidoo, D., Fu, X., Forbes, A., Structured ray-wave vector vortex beams in multiple degrees of freedom from a laser, *Optica*, 2020, vol. 7, no. 7, pp. 820–831. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.382994>.

[40] Shen, Y., Wang, X., Xie, Z., Min, Ch., Fu, X., Liu, O., Gong, M., Yuan, X., Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities, *Light Sci. Appl.*, 2019, vol. 8, no. 90. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2>.

[41] Abramochkin, E., Razueva, E., Volostnikov, V., General astigmatic transform of Hermite–Laguerre–Gaussian beams, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, vol. 27, no. 11, pp. 2506–2513. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.27.002506>.

- [42] Volyar, A., Abramochkin, E., Akimova, Y., Bretsko, M., Astigmatic-invariant structured singular beams, *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 11, 842. <https://doi.org/10.3390/photonics9110842>.
- [43] Volyar, A., Bretsko, M., Khalilov, S., Akimova, Y., Structurally Stable Astigmatic Vortex Beams with Super-High Orbital Angular Momentum (ABCD Matrix Approach), *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 9, 1048. <https://doi.org/10.3390/photonics10091048>.
- [44] Volyar, A., Abramochkin, E., Egorov, Yu., Bretsko, M., Akimova, Ya., Fine structure of perturbed Laguerre-Gaussian beams: Hermite-Gaussian mode spectra and topological charge, *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59, no. 25, pp. 7680–7687. <https://doi.org/10.1364/AO.396557>.
- [45] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Orbital angular momentum of paraxial propagation-invariant laser beams, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2022, vol. 39, no. 6, pp. 1061–1065. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.457660>.
- [46] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Porfirev, A.P., Determination of an optical vortex topological charge using an astigmatic transform, *Comp. Opt.*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 781–792. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-781-792>.
- [47] Khonina, S.N., Kotlyar, V.V., Soifer, V.A., Jefimovs, K., Paakkonen, P., Turunen, J., Astigmatic Bessel laser beams, *J. Mod. Opt.*, 2004, vol. 51, no. 5, pp. 677–686. <https://doi.org/10.1080/09500340408235545>.
- [48] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Porfirev, A.P., Measurement of the orbital angular momentum of an astigmatic Hermite–Gaussian beam, *Comp. Opt.*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 356–367. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-356-367>.
- [49] Zhan, Q., Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications, *Advances in Optics and Photonics*, 2009, vol. 1, pp. 1–57. DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
- [50] Karpeev, S.V., Generation of radially polarized zero-order Bessel beams by diffractive and polarization optics, *Computer Optics*, 2016, vol. 40(4), pp. 583–587. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.

- [51] Karpeev, S.V., Podlipnov, V.V., Degtyarev, S.A., Aljubili, A.M., Formation of high-order cylindrical vector beams with sector sandwich structures, *Computer Optics*, 2022, vol. 46(5), pp. 682–691. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.
- [52] Stafeev, S.S., Kozlova, E.S., Nalimov, A.G., Focusing a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens, *Computer Optics*, 2020, vol. 44(1), pp. 29–33. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.
- [53] Kozawa, Yu., Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism, *Optics Letters*, 2005, vol. 30(22), pp. 3063–3065. DOI: 10.1364/OL.30.003063.
- [54] Kawauchi, H., Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate, *Optics Letters*, 2008, vol. 33(4), pp. 399–401. DOI: 10.1364/OL.33.000399.
- [55] Tidwell, S.C., Generating radially polarized beams interferometrically, *Applied Optics*, 1990, vol. 29, pp. 2234–2239. DOI: 10.1364/AO.29.002234.
- [56] Angelsky, O.V., Mokhun, I.I., Mokhun, A.I., Soskin, M.S., Interferometric methods in diagnostics of polarization singularities, *Physical Review E*, 2002, vol. 65, 036602. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.036602.
- [57] Rosales-Guzmán, C., Bhebhe, N., Forbes, A., Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM, *Optics Express*, 2017, vol. 25(21), pp. 25697–25706. DOI: 10.1364/OE.25.025696.
- [58] Ibragimov, A., Rubass, A., Halilov, S., Sokolenko, B., Akimova, Y., Bretsko, M., Modeling of self-consistent modes optical fibers with $V=3.8$, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1062(1), 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1062/1/012002.
- [59] Halilov, S., Ilyasova, A., Rubass, A., Pogrebnaya, A., Multiplexing and demultiplexing of the complex signal in the singular beams propagating in a few-mode optical fibers: An experiment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 737(1), 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012003.

- [60] Halilov, S.I., Rubass, A.F., Sokolenko, B.V., Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Shostka, V.I., Yakubov, S.I., Onikienko, E.V., Spiral fiber optic filter, *2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848766.
- [61] Shostka, N.V., Sokolenko, B.V., Karakcheva, O.S., Prisyazhniuk, A.V., Voytitsky, V.I., Poletaev, D.A., Halilov, S.I., Digital holographic visualization of microparticles retained by an optical spatial trap, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697(1), 012161. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012161.
14. Wang, J., Advances in communications using optical vortices, *Photonics Research*, 2016, vol. 4(5), pp. B14–B28. DOI: 10.1364/PRJ.4.000B14.
- [62] Karpeev, S.V., Podlipnov, V.V., Algubili, A.M., An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator, *Computer Optics*, 2020, vol. 44(2), pp. 214–218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.
- [63] Yi, Zh., Li, P., ChaoJie, M., Sheng, L., Huachao, Ch., Han, L., Jianlin, Zh., Efficient generation of vector beams by calibrating the phase response of a spatial light modulator, *Applied Optics*, 2017, vol. 56, pp. 4956–4960. DOI: 10.1364/AO.56.004956.
- [64] Shen, Y., Wang, X., Xie, Z., Min, Ch., Fu, X., Liu, Q., Gong, M., Yuan, X., Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities, *Light: Science & Applications*, 2019, vol. 8(90), October 2019. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [65] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Savelyeva, A.A., Topological charge of a superposition of identical parallel single-ringed Laguerre-Gaussian beams, *Computer Optics*, 2022, vol. 46(2), pp. 184–188. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1086.
- [66] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Nalimov, A.G., Superposition of two Laguerre-Gaussian beams shifted from the optical axis, *Computer Optics*, 2022, vol. 46(3), pp. 366–374. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1057.

- [67] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Orbital angular momentum of structurally stable laser beams, *Computer Optics*, 2022; vol. 46(4), pp. 517–521. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1108.
- [68] Volyar, A., Abramochkin, E., Akimova, Y., Bretsko, M., Egorov, Y., Fast oscillations of orbital angular momentum and Shannon entropy caused by radial numbers of structured vortex beams, *Applied Optics*, 2022, vol. 61(21), pp. 6398–6407. DOI: 10.1364/AO.464178.
- [69] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Savelyeva, A.A., Coherent superposition of the Laguerre-Gaussian beams with different wavelengths: colored optical vortices, *Computer Optics*, 2022, vol. 46(5), pp. 692–700. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1106.
- [70] Kotlyar, V.V., Abramochkin, E.G., Kovalev, A.A., Savelyeva, A.A., Double Laguerre-Gaussian beams, *Computer Optics*, 2022, vol. 46(6), pp. 872–876. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1177.
- [71] Khonina, S.N., Volotovskiy, S.G., Kirilenko, M.S., A method of generating a random optical field using the Karhunen-Loeve expansion to simulate atmospheric turbulence, *Computer Optics*, 2020, vol. 44(1), pp. 53–59. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-680.
- [72] Kotlyar, V.V., Kovalev, A.A., Kalinkina, D.S., Kozlova, E.S., Fourier-Bessel beams of finite energy, *Computer Optics*, 2021, vol. 45(4), pp. 506–511. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-864.
- [73] Born, M. Principles of optics / M. Born, E. Wolf – Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, 1968. – 509–510 p.
- [74] Dennis, M.R. Polarization singularities in paraxial vector fields: morphology and statics, *Optics Communications*, 2002, vol. 213, pp. 201–221. DOI: 10.1016/S0030-4018(02)02088-6.
- [75] Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Egorov, Yu.A., Beyond the light intensity or intensity moments and measurements of the vortex spectrum in complex

light beams, *Computer Optics*, 2018, vol. 41(1), pp. 736–743. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-736-743.

[76] Volyar, A.V., Abramochkin, E.G., Egorov, Yu.A., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Digital sorting of Hermite-Gauss beams: mode spectra and topological charge of a perturbed Laguerre-Gauss beam, *Computer Optics*, 2020, vol. 44(4), pp. 501–509. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-747.

[77] Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Ya.E., Egorov, Yu.A., Sorting Laguerre-Gaussian beams by radial numbers via intensity moments, *Computer Optics*, 2020, vol. 44(2), pp. 155–166. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-677.

[78] Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Y.E., Egorov, Y.A., Digital analysis of a speckle pattern of chaotic mode composition and restoration of a regular intensity pattern after a multimode fiber, *Computer Optics*, 2021, vol. 45(2), pp. 179–189. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-831.