

УДК 535.2

НЕТИПИЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СИНГУЛЯРНОСТИ
В КОМБИНИРОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКАХ

© 2004 г. Г. В. Богатырева*, К. В. Фельде**, П. В. Полянский**, М. С. Соскин*

*Институт физики НАН Украины, 03680 Киев, Украина

**Черновицкий национальный университет, 58012 Черновцы, Украина

Поступила в редакцию 02.02.2004 г.

Проанализированы нетипичные поляризационные структуры сингулярных пучков, образованных при когерентном коаксиальном смещении взвешенных ортогонально поляризованных однозарядных лаггерр-гауссовых мод с различными радиальными индексами. Получено общее решение для суперпозиции эллиптически ортогонально поляризованных парциальных вихревых пучков, исследованы предельные частные случаи, когда смешиваемые моды поляризованы линейно или циркулярно. Установлено, что в таких комбинированных пучках возникают необычные пространственно устойчивые поляризационные структуры, такие как замкнутые C -контуры и L -контуры с постоянным азимутом линейной поляризации. Результаты подтверждены экспериментально с использованием нового дифракционного метода тестирования фазовых сингулярностей в оптических пучках.

ВВЕДЕНИЕ

Сингулярная оптика – раздел современной физической оптики, изучающий световые пучки, один из параметров которых (фаза в скалярных полях) вырожден [1]. Простейший вид фазовых сингулярностей – дислокации волнового фронта в однородно поляризованных пучках типа мод Лаггерра–Гаусса (ЛГ) с ненулевыми азимутальным и/или радиальным индексами [2].

Одними из наиболее интересных объектов исследования сингулярной оптики являются поляризационные сингулярности, возникающие в пространственно-неодородно поляризованных (“псевдодеполяризованных” [3]) световых полях, таких как развитые спекл-поля. Сингулярная структура такого поля формируется [4] дисклинациями волнового фронта (d -сингулярностями), а также C -точками (точками, в которых поле поляризовано циркулярно) и L -контурными (линиями, на которых поле поляризовано линейно), наблюдаемыми в плоскости, перпендикулярной среднему направлению распространения параксиального оптического пучка.

Дисклинации светового поля ненаблюдаемы вследствие изменений фазы поля с оптической частотой. Поэтому основное внимание уделяется стабильным C - и L -сингулярностям, а также ассоциируемым с ними так называемым стоковым сингулярностям [5, 6]. В случае типичного (generic [4]) спекл-поля C -сингулярности могут быть только изолированными (точечными), поскольку какое бы то ни было смещение от C -точки неизбежно приводит к нарушению одного из двух (либо обоих) условий циркулярной поляризации: равенства амплитуд ортогональных поляризацион-

ных компонент поля и четвертьволнового сдвига фаз между ними. Азимут линейной поляризации на L -контурных также изменяется вследствие изменения отношения амплитуд синфазных (или противофазных) ортогональных компонент поля вдоль L -контур. Такие свойства поляризационных сингулярностей не являются, однако, универсальными. Ситуация существенно изменяется при оперировании с детерминированными вихревыми пучками с контролируемыми параметрами.

Ранее (в скалярном приближении) было установлено, что необычными сингулярными свойствами обладают комбинированные вихревые световые пучки, впервые реализованные в работе [7] посредством коаксиального когерентного смещения различных ЛГ-мод. В той же работе была построена теория скалярных комбинированных пучков, несущих оптические вихри, и обнаружены их нетривиальные свойства, такие как несохранение суммарного топологического заряда, рождение и аннигиляция оптических вихрей.

В настоящей работе впервые реализуются и анализируются нетипичные (nongeneric [4]) поляризационные структуры сингулярных пучков, возникающие при когерентной коаксиальной суперпозиции ортогонально поляризованных ЛГ-мод с одинаковыми топологическими зарядами, но с различными радиальными индексами. Интерес к таким структурам возник в результате исследования фазовых сингулярностей в частично пространственно-когерентных полях [8, 9], образованных при коаксиальном смещении взаимно некогерентных ЛГ-мод. Оказалось, что помимо центрального вихря пространственной функции когерентности такие пучки несут кольцевую син-

гулярность комплексной степени когерентности, причем такая сингулярность является аналогом нелокализованной темной интерференционной полосы [10] в строго когерентных сингулярных пучках. Экспериментально, однако, в работе [9] удалось выявить только центральный вихрь, так как в радиальном распределении амплитуды комбинированного пучка отсутствует нуль.

В то же время когерентное смещение поляризационно ортогональных мод с меняющимся по радиусу отношением амплитуд приводит к формированию комбинированного пучка с тем же радиальным распределением интенсивности, что и в случае [9], но с переменным состоянием поляризации. Неоднородное радиальное распределение состояния поляризации является близким аналогом радиального распределения комплексной степени когерентности: оба явления описываются комбинациями элементов матрицы когерентности Вольфа [11]. Однако поляризационный анализ комбинированного пучка позволяет выявлять кольцевые сингулярности поляризационных параметров, аналогичные предсказываемым теорией [8, 9] кольцевым сингулярностям комплексной степени когерентности. Инструмент, аналогичный поляризационному анализу, отсутствует в теории частичной когерентности. Кроме того, в обоих случаях оказывается неэффективным традиционный интерференционный метод диагностики фазовых сингулярностей [1, 12], так как опорная волна не может быть когерентной одновременно с двумя (или несколькими) взаимно некогерентными модами либо быть одинаково поляризованной с поляризационно ортогональными модами. Таким образом, реализация поляризационного аналога результата [9] открывает возможность по крайней мере косвенного подтверждения наличия кольцевых сингулярностей комплексной степени когерентности в частично пространственно-когерентных вихревых пучках.

Несмотря на нетипичность кольцевых поляризационных сингулярностей в комбинированных пучках, такие искусственно сформированные структуры вследствие возможности их гибкого контроля могут оказаться полезными в задачах оптических телекоммуникаций, оптических вычислений и оптической неразрушающей диагностики.

В данной работе рассматривается когерентное смещение двух взвешенных однозарядных ЛГ-мод с низшими радиальными индексами $0, \pm 1$. Получено общее решение, описывающее суперпозицию эллиптически ортогонально поляризованных вихревых пучков. Обсуждаются предельные частные случаи, когда смешиваемые пучки поляризованы линейно либо циркулярно. Показано, что в этом случае возникают необычные поляри-

зационные структуры, а именно замкнутые S -контуры и L -контуры с постоянным азимутом линейной поляризации. Эксперимент по выявлению поляризационных сингулярностей выполнен с использованием поляризационного анализа комбинированных пучков и нового (безопорного) метода дифракционного анализа фазовых сингулярностей, впервые примененного в [9] и детально обоснованного в [13]. Суть дифракционной диагностики фазовых сингулярностей состоит в расположении в сингулярном пучке непрозрачного полосового экрана и суждении о модуле и знаке оптического вихря (либо о наличии нелокализованной сингулярности) по изгибу и смещению интерференционных полос, наблюдаемых в области геометрической тени экрана. При этом определяется не разность фаз тестируемого пучка и отдельной опорной волны, а разность фаз возмущений в двух пробных точках самого сингулярного пучка, т.е. данный метод является автокорреляционным.

УСТОЙЧИВЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В КОМБИНИРОВАННЫХ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКАХ

Простейший нетривиальный случай рассматриваемой проблемы состоит в когерентном коаксиальном смешении взвешенных ортогонально поляризованных ЛГ-мод $LG_0^{||}$ и $LG_1^{||}$. Следуя результатам работ [8, 9], выберем моды с равными каустическими параметрами, одинаковыми знаками топологического заряда и отношением интегральных мощностей $P_0/P_1 = 1.45$. Подобно случаю некогерентной суперпозиции таких мод [9] интерференция между поляризационно ортогональными модами отсутствует, а радиальное распределение интенсивности в комбинированном пучке оказывается подобным такому же распределению в простой моде $LG_0^{||}$, как видно из рис. 1.

Определим состояния поляризации ортогонально поляризованных мод LG_0^{+1} и LG_1^{+1} (либо LG_0^{-1} и LG_1^{-1}) векторами Джонса [14]

$$\begin{bmatrix} ae^{i\varphi_x} \\ be^{i\varphi_y} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -be^{-i\varphi_y} \\ ae^{-i\varphi_x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

соответственно. Вектор Джонса комбинированного пучка имеет вид

$$\begin{bmatrix} a \\ be^{i\varphi_{yx}} \end{bmatrix} + ce^{-i\Delta} \begin{bmatrix} b \\ -ae^{i\varphi_{yx}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + cbe^{-i\Delta} \\ b - cae^{-i\Delta} e^{i\varphi_{yx}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

При записи (1) декартовы координаты (x, y) выбираются так, чтобы первоначально x -компоненты парциальных мод были синфазными в окрестности центрального оптического вихря, будучи в противофазе при $\rho/w_z > 1$, где фаза моды $LG_1^{||}$ изменяется на π . В формуле (2) $\Phi_{yx} = \varphi_y - \varphi_x$; $c \equiv c(\rho/w_z)$ – отношение амплитуд мод как функция безразмерного параметра ρ/w_z , равного отношению радиальной координаты $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ к ширине пучка w_z на расстоянии z от шейки каустики, причем

$$w_z = w_0 [1 + (z^2/\pi^2 w_0^4) \lambda^2]^{1/2},$$

где w_0 – ширина шейки каустики, оцениваемая по уровню e^{-1} относительно максимального значения амплитуды (здесь и далее аргумент функциональной зависимости $c(\rho/w_z)$ опускается); Δ – фазовый сдвиг между модами, который считается постоянным по сечению комбинированного пучка в предположении равенства каустических параметров и, следовательно, одинаковой кривизны смешиваемых волновых фронтов в плоскости наблюдения, равноудаленной от шеек двух каустик. Рассматривая поляризационную задачу, мы пренебрегаем радиальной зависимостью a и b , поскольку состояние поляризации комбинированного пучка определяется исключительно соотношением амплитуд и фаз ортогональных поляризационных составляющих. Измерение этого соотношения вдоль радиуса комбинированного пучка исчерпывающе учитывается множителем $ce^{-i\Delta}$.

Пучку с вектором Джонса (2) соответствуют следующие параметры Стокса:

$$\begin{aligned} S_0 &= (1 + c^2)(a^2 + b^2), \\ S_1 &= (1 - c^2)(a^2 - b^2) + 4cab \cos \Delta, \\ S_2 &= 2\{(1 - c^2)abc \cos \Phi_{yx} - \\ &- c[a^2 \cos(\Delta - \Phi_{yx}) - b^2 \cos(\Delta + \Phi_{yx})]\}, \\ S_3 &= 2\{(1 - c^2)ab \sin \Phi_{yx} + \\ &+ c[a^2 \sin(\Delta - \Phi_{yx}) + b^2 \sin(\Delta + \Phi_{yx})]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из формул (3) видно, что все параметры Стокса комбинированного пучка являются функциями радиальной координаты. Таким образом, комбинированный пучок оказывается пространственно-неоднородно поляризованным, причем как интенсивность, так и поляризационная структура такого пучка обладают аксиальной симметрией. Из формул (3) могут быть найдены азимут поляризации $\alpha = (1/2) \arctg(S_2/S_1)$ и угол эллиптичности $\beta = (1/2) \arcsin(S_3/S_0)$. Выражения (3) имеют

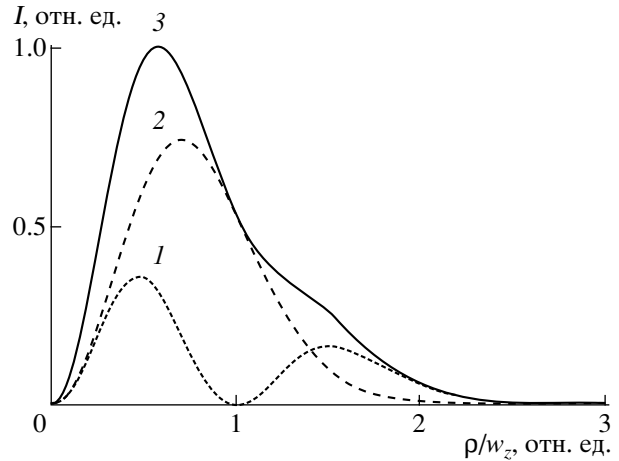


Рис. 1. Радиальные распределения интенсивности $I(\rho/w_z)$ ортогонально поляризованных мод LG_1^1 (1) и LG_0^1 (2) и комбинированного сингулярного пучка (3) при отношении интегральных мощностей парциальных мод 0.45 : 1.

общий характер и могут быть использованы для анализа произвольно (в общем случае эллиптически) ортогонально поляризованных мод. Ниже проанализируем наиболее показательные предельные случаи, когда парциальные моды поляризованы линейно либо циркулярно.

$b = 0$ – парциальные моды поляризованы линейно с азимутами 0° и 90°

Вследствие произвольности выбора декартова базиса (x, y) для разложения поля на ортогонально линейно поляризованные компоненты рассматриваемый случай является вполне общим.

При $\Delta = \pm\pi/2$ из (3) находим нормированные второй, третий и четвертый параметры Стокса:

$$\frac{1 - c^2}{1 + c^2}, 0, \pm \frac{2c}{1 + c^2}. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает блуждание точки, изображающей состояние поляризации комбинированного сингулярного пучка, вдоль меридиана сферы Пуанкаре, который определяется состояниями поляризации парциальных мод. Таким образом, комбинированный пучок в целом характеризуется эллиптической поляризацией с углом эллиптичности

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\pm \frac{2c}{1 + c^2}\right).$$

Радиальное распределение углов эллиптичности в комбинированном пучке показано на рис. 2. Азимут поляризации $\alpha = 0^\circ$ при $\rho/w_z < 1.45$, где

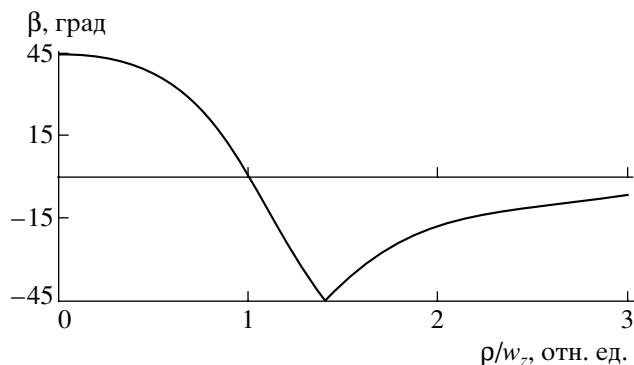


Рис. 2. Радиальное распределение угла эллиптичности $\beta(\rho/w_z)$ в комбинированном сингулярном пучке, образованном в результате когерентного смешения ортогонально линейно поляризованных мод с разностью фаз $\Delta = \pi/2$.

$|c| < 1$, и $\alpha = 90^\circ$ при $\rho/w_z > 1.45$, где $|c| > 1$. На кольце $\rho/w_z = 1$, где $c = 0$, пучок поляризован линейно, $\alpha = 0^\circ$, угол эллиптичности не определен вследствие изменения знака \arcsin на этом кольце. На кольце $\rho/w_z \approx 1.45$, где $|c| = 1$, пучок поляризован левозакрученно либо правозакрученно, если соответственно $\Delta = +\pi/2$ или $\Delta = -\pi/2$ (c – отрицательно). Такие состояния поляризации изображаются на полюсах сферы Пуанкаре, где азимут поляризации не определен вследствие неопределенности $\arctg(0/0)$. Отметим, что в терминах стоксовых сингулярностей [5] данная ситуация соответствует сингулярности комплексной функции $S_{12} = S_1 + iS_2$.

Таким образом, в поле эллиптических поляризаций на кольце $\rho/w_z = 1$ возникает L -контур с постоянным азимутом линейной поляризации $\alpha = 0^\circ$, а на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$ – замкнутый C -контур.

$b = a$, $\Phi_{yx} = \pm\pi/2$ – парциальные моды ортогонально циркулярно поляризованы

Из (3) находим нормированные второй, третий и четвертый параметры Стокса:

$$\frac{2c}{1+c^2} \cos \Delta, \mp \frac{2c}{1+c^2} \sin \Delta, \frac{1-c^2}{1+c^2}, \quad (5)$$

азимут поляризации $\alpha = \mp\Delta/2$ и угол эллиптичности

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \frac{1-c^2}{1+c^2}.$$

Выражение (5) описывает блуждание точки, изображающей состояние поляризации комбинированного пучка, вдоль меридиана сферы Пуанкаре, который определяется разностью фаз Δ между модами. Как и в предыдущем случае, в комбинированном пучке реализуется в общем

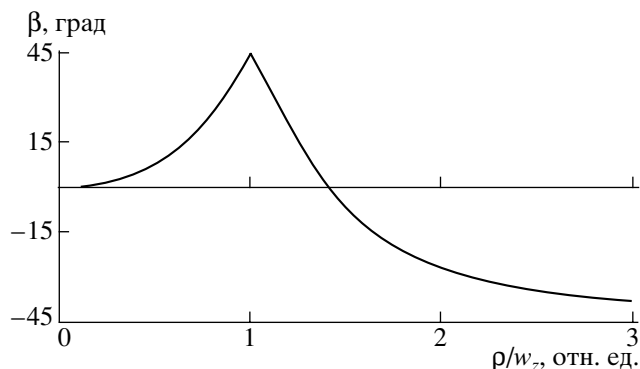


Рис. 3. Радиальное распределение угла эллиптичности $\beta(\rho/w_z)$ в комбинированном сингулярном пучке, образованном в результате когерентного смешения ортогонально циркулярно поляризованных мод.

пространственное распределение эллиптических состояний поляризации. Радиальное распределение углов эллиптичности для этого случая показано на рис. 3. На кольце $\rho/w_z = 1$, где $c = 0$, азимут поляризации не определен вследствие неопределенности $\arctg(0/0)$ и $\beta = \pm\pi/4$. Таким образом, на этом кольце получаем C -контур с поляризацией моды $LG_1^{||}$. На кольце $\rho/w_z = 1.45$, где $|c| = 1$, $\beta = 0^\circ$ (при том же азимуте поляризации $\alpha = \mp\Delta/2$). Здесь реализуется кольцевая сингулярность поля эллиптичности – L -контур с постоянным азимутом линейной поляризации. При пересечении этого кольца изображающая точка на сфере Пуанкаре переходит из северного полушария в южное либо наоборот (изменяется знак четвертого параметра Стокса) вследствие превалирования моды $LG_1^{||}$ при $\rho/w_z > 1.45$.

Рассмотренные нетипичные сингулярные структуры комбинированных пучков реализуются при любых w_z и расстояниях z от шейки каустики. В трехмерном пространстве они имеют вид оболочек (каустик).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Удобная экспериментальная методика выявления нетипичных поляризационных структур в комбинированных вихревых пучках может быть реализована с использованием обобщенного закона Малюса, формулируемого в терминах параметров Стокса. Поляризационному анализатору (в общем случае эллиптического типа) может быть поставлен в соответствие собственный вектор поляризации [14] – вектор с началом в центре сферы Пуанкаре и концом в точке этой сферы, изображающей состояние поляризации пучка, пропускаемого данным анализатором с максимальной интенсивностью. Аналогично можно оп-

ределить вектор поляризации тестируемого пучка как вектор, проведенный из центра сферы Пуанкаре к изображающей точке на сфере. Выбирая радиус сферы Пуанкаре равным единице, можно представить координаты обоих векторов как соответствующие нормированные параметры Стокса пучка ($\bar{s}_i^{(B)}$) и анализатора ($\bar{s}_i^{(A)}$), где $\bar{s}_i = S_i/S_0$, $i = 0, 1, 2, 3$. Тогда оптическое пропускание τ поляризационного анализатора представимо в виде

$$\tau \sim \cos^2 \theta = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 \bar{s}_i^{(B)} \bar{s}_i^{(A)}, \quad (6)$$

где θ – половинный угол между собственным вектором поляризационного анализатора (**A**) и вектором поляризации тестируемого пучка (**B**) на сфере Пуанкаре.

Пример применения такой методики иллюстрируется на рис. 4. Кривая 1 на рис. 4 соответствует случаю смещения линейно поляризованных мод при разности фаз между ними $\Delta = \pi/2$, собственный вектор циркулярного поляризационного анализатора соответствует правоциркулярной поляризации. В данном случае наблюдается радиальное распределение интенсивности, подобное распределению в парциальной моде LG_1^1 , но с нулем на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$, а не на кольце $\rho/w_z = 1$. На этом кольце посредством поляризационного анализа детектируется кольцевая сингулярность эллиптичности. Кривые 2 и 3 на рис. 4 соответствуют пучкам на выходе поляризационного анализатора, несущим только центральные вихри, тогда как кольцевые сингулярности поляризационных параметров отсутствуют. Кривая 2 характеризует комбинированный пучок, образованный двумя ортогонально линейно поляризованными модами со сдвигом фаз в четверть периода и пропущенный левоциркулярным поляризационным анализатором. Кривая 3 соответствует простому случаю, когда наблюдается только однородное ослабление пучка, показанного кривой 3 на рис. 1. Этот результат наблюдается, когда комбинированный пучок, сформированный двумя ортогонально линейно поляризованными модами со сдвигом фаз в четверть периода, пропускается линейным поляризационным анализатором, ось максимального пропускания которого образует угол $\pm 45^\circ$ с азимутами поляризации образующих мод.

Существование кольцевых сингулярностей поляризационных параметров (как и центрального оптического вихря) в комбинированных пространственно-неоднородно поляризованных сингулярных пучках может быть показано посредством тестирования пучка на выходе поляризационного анализатора с использованием непрозрачной по-

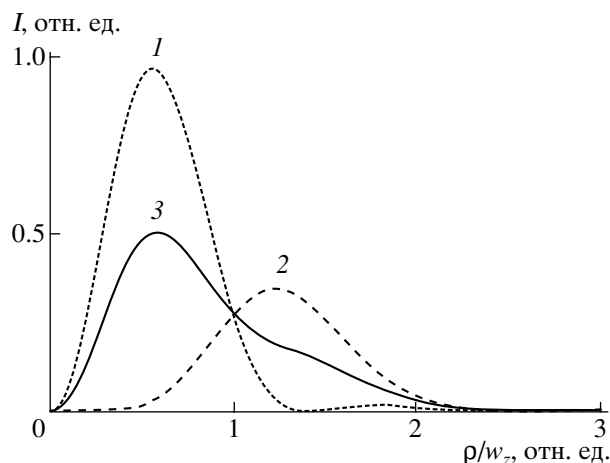


Рис. 4. Радиальное распределение интенсивности $I(\rho/w_z)$ на выходе поляризационного анализатора комбинированного вихревого пучка с распределением интенсивности, показанным на рис. 1, кривая 3. Пояснения в тексте.

лосы, располагаемой симметрично относительно центра пучка. Такая экспериментальная методика была предложена в [9] для тестирования частично пространственно-когерентных сингулярных пучков. Центральный вихрь диагностируется по искривлению интерференционных полос за непрозрачной полосой, величина и направление которого однозначно характеризуют модуль и знак топологического заряда оптического вихря [13]. Кольцевая сингулярность (в работе [9] – кольцевая сингулярность комплексной амплитуды моды $LG_1^{(1)}$) обнаруживается по сдвигу на полпериода интерференционных полос в окрестности линии нулевой амплитуды. Подобная методика представляется предпочтительной и в рассматриваемой здесь поляризационной задаче. Ее использование позволяет избежать сложностей, связанных с различием состояний поляризации опорного пучка и пространственно-неоднородно поляризованного тестируемого сингулярного пучка, возникающих при использовании классического интерферометрического метода детектирования оптических сингулярностей [1, 12].

Эксперимент по формированию комбинированных сингулярных пучков посредством когерентного смешения поляризационно ортогональных мод LG_0^{+1} и LG_1^{+1} (либо LG_0^{-1} и LG_1^{-1}) и тестированию поляризационной структуры таких пучков выполнен в схеме интерферометра Маха–Цендера, показанной на рис. 5. Гелий-неоновый лазер L излучает линейно (вертикально) поляризованный пучок LG_0^0 со следующими параметрами: $\lambda = 0.6328$ мкм, мощность ~ 30 мВт, ширина каустики $2w_0 = 1.6$ мм, дифракционное уширение

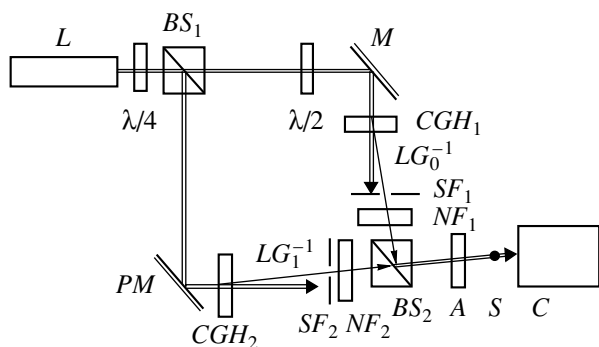


Рис. 5. Экспериментальная схема: L – лазер; BS_1, BS_2 – светоделительные кубики; CGH_1, CGH_2 – синтезированные голограммы для получения мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} соответственно; SF_1, SF_2 – пространственные фильтры; NF_1, NF_2 – нейтральные фильтры, M – стационарное зеркало, PM – пьезо зеркало, A – линейный или циркулярный поляризационный анализатор, S – дифракционный экран, C – CCD-камера; $\lambda/4, \lambda/2$ – четверть- и полуволновые пластинки.

$\theta \approx 2.5 \times 10^{-4}$ рад, релеевская длина $z_R \approx 3.177$ м. При таких параметрах пучка на расстоянии $z = 1$ м от шейки каустики радиус кривизны волнового фронта составляет $R \approx 11$ м, а $2w_z = 1.677$ мм.

Светоделитель BS_1 разделяет первичный пучок на два равноинтенсивных пучка. В плечах интерферометра располагаются внеосевые синтезированные голограммы CGH_1 и CGH_2 , рассчитанные для получения мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} в первых дифракционных порядках. Как известно [1, 9], оба пучка несут центральные однозарядные вихри, и, кроме того, фаза моды LG_1^{-1} имеет кольцевую сингулярность на кольце $\rho/w_z = 1$. Пространственные фильтры SF_1 и SF_2 располагаются за голограммами для выделения нужных дифракционных порядков.

Состояния поляризации мод, смешиваемых на светоделительном кубике BS_2 , задаются следующим образом. На входе интерферометра устанавливается четвертьволновая пластинка. Если какая-либо ось этой пластинки совпадает с азимутом поляризации лазерного пучка, то обе голограммы освещаются одинаково линейно поляризованными пучками. Поляризационная ортогональность мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} обеспечивается использованием полуволновой пластинки, оси которой составляют углы $\pm 45^\circ$ относительно азимута поляризации лазерного пучка. В нашем эксперименте полуволновая пластинка вводилась в моду LG_0^{-1} , которая становилась горизонтально линейно поляризованной. Если какая-либо ось четвертьволновой пластинки составляет угол 45° с

азимутом поляризации лазерного пучка, то пучок на входе интерферометра поляризован циркулярно. В этом случае использование полуволновой пластинки в каком-либо плече интерферометра обеспечивает формирование ортогонально циркулярно поляризованных мод на выходе. Требуемый баланс интегральных мощностей смешиваемых мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} , в нашем случае $1 : 0.45(\pm 0.03)$, обеспечивается использованием контролируемых нейтральных ослабителей NF_1 и NF_2 в плечах интерферометра.

Один из пучков отражается от стационарного зеркала M , а другой – от зеркала PM , установленного на пьезо керамике (полуволновое напряжение 5.5В, шаг изменения напряжения 0.1В, что соответствует изменению разности фаз в плечах интерферометра $\sim 0.018\pi$).

Тонкой юстировкой, описанной в [13], достигается коаксиальность парциальных смешиваемых мод на выходе интерферометра за кубиком BS_2 . В комбинированном пучке располагается измеритель мощности с квазиточечной диафрагмой (не показанный на рис. 5) для измерения пространственного распределения интенсивности в пучке либо линейный или циркулярный поляризационный анализатор A – тандем четвертьволновой пластинки и линейного анализатора, допускающий известные взаимные ориентации осей двух элементов. Далее, симметрично центру пучка располагается непрозрачный экран S с шириной $2d = 1$ мм, так что $d/w_z \approx 0.3$, для дифракционного тестирования фазовой структуры пучка и CCD-камера C для регистрации экспериментальных результатов.

Главный экспериментальный результат, соответствующий случаю ортогонально линейно поляризованных мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} при $\Delta = \pi/2$, показан на рис. 6. Фрагменты рис. 6а иллюстрируют комбинированный пучок с радиальным распределением интенсивности, показанным кривой 3 на рис. 1, не подвергнутый поляризационной селекции, и результат его дифракционного тестирования. Визуализируется только центральный вихрь, тогда как какие-либо кольцевые сингулярности отсутствуют, как и в случае, исследованном в [9]. А именно искривление интерференционных полос указывает на присутствие однозарядного оптического вихря с левой закруткой фазового геликоида. В то же время кольцевая сингулярность поля азимутов поляризации, т.е. C -контур на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$ (рис. 3), не наблюдается в соответствии с вышеизложенным рассмотрением. Фрагменты рис. 6б, 6в демонстрируют соответственно результаты поляризационной селекции комбинированного пучка с использованием линейного анализатора, собственный вектор которого совпадает с векторами поляризации мод

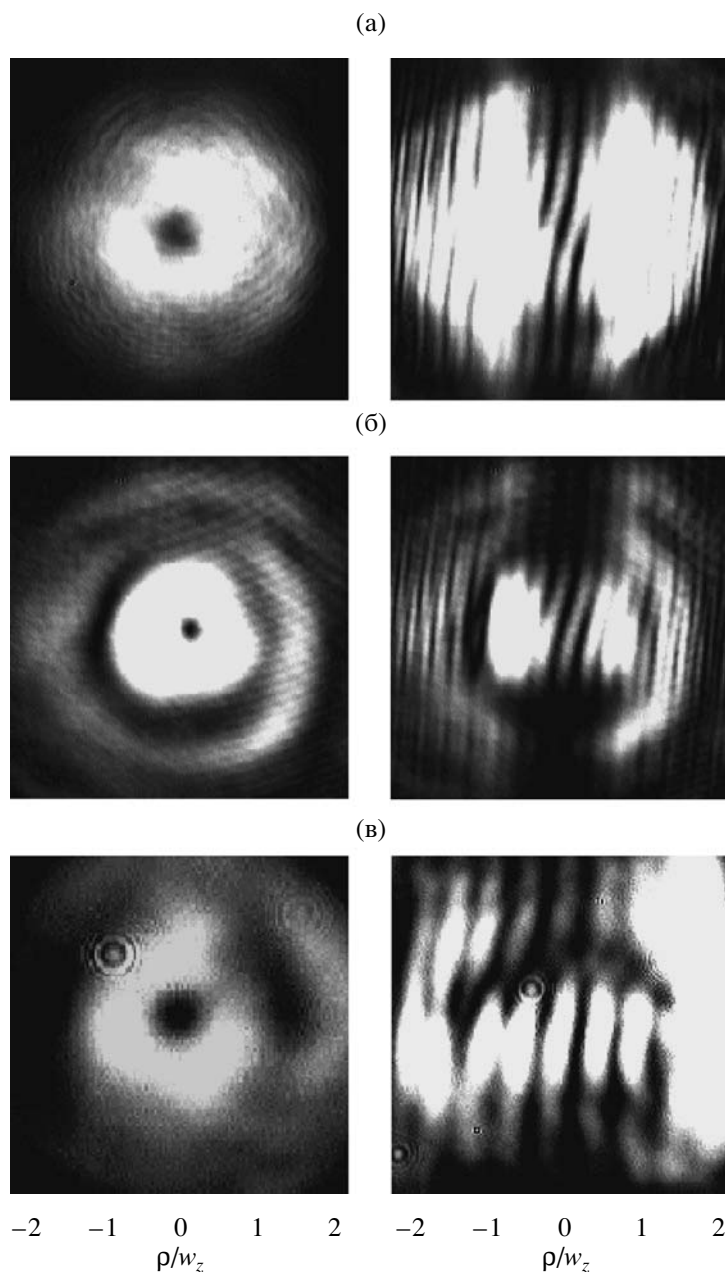


Рис. 6. Поляризационная структура комбинированного пучка, сформированного при коаксиальном сложении ортогонально линейно поляризованных мод LG_0^{-1} и LG_1^{-1} (слева – распределение интенсивности, справа – результат дифракционного тестирования): а – комбинированный пучок до поляризационной селекции; б – визуализация L -контура с постоянным азимутом линейной поляризации, соответствующим моде LG_1^{-1} , на кольце $\rho/w_z = 1$; в – визуализация C -контура на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$ посредством поляризационной селекции пучка с использованием циркулярного анализатора (кривая 1 на рис. 4).

LG_0^{-1} и LG_1^{-1} . На рис. 6в помимо центрального вихря наблюдается L -контур на кольце $\rho/w_z = 1$ с постоянным азимутом линейной поляризации, соответствующим поляризации моды LG_0^{-1} . Действительно, кольцевая сингулярность при $\rho/w_z = 1$ обнаруживается по сдвигу интерференционных

полос на полпериода на внутреннем и внешнем светлых кольцах.

Экспериментально установлено, что совершенно аналогичный результат получается в случае, когда комбинированный пучок, сформированный ортогонально циркулярно поляризованными модами, пропускается линейным

поляризационным анализатором. При этом на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$ визуализируется L -контур с постоянным азимутом линейной поляризации.

Экспериментально также подтверждается устойчивость кольцевых поляризационных сингулярностей к турбулентным возмущениям, вносимым на трассе распространения комбинированного пучка. Действительно, в данном случае реализуется принцип одинаковых искажений компонент пучка, так что отношение амплитуд и фаз парциальных ЛГ-мод, определяющее состояние поляризации комбинированного пучка, в каждой точке остается неизменным. Поэтому поляризационная структура комбинированного пучка оказывается стабильной, несмотря на фазовые искажения каждой из его компонент.

ВЫВОДЫ

В данной работе реализованы и исследованы нетипичные поляризационные сингулярности в комбинированных сингулярных пучках, образованных в результате когерентного коаксиального смешения взвешенных ортогонально поляризованных однозарядных ЛГ-мод с различными радиальными индексами. Определены условия формирования S -контуров (контуров циркулярной поляризации) и L -контуров с постоянным азимутом линейной поляризации. Проанализированы характерные сингулярности поляризационных параметров комбинированных вихревых пучков. Результаты расчеты подтверждены экспериментально посредством поляризационного анализа и дифракционной диагностики сингулярных пучков.

Радиальное распределение интенсивности для исследованных пучков идентично соответствующему распределению для скалярных комбинированных пучков, образованных в результате смешения взаимно некогерентных мод $LG_0^{||}$ и $LG_1^{||}$ с тем же соотношением интегральных мощностей [9]. Дифракционная диагностика центральных оптических вихрей тождественна в обоих случаях. Однако в случае пространственно-неоднородно поляризованных комбинированных пучков удастся непосредственно выявить сингулярности поляризационных параметров на кольце, на котором амплитуды смешиваемых мод уравниваются. Такая возможность отсутствует в скалярном случае [9], поскольку при измерениях частичной пространственной когерентности отсутству-

ет аналог поляризационного анализатора. Таким образом, реализованный здесь поляризационный аналог частично пространственно-когерентного пучка косвенно подтверждает вывод о наличии нелокализованной кольцевой сингулярности комплексной степени когерентности на кольце $\rho/w_z \approx 1.45$.

Отметим в заключение, что реализованный в данной работе метод теоретического и экспериментального анализа комбинированных пучков имеет вполне общий характер и может использоваться для изучения комбинированных неоднородно поляризованных сингулярных пучков, образованных модами с произвольными азимутальными и радиальными индексами.

Авторы выражают благодарность проф. Дж. Наю за плодотворное обсуждение результатов настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* Singular Optics // Progress in Optics / Ed. by Solf E. Amsterdam: Elsevier, 2001. V. 42. P. 219–267.
2. *Siegman A.E.* Lasers. Mill Valley: University Science Books, 1986.
3. *Полянский В.К., Ковальский Л.В.* // Опт. и спектр. 1973. Т. 35. В. 2. С. 345–350.
4. *Nye J.* Natural Focusing and the Fine Structure of Light: Caustics and Wave Dislocations. Bristol: Inst. Phys. Publ., 1999.
5. *Freund I.* // Opt. Commun. 2002. V. 201. P. 251–270.
6. *Freund I., Soskin M.S., Mokhun A.I.* // Opt. Commun. 2002. V. 208. P. 223–253.
7. *Soskin M.S., Gorshkov V.N., Vasnetsov M.V., Malos J.T., Heckenberg N.R.* // Phys. Rev. A. 1997. V. 56. P. 4064–4076.
8. *Ponomarenko S.A.* // JOSA. A. 2001. V. 18. P. 150–156.
9. *Bogatyryova G.V., Felde Ch.V., Polyanskii P.V., Ponomarenko S.A., Soskin M.S., Wolf E.* // Opt. Lett. 2003. V. 28. P. 878–880.
10. *Ney J., Berry M.V.* // Proc. Roy. Soc. London. A. 1974. V. 336. P. 165–190.
11. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973.
12. *Bogatyryova G.V., Soskin M.S.* // Semicond. Phys., Quant. Electron. and Optoelectron. 2003. V. 6. P. 254–258.
13. *Bogatyryova G.V., Felde Ch.V., Polyanskii P.V.* // Opt. Appl. 2003. V. 33. P. 695–708.
14. *Shurcliff W.A.* Polarized Light. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1962.