

28. Контроль орбитального углового момента на основе трехмерных свойств спиральных фазовых пластин для длин волн инфракрасного диапазона

В. В. Подлипнов^{1,2}, С. Г. Волотовский^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

В работе исследуются спектральные свойства спиральных фазовых пластинок (СФП), производящих пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Для вычисления результирующего ОУМ используется метод измерения всего двух максимальных коэффициентов разложения. Изготовлена СФП, дающая единичный ОУМ на длине волны 1500 нм. На основе корреляционного метода проведены качественные экспериментальные исследования изменений формируемого ОУМ при изменении рабочей длины волны. Получено согласование экспериментальных результатов с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: Орбитальный угловой момент, Спиральная фазовая пластинка, Инфракрасный диапазон.

Цитирование: Подлипнов, В. В. Контроль орбитального углового момента на основе трехмерных свойств спиральных фазовых пластин для длин волн инфракрасного диапазона / В. В. Подлипнов, С. Г. Волотовский // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 171–175.

Введение

Пучки, обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ), вот уже более 30 лет являются темой многочисленных исследований. Основные достижения и проблемы в области применений вихревых пучков за это время рассмотрены в обзоре [1]. Формированию и исследованию как скалярных, так и векторных пучков, переносящих ОУМ, посвящен обзор [2]. Кроме того существует задача исследования свойств СФП, контроль и оценка качества. При этом одним из объектов исследования являются спектральные свойства как СФП [3], так и вилкообразных решеток [4], также производящих пучки с ОУМ. Метод [5] основан на прецизионном измерении расстояний между интерференционными полосами, что вызывает некоторые трудности, особенно в условиях низкого контраста полос интерферограммы.

Известны методы измерения ОУМ, основанные только на использовании цилиндрической линзы, которая вносит в пучок астигматическое искажение [6], позволяющее определить не только знак и порядок вихревой сингулярности, но и поляризационное состояние пучка. В настоящей работе с применением этого метода проведены исследования изготовленной для длины волны 1500 нм СФП в спектральном диапазоне от 400 нм до 1600 нм. Изменение

длины волны обеспечивалось перестройкой лазера без изменений оптической схемы. Подтверждено кратное изменение ОУМ для соответствующего кратного изменения длины волны.

1. Изменение порядка ОУМ при изменении длины волны

Рассмотрим формирование вихревого пучка с использованием спиральной фазовой пластинки, рельеф которой описывается функцией

$$h_{SPP}(x, y) = h_{\max} \frac{\arctg(y/x)}{2\pi}, \quad (1)$$

где h_{\max} — максимальная высота микрорельефа.

Как правило, SPP изготавливают так, чтобы h_{\max} соответствовало длине волны λ_0 используемого лазерного излучения.

$$h_{\max}(\lambda_0) = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1}, \quad (2)$$

где $n(\lambda_0)$ — показатель преломления материала для λ_0 , в котором изготавливается оптический элемент.

Комплексная функция пропускания оптического элемента (1) при освещении его лазерным излучением с произвольной длиной волны λ описывается следующим выражением:

$$\tau(x, y) = \exp\left(i2\pi \frac{h(x, y)}{h_{\max}(\lambda)}\right) = \exp\left(i \frac{h_{\max}(\lambda_0)}{h_{\max}(\lambda)} \varphi\right) \approx \exp\left(i \frac{\lambda_0}{\lambda} \varphi\right) = \exp(i\mu\varphi), \quad (3)$$

где $\mu = \lambda_0/\lambda$ соответствует порядку формируемого вихревого пучка.

Таким образом, возможно формирование вихревых пучков с дробным ОУМ μ , в случае отличия высоты рельефа от расчетной для заданной длины волны.

В таблице 1 приведены результаты численного моделирования формирования поля (11) SPP, изготовленной для $\lambda_0 = 1500$ нм в материале с показателем преломления $n(\lambda_0) = 1,435$ (высота $h_{\max}(\lambda_0) = 3070$ нм), но освещаемой излучением с различной длиной волны. Фокусное расстояние $f = 100$ мм, радиус оптического элемента $R = 1$ мм, освещающий пучок имел Гауссово распределение с радиусом перетяжки 0,5 мм.

Фазовую функцию спиральной пластинки с дробным зарядом μ (3) можно представить в виде комбинации фазовых функций, соответствующих целым зарядам, используя ряд Фурье:

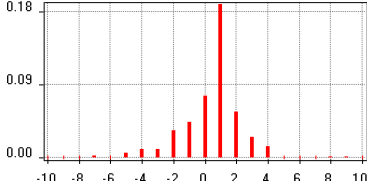

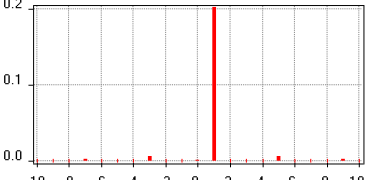
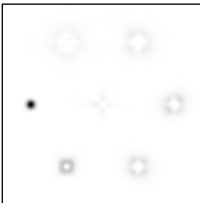
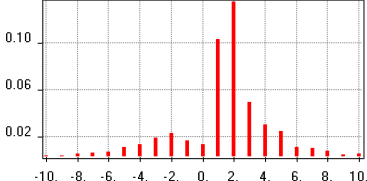
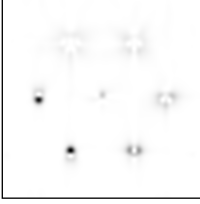
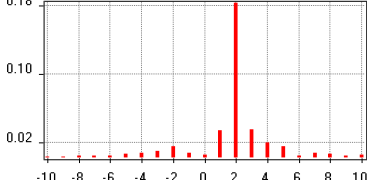

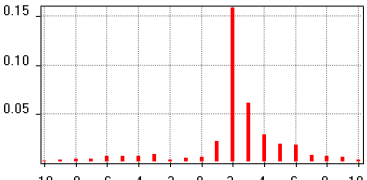

$$\exp(i\mu\varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp(im\varphi). \quad (4)$$

Вычислив коэффициенты ряда Фурье для пучка, можно определить величину ОУМ.

В работе [45] для вычисления значения μ предлагалось использовать три произвольных коэффициента и аппроксимировать их распределение параболой.

В данной работе мы рассматриваем более простой способ вычисления μ , используя модули двух максимальных соседних коэффициентов

Табл. 1. Результаты моделирования для СФП $\lambda_0 = 1500$ нм

$\mu = \lambda_0/\lambda$	Распределение в фокальной плоскости (интенсивность и фаза)	Амплитуды коэффициентов разложения	Вычисленное значение μ по (8) и (10) (погрешность в скобках)
$\mu = 0,6$ $\lambda = 1500$ нм			$\mu_N = 0,817$ (36,1%) $\mu_\delta = 0,714$ (19%)
$\mu = 1$ $\lambda = 900$ нм			$\mu_N = 0,999$ (0,1%) $\mu_\delta = 0,994$ (0,6%)
$\mu = 1,5$ $\lambda = 600$ нм			$\mu_N = 1,67$ (11,3%) $\mu_\delta = 1,56$ (4%)
$\mu = 1,8$ $\lambda = 500$ нм			$\mu_N = 1,98$ (10%) $\mu_\delta = 1,84$ (2,2%)
$\mu = 2,25$ $\lambda = 400$ нм			$\mu_N = 2,19$ (2,6%) $\mu_\delta = 2,28$ (1,3%)

2. Экспериментальные исследования

СФП была изготовлена методом прямой лазерной записи на станции круговой лазерной записи CLWS-2014. Запись осуществлялась в слое позитивного фоторезиста ФП-3535 толщиной 6 мкм, который был предварительно нанесен на кварцевую подложку методом центрифугирования. Оптическая схема для измерений корреляционным методом значений ОУМ на разных длинах волн приведена на рисунке 1. Изменение длины волны осуществляется за счет перестройки лазера Nt-242. Выходящий из лазера световой пучок эллиптической формы расширяется и ограничивается до сходящегося круглого пучка с начальным диаметром 10 мм и

фокусным расстоянием 0,7 м. В сходящемся пучке установлены как SPP, так и корреляционный фильтр. CCD, установленная в фокальной плоскости, позволяет наблюдать в соответствующих дифракционных порядках корреляционные максимумы для различных значений ОУМ.

Распределения интенсивности, полученные в плоскости установки CCD для различных длин волн, приведены на рисунке 2.

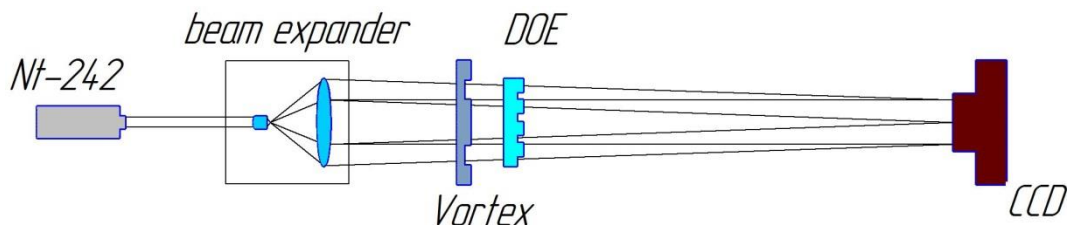


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

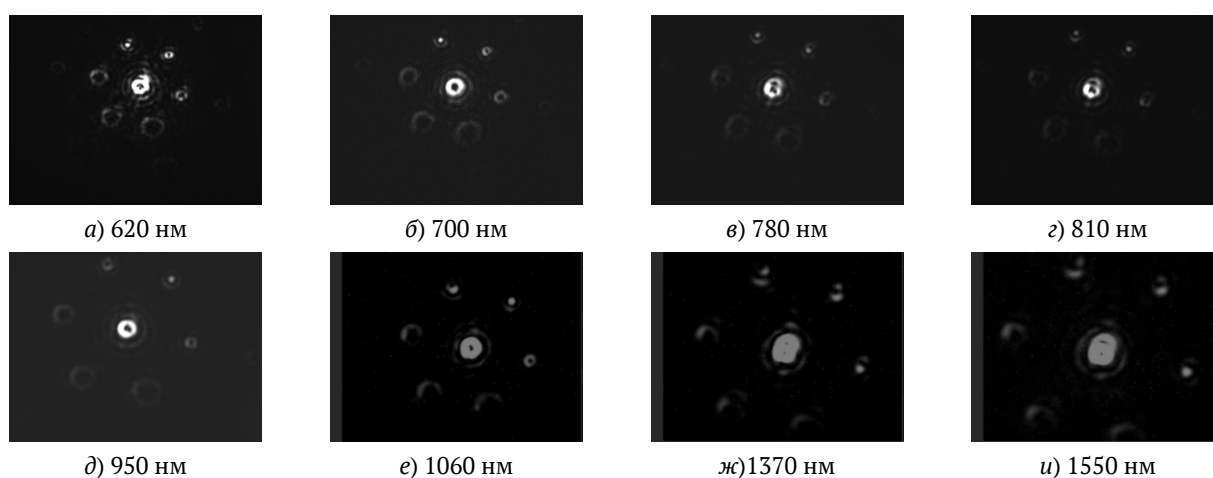


Рис. 2. Распределения интенсивности в фокальной плоскости при различных длинах волн с использованием элемента с высотой ступеньки 3,2 мкм

Заключение

Проведенное исследование посвящено спектральным свойствам СФП. В работе предложен и реализован новый подход к вычислению результирующего ОУМ на основе измерения всего двух максимальных коэффициентов разложения, дающий меньшую погрешность по сравнению с традиционным методом. Предложенный метод вычисления ОУМ обеспечил возможность применения корреляционного метода измерения с помощью многоканального ДОЭ, обладающего ограниченным числом порядков. С помощью перестраиваемого лазера и корреляционного фильтра проведено экспериментальное исследование изменения ОУМ в зависимости от длины волны.

Благодарность

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант №18-29-20045) в части формирования спиральной фазовой пластинки проведения эксперимента и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (МК-1797.2019.2) в рамках выполнения работ по Государственному заданию

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части расчета ДОЭ для выделения корреляционных пиков.

Список источников

- [1] **Shen, Y.** [Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities](#) / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, ...X. Yuan // *Light: Science & Applications*. — 2019. — Vol. 8. — № 1. — P. 1–29. — DOI:10.1038/s41377-019-0194-2.
- [2] **Pachava, S.** [Generation and decomposition of scalar and vector modes carrying orbital angular momentum: a review](#) / S. Pachava, R. Dharmavarapu, A. Vijayakumar, S. Jayakumar, A. Manthalkar, A. Dixit, N. K. Viswanathan, B. Srinivasan, S. Bhattacharya // *Optical Engineering*. — 2019. — Vol. 59. — № 4. — P. 041205. — DOI:10.1117/1.OE.59.4.041205.
- [3] **Khonina, S. N.** Diffraction patterns with mth order symmetry generated by sectional spiral phase plates / S. N. Khonina, A. P. Porfirev, A. V. Ustinov // *Journal of Optics*. — 2015. — Vol. 17. — № 12. — P. 125607.
- [4] **Porfirev, A.** [Efficient generation of arrays of closed-packed high-quality light rings](#) / A. Porfirev, S. Khonina, Y. Azizian-Kalantaragh, M. Kirilenko // *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. — 2019. — Vol. 37. — P. 100736. — DOI:10.1016/j.photonics.2019.100736.
- [5] **Fang, Y.** Fractional-topological-charge-induced vortex birth and splitting of light fields on the submicron scale / Y. Fang, Q. Lu, X. Wang, W. Zhang, L. Chen // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 95. — № 2. — C. 023821.
- [6] **Khonina, S. N.** Astigmatic Bessel laser beams / S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, V. A. Soifer, K. Jefimovs, P. Paakkonen, J. Turunen // *Journal of Modern optics*. — 2004. — Vol. 51. — № 5. — P. 677-686.