

Распространение гауссова пучка с набором нулей интенсивности

В.В. Котляр^{1,2}, А.А. Ковалёв^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

Аннотация

Теоретически показано как гауссов пучок с конечным числом параллельных линий нулей интенсивности (краевых дислокаций) с помощью цилиндрической линзы преобразуется в вихревой пучок, имеющий орбитальный угловой момент и топологический заряд. Причем в начальной плоскости у такого пучка уже есть орбитальный угловой момент, но нет топологического заряда, который появляется только, при распространении в свободном пространстве.

Ключевые слова

орбитальный угловой момент, топологический заряд, нули интенсивности, оптический вихрь

1. Введение

Оптические вихри интенсивно исследуются в настоящее время [1]. Формировать лазерные оптические вихри можно множеством разных способов. Вот только некоторые из них: цифровая голограмма с несущей частотой [2, 3], амплитудная дифракционная решетка с вилочкой [4], модовый конвертор [5], спиральная фазовая пластинка [6], спиральный аксикон [7]. В данной работе рассмотрен более простой способ. В работе на примере двух параллельных линий нулей интенсивности, симметрично расположенных относительно центра, показана динамика формирования двух нулей интенсивности на двойном фокусном расстоянии: при увеличении расстояния между вертикальными линиями нулей интенсивности два оптических вихря формируются сначала на горизонтальной оси, потом сходятся в центр, а затем расходятся, но уже по вертикальной оси. Топологический заряд такого оптического вихря при любом расстоянии между линиями нулей равен -2 . Причем на любом расстоянии по оптической оси, кроме начальной плоскости. При изменении расстояния между линиями нулей интенсивности меняется орбитальный угловой момент пучка. Он может быть отрицательным, положительным и при определенном расстоянии между линиями нулей интенсивности орбитальный угловой момент может быть равен нулю. Показано также, что в случае неограниченного числа линий нулевой интенсивности, формируется пучок с конечным орбитальным угловым моментом и с бесконечным топологическим зарядом.

2. Моделирование

Комплексная амплитуда светового поля в начальной плоскости рассчитывалась по формуле:

$$E(x, y, z=0) = \frac{(x^2 - a^2)}{w^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2} - \frac{ik}{4f}(x+y)^2\right), \quad (1)$$

где k – волновое число света, w – радиус перетяжки гауссова пучка, (x, y) – поперечные декартовы координаты и z – продольная координата вдоль оптической оси, f – фокусное расстояние цилиндрической линзы. Две вертикальные линии нулей интенсивности в (1) находятся на расстояниях $+a$ и $-a$ от вертикальной оси y . На расстоянии $z=2f$ световое поле рассчитывалось с помощью преобразования Френеля аналитически. На рис. 1 показаны

распределения интенсивности и фазы в начальной плоскости и на двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы гауссова пучка с двумя симметричными линиями нулевой интенсивности с разными расстояниями между этими линиями. Распределения в начальной плоскости и на двойном фокусном расстоянии были получены с помощью полученных в работе формул. Параметры расчёта: длина волны $\lambda = 532$ нм, радиус перетяжки гауссова пучка $w = 0,5$ мм, фокусное расстояние цилиндрической линзы $f = 1$ м, расчётная область во входной плоскости $|x|, |y| \leq 1,5$ мм, расчётная область во выходной плоскости $|\xi|, |\eta| \leq 3$ мм, расстояние между линиями нулевой интенсивности $a = 0$ (одна линия второго порядка) (рис. 1а-з), $a = 0,8a_0$ (рис. 1д-з), $a = a_0$ (рис. 1и-м), $a = 1,2a_0$ (рис. 1н-р), где $a_0 = w/[2(1+\gamma^2)]^{1/2}$ – расстояние, при котором должен формироваться осевой вихрь 2-го порядка.

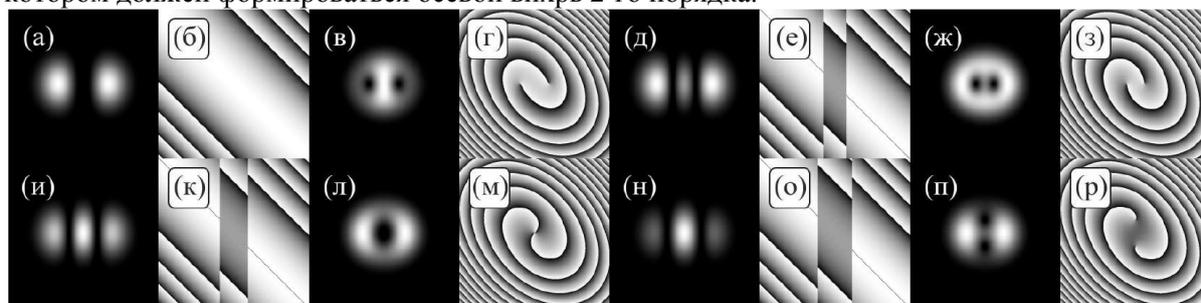


Рисунок 1: Распределения интенсивности (нечетные столбцы) и фазы (четные столбцы) в начальной плоскости (столбцы 1, 2, 5, 6) и на двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы (столбцы 3, 4, 7, 8) гауссова пучка с двумя симметричными линиями нулевой интенсивности с разными расстояниями между этими линиями

Из рис. 1 видно, что при $a = 0$ (центральная линия нулевой интенсивности второго порядка) оптические вихри (изолированные нули интенсивности) минус первого порядка в выходной плоскости расположены на горизонтальной оси и максимально отдалены друг от друга (рис. 1а-з). При увеличении расстояния a между линиями нулевой интенсивности в начальной плоскости оптические вихри в выходной плоскости приближаются друг к другу (рис. 1д-з).

При достижении расстоянием a величины $a = \frac{w}{\sqrt{2(1+\gamma^2)}}$ оба вихря в выходной плоскости

сливаются в один эллиптический вихрь минус второго порядка (рис. 1и-м). При дальнейшем увеличении расстояния a вихрь в выходной плоскости снова разделяется на два вихря минус первого порядка, но уже расположенные на вертикальной оси.

3. Литература

- [1] Kotlyar, V.V. Vortex Laser Beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev. – CRC Press, 2018.
- [2] Vasara, A. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms / A. Vasara, J. Turunen, A.T. Friberg // J. Opt. Soc. Am. A. – 1989. – Vol. 6(11). – P. 1748-1754.
- [3] Heckenberg, N.R. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms / N.R. Heckenberg, R. McDaff, C.P. Smith, A.G. White // Opt. Lett. – 1992. – Vol. 17(3). – P. 221-223.
- [4] Bazhenov, V.Yu. Screw dislocations in light wavefronts / V.Yu. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // J. Mod. Opt. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 985-990.
- [5] Abramochkin, E. Beam transformation and nontransformed beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // Opt. Commun. – 1991. – Vol. 83(1,2). – P. 123-135.
- [6] Kotlyar, V.V. The phase rotor filter / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, G.V. Uspleniev, M.V. Shinkarev, V.A. Soifer // J. Modern Optics. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 1147-1154.
- [7] Khonina, S.N. Trochoson / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev, M.V. Shinkarev // Optics Communications. – 1992. – Vol. 91(3-4). – P. 158-162.