

# Инвариантные к распространению косинусные вихревые лазерные пучки с бесконечным топологическим зарядом

В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, А.А. Ковалёв<sup>1,2</sup>

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

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

## Аннотация

Исследовано семейство инвариантных к распространению гауссовых световых полей со счётным числом оптических вихрей и потому с бесконечным топологическим зарядом. Комплексная амплитуда пучков этого семейства равна амплитуде гауссова пучка, умноженной на косинус от комплексного аргумента. Во всех рассмотренных примерах оптические вихри находятся на одной или двух декартовых осях в плоскости перетяжки. Распределение интенсивности таких пучков либо состоит из двух световых пятен, либо имеет вид четырёхконечной звезды. При распространении в свободном пространстве распределение интенсивности поворачивается на угол, равный фазе Гоу. Аналитически установлен орбитальный угловой момент и исследована его зависимость от плотности оптических вихрей.

## Ключевые слова

Оптический вихрь, топологический заряд, орбитальный угловой момент

## 1. Введение

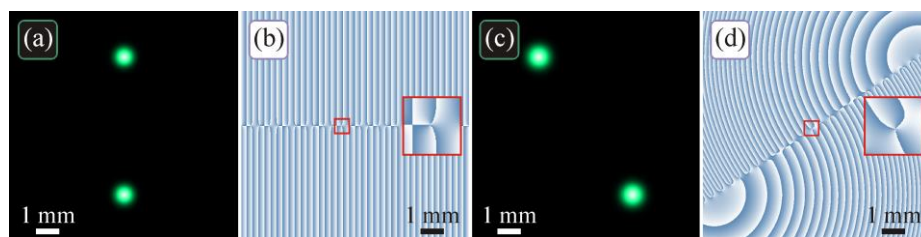
Вихревые лазерные пучки характеризуются двумя параметрами – орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1] и топологическим зарядом (ТЗ) [2]. С начала изучения вихревых пучков множество работ было посвящено получению пучков с как можно большим значением ОУМ или ТЗ. Например, в [3] показано, что для получения больших значений ОУМ вообще не требуются оптические вихри. Вместо этого, можно использовать цилиндрическую линзу. В [4] использовалась спиральная фазовая пластинка, формировавшая фотоны с ТЗ, превышающим 10000. Возникает вопрос, насколько большое значение могут иметь ОУМ и ТЗ, по крайней мере теоретически, и могут ли они быть бесконечными. В данной работе мы основываемся на описании инвариантных к распространению гауссовых пучков [5,6] с некоторой модулирующей функцией от комплексного аргумента. В качестве такой функции мы рассматриваем косинус, возведённый в некоторую степень. Для таких пучков аналитически исследуется вид поперечного распределения интенсивности и фазы. Показано, что картина интенсивности может состоять из двух симметричных (или одного центрального) световых пятен или иметь вид четырёхконечной звезды, а на распределении фазы имеется бесконечное число оптических вихрей одинакового порядка, расположенных на одной или двух прямых. Следовательно, ТЗ таких пучков бесконечен. Также в работе получен ОУМ и спектр ОУМ [7] этих пучков и исследована его зависимость от плотности оптических вихрей.

В декартовых координатах  $(x, y, z)$  комплексная амплитуда таких пучков имеет вид:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{q} \cos^m \left( \frac{x + iy}{\alpha_0 q} \right)^p \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{qw_0^2} \right), \quad (1)$$

где  $q = 1 + iz/z_0$ ,  $z_0 = kw_0^2/2$  – расстояние Рэлея,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число света с длиной волны  $\lambda$ ,  $w_0$  – радиус перетяжки гауссова пучка,  $\alpha_0$  – масштабирующий множитель, влияющий на плотность оптических вихрей,  $p$  и  $m$  – целые числа (либо  $p = 1$  и  $m > 0$ , либо  $p = 2$  и  $m = 1$ ).

На Рисунке 1 показаны распределения интенсивности и фазы пучка (1) ( $p = 1$ ) в начальной плоскости и после распространения в пространстве. Параметры расчёта: длина волны  $\lambda = 532$  нм, радиус перетяжки  $w_0 = 0,5$  мм, порядок и масштабирующий множитель косинуса  $m = 3$  и  $\alpha_0 = w_0/4$ , расстояние распространения  $z = 1$  м, расчётная область  $|x|, |y| \leq R$  ( $R = 5$  мм).



**Рисунок 1:** Распределения интенсивности (a,c) и фазы (b,d) пучка (1) в начальной плоскости (a,b) и после распространения в пространстве (c,d)

В работе получена точная формула для ОУМ  $J_z$  (нормированного на мощность  $W$ ) пучков (1). При  $\alpha_0 \ll w_0$  она имеет простой вид:  $J_z/W = (m^2/2)(w_0/\alpha_0)^2$ . Параболическая зависимость ОУМ от ТЗ оптических вихрей  $m$  объясняется тем, что расстояние до светового пятна от центра прямо пропорционально  $m$ , как и азимутальная составляющая вектора Пойнтинга вблизи этих пятен.

В заключение отметим, что в работе исследованы свойства инвариантных к распространению (структурно-устойчивых) гауссовых пучков, модулированных косинусной функцией комплексного аргумента. Показано, что топологический заряд таких пучков бесконечен, так как в них бесконечно число оптических вихрей и все они имеют одинаковый порядок. Орбитальный угловой момент таких пучков растёт квадратично с порядком (степенью) косинусной модулирующей функции, с радиусом перетяжки гауссова пучка, и с ростом линейной плотности оптических вихрей, так как всё меньше вихрей находится в зоне заметной интенсивности гауссова пучка. Такие пучки могут использоваться для увеличения продольного разрешения изображающих систем, поскольку при некоторых параметрах распределение интенсивности содержит два световых пятна, поворачивающихся при распространении, а также для оптических коммуникаций, поскольку форма поперечного распределения интенсивности при распространении не меняется.

## 2. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003), Российского научного фонда (грант 18-19-00595), а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

## 3. Литература

- [1] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // Phys. Rev. A – 1992. – Vol. 45(11). – P. 8185-8189.
- [2] Berry, M.V. Optical vortices evolving from helicoidal integer and fractional phase steps / M.V. Berry // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2004. – Vol. 6(2). – P. 259-268.
- [3] Courtial, J. Gaussian beams with very high orbital angular momentum / J. Courtial, K. Dholakia, L. Allen, M.J. Padgett // Opt. Commun. – 1997. – Vol. 144. – P. 210-213.
- [4] Fickler, R. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10010 / R. Fickler, G. Campbell, B. Buchler, P.K. Lam, A. Zeilinger // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2016. – Vol. 113(48). – P. 13642-13647.
- [5] Abramochkin, E.G. Spiral-type beams: optical and quantum aspects / E.G. Abramochkin, V.G. Volostnikov // Opt. Commun. – 1996. – Vol. 125(4-6). – P. 302-323.

- [6] Abramochkin, E.G. Modern optics of Gaussian beams / E.G. Abramochkin, V.G. Volostnikov. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2010.
- [7] Воляр, А.В. Формирование и анализ спектров оптических вихрей сингулярных пучков с аномалиями орбитального углового момента / А.В. Воляр, М.В. Брецько, Я.Е. Акимова, Ю.А. Егоров // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 517-527. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-517-527.