

Ж. В. Колядко, В. В. Шепелевич

## ОПТИЧЕСКИЕ СИНГУЛЯРНЫЕ ПУЧКИ

В последнее десятилетие возросло потенциальное применение *оптических сингулярных пучков (вихрей)* для решения ряда задач современной технологии, например, оптической обработки информации.

Основным свойством оптических вихрей является наличие на волновом фронте фазовых сингулярностей – точек, где фаза волны не определена и амплитуда волны обращается в нуль [1]. Волновой фронт вихревых световых пучков выглядит как семейство непересекающихся поверхностей и имеет винтовую структуру. Расстояние между соседними поверхностями равно длине волны. При математическом описании такой особенности принято говорить о наличии сингулярности, что и стало причиной появления термина «сингулярная оптика» [2].

Отличительная черта винтовой дислокации состоит в том, что при обходе вокруг нее по поверхности волнового фронта фаза изменяется ровно на  $2\pi$ . В зависимости от направления закрутки, винтовые дислокации подразделяются на левые (отрицательные) и правые (положительные). В связи с тем, что направление распространения световой энергии задаётся вектором, перпендикулярным в каждой точке

поверхности волнового фронта, в окрестности винтовой дислокации происходит завихрение энергетического потока [2].

Оптические вихри имеют много аналогий в природе: ураганы, торнадо, водовороты. Размер ядра вихря вычисляется и может быть использован как индикатор силы данной системы. Действительно, подступающий ураган или тайфун с малым ядром являются предвестниками плохой погоды [3].

В работе Дж.Ф. Ная и М. Берри [4] впервые были описаны фазовые сингулярности. Следует отметить, что ещё более ранние научные сведения о фазовых сингулярностях были получены в 1830-х Вевеллем [4]. Он изучал приливы океана и волны, проходящие фазовые сингулярности и поворачивающие течение вокруг сингулярной точки, назвал вихрями.

Привлекает внимание динамика распространения оптических вихрей как в линейных, так и в нелинейных средах (самодефокусирующаяся керровская среда [5], фоторефрактивная среда [6]). В дефокусирующей среде такой пучок может распространяться как вихревой солитон благодаря балансу между дифракцией, которая расширяет профиль тёмного ядра, и рефракцией, которая сужает его.

Вихревые пучки формируются при прохождении света через спиральные оптические элементы (спиральная фазовая пластинка [7]), пространственные световые модуляторы, специальным образом изготовленные голограммы, также возможно возбуждение вихревых полей непосредственно в лазерах.

Тёмное ядро оптического вихря может быть использовано в качестве фильтра для ослабления пучка света. Оптические вихри создаются при прохождении пучка света через дифракционные оптические элементы, которые представляют собой пластинку из стекла со спиральным узором. Оптическая вихревая коронография может быть построена путем размещения в области спиральности дифракционного оптического элемента вблизи плоскости изображения телескопа [8]. Внесолнечные планеты были обнаружены совсем недавно благодаря созданию оптических вихревых коронографов.

Оптические вихри, используемые в оптических пинцетах, могут манипулировать микронными частицами. Такие частицы могут вращаться по орбитам вокруг оси светового пучка. Если пучок света взаимодействует с частицей, спин заставляет частицу вращаться вокруг её оси, но если с частицей взаимодействует вихревой пучок, орбитальный момент вихря заставляет частицу вращаться вокруг центра вихря (который находится в центра пучка) [9].

Одним из решений волнового уравнения является цилиндрическое решение, которое определяет вихрь и характеризуется фазовым множителем  $\exp(im\theta)$ , где  $\theta$  – азимутальная координата и  $m$  – целое число, называемое топологическим зарядом [10].

Распространение вихревого светового пучка вдоль  $z$  направления можно описать в параксиальном приближении, используя скалярное волновое уравнение. Используя цилиндрические координаты, поле вихря можно представить в виде

$$E(r, \theta, z) = E_0 G_{bg}(r, z) \exp[i\Phi(r, z)] A(r, z) \exp(im\theta) \exp(-ikz) = \\ = E_0 u(r, \theta, z) \exp(-ikz), \quad (1)$$

где  $E_0$  – характерная амплитуда;  $\Phi(r, z)$  – изменение фазы при распространении пучка;  $A(r, z)$  – профиль амплитуды ядра вихря;  $G_{bg}(r, z)$  – амплитуда фонового пучка;  $u(r, \theta, z)$  – нормализованная медленно изменяющаяся комплексная функция,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число и  $\lambda$  – длина волны.

Предполагается, что фоновым полем является профиль гауссова пучка:

$$G_{bg}(r, z) = \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right],$$

где  $w(z)$  – характерный размер пучка.

Рассмотрим две различные функции ядра вихря: *tanh vortex*

$$A(r, z=0) = \tanh\left(\frac{r}{w_v}\right), \quad (2)$$

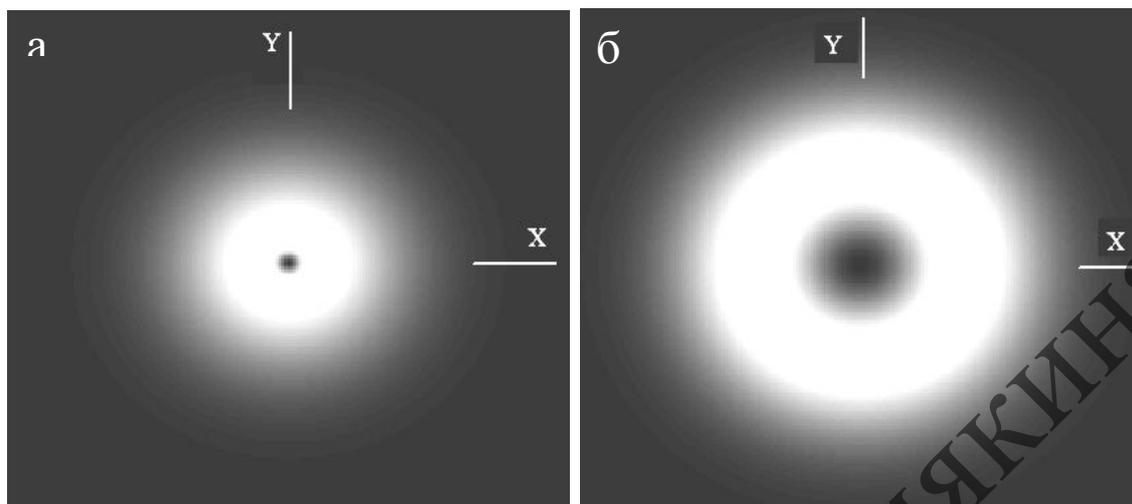
и *r vortex*:

$$A(r, z=0) = \left(\frac{r}{w_r}\right)^m, \quad (3)$$

где  $w_v$  – размер ядра *tanh vortex*,  $w_r$  – размер ядра *r vortex*.

На рисунках 1,а и 1,б показаны профили интенсивностей для *tanh vortex* и *r vortex* соответственно, построенные, используя одинаковый фоновый гауссовый пучок. На рисунке 2 показаны профили интенсивности *tanh vortex* (кривая 1) и *r vortex* (кривая 2) ( $I_{отн.} = I/I_{max}$ ,  $x_{отн.} = x/w_0$ ,  $w_0$  – характерный размер фонового Гауссова пучка). Как видно, при одних и тех же условиях относительная интенсивность *tanh vortex* значительно выше, чем *r vortex*.

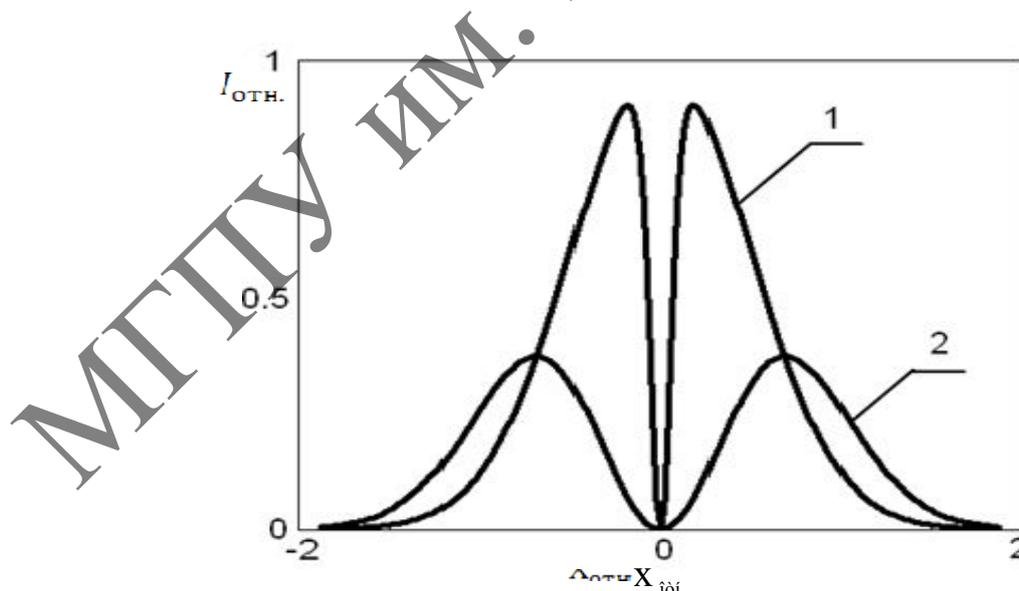
Следует отметить, что для формирования оптических вихревых солитонов обычно используется *tanh vortex* [10]. Ширина ядра *r vortex* зависит от ширины фонового пучка в отличие от ширины ядра *tanh vortex*, которая является независимым параметром [11].



а –  $\tanh$  vortex; б –  $r$  vortex

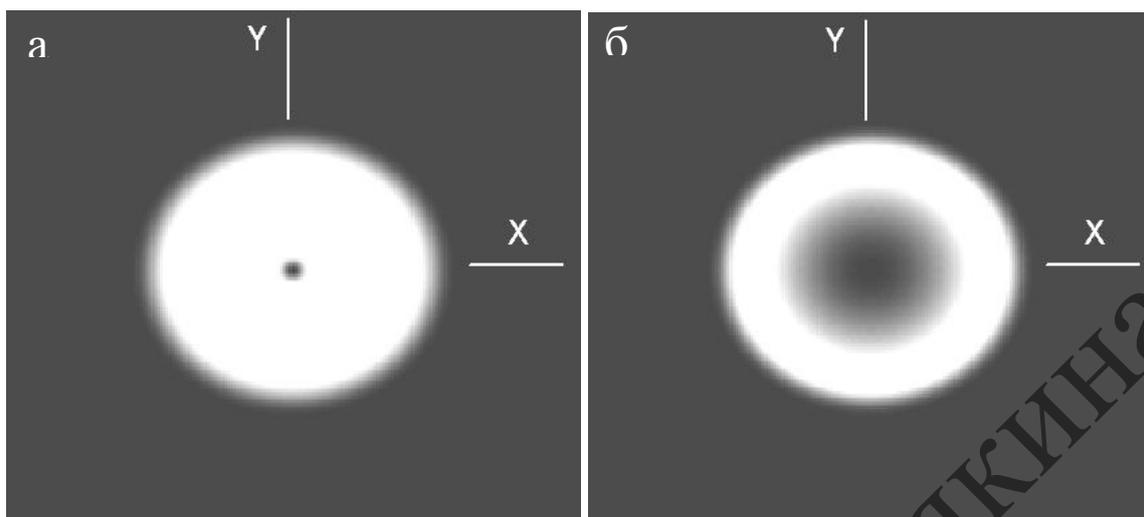
Рисунок 1 – Профили интенсивностей вихревого пучка, наложенного на гауссов фоновый пучок (вид сверху)

Для сравнения покажем вихревые пучки, вложенные в супергауссов пучок 4-го порядка. На рисунке 3,а и 3,б показаны профили интенсивностей для  $\tanh$  vortex и  $r$  vortex соответственно, построенные, используя одинаковый фоновый супергауссов пучок.



1 –  $\tanh$  vortex; 2 –  $r$  vortex

Рисунок 2 – Распределение относительной интенсивности вихревого светового пучка



а –  $\tanh$  vortex; б –  $r$  vortex

**Рисунок 3 – Профили интенсивностей вихревого пучка, наложенного на супергауссовый фоновый пучок**

Таким образом, возросший интерес к оптическим вихрям связан с их необычными особенностями и потенциальным применением в оптических приборах. В настоящее время накопился большой объём теоретического и экспериментального материала в ходе исследований оптических вихрей, что даёт возможность их практического использования и дальнейшего изучения.

#### Литература

1. Nye, J.F. Dislocations in wave trains / J.F. Nye, M.V. Berry // Proc. R. Soc. London Ser. – 1974. – A 336. – P. 165–190.
2. Короленко, П.В. Оптические вихри / П.В. Короленко // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 94–99.
3. Trillo, S. Spatial solitons / S. Trillo, W. Torruellas. – Berlin : Springer Series in Optical Sciences Vol. 82, 2001. – 454 p.
4. Dezyatnikov, A.S. Optical vortices and Vortex Solitons / A.S. Dezyatnikov, L. Torner, Y.S. Kivshar // Progres in Optics. – 2005. – Vol. 47. – P. 291–391.
5. Multiple-charged optical vortex solitons in bulk Kerr media / I. Velchev [atc.] // Optics Communications. – 1997. – № 140. – P. 77–82.
6. Mamaev, A.V. Decay of high order optical vortices in anisotropic nonlinear optical media / A.V. Mamaev, M. Saffman, A.A. Zozulya // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78, № 11. – P. 2108–2111.
7. Ковалёв, А.А. Непараксиальная векторная дифракция Гауссового пучка на спиральной фазовой пластинке / А.А. Ковалёв, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 37, № 4. – С. 19–22.
8. Foo, G. Optical vortex coronagraph / G. Foo, D.M. Palacios, A. Swartzlander, Jr. // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30, № 24. – P. 3308–3310.
9. Gahagan, K.T. Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander, Jr. // Opt. Lett. – 1996. – Vol. 21, № 11. – P. 827–829.
10. Rozas, D. Propagation dynamics of optical vortices / D. Rozas, C.T. Law, G.A. Swartzlander, Jr. // J. Opt. Soc. Am. B. – 1997. – Vol. 14, № 11. – P. 3054–3065.

11. Kim, G. Propagation dynamics of optical vortices with anisotropic phase profiles / G. Kim, H.J. Lee, J. Kim, H. Suk // J. Opt. Soc. Am. B – 2003. – Vol. 20, № 2. – P. 351–359.

МГТУ им. И.П.Шамшуркина