

САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ**М.В.Васнецов¹⁾, И.Г.Мариенко, М.С.Соскин***Институт физики НАН Украины
252650 Киев, Украина*Поступила в редакцию 30 декабря 1999 г.
После переработки 20 января 2000 г.

Сообщаются результаты эксперимента по дифракции светового пучка с осевым оптическим вихрем на краю непрозрачного экрана. Обнаружен эффект восстановления оптического вихря в прошедшем пучке при отсечении экраном центральной части падающего пучка.

PACS: 42.60.-v

В настоящее время в оптике активно исследуются “оптические вихри” (ОВ), представляющие собой области циркулярного движения потока энергии в электромагнитной волне. Условно ОВ можно разделить на продольные, у которых ось циркулярного движения совпадает (или слегка наклонена) с направлением распространения волны, и поперечные, у которых ось перпендикулярна направлению волны. Типичным примером продольного ОВ является “бубликовая” мода Лагерра – Гаусса LG_0^{-1} -лазерного резонатора [1]. Примером поперечного ОВ могут служить кольца Эйри в фокальной плоскости линзы [2]. В обоих случаях осью ОВ является линия нулевого значения амплитуды поля. Обход вокруг оси ОВ по любому замкнутому контуру, не охватывающему другой ОВ, приводит к изменению фазы на 2π , или $2m\pi$ в случае m -кратного вихря. Для продольного ОВ целочисленная величина m называется топологическим зарядом вихря. На оси ОВ фаза считается неопределенной, или сингулярной, вследствие скачка на $m\pi$.

Для продольного ОВ сочетание циркулярного и поступательного движения энергии электромагнитной волны приводит к образованию геликоидальной поверхности равной фазы (винтовая дислокация волнового фронта) [3, 4]. При этом волновой фронт имеет везде гладкую поверхность, за исключением оси геликоида. Такая форма волновой поверхности обуславливает при соосной интерференции с плоской волной интерференционные полосы в виде спирали и “вилку” интерференционных полос для наклонного падения волн, что однозначно определяет наличие ОВ [4]. Важной особенностью продольного ОВ является наличие орбитального углового момента у пучка, который может передаваться захваченным внутри пучка частицам, вызывая их вращение [5, 6].

Как было установлено ранее [7], экранирование периферийной части пучка не уничтожает ОВ в прошедшем пучке, а лишь сдвигает его положение относительно центра пучка, благодаря наличию парциальных источников со сдвигом фазы на π . Однако в случае отрезания центральной части пучка сохранение ОВ не является очевидным, поскольку нет причин для деструктивной интерференции парциальных источников на волновом фронте, необходимой для образования нуля амплитуды поля.

¹⁾ e-mail: mvas@marion.iop.kiev.ua

Целью данного сообщения является описание эффекта “регенерации” продольного ОВ, то есть восстановление ОВ с точкой сингулярности фазы из его “гладкой” части. Идея эксперимента и численного расчета заключалась в экранировании части пучка с осевым ОВ непрозрачным экраном, отрезающим центральную часть пучка и, следовательно, ось вихря.

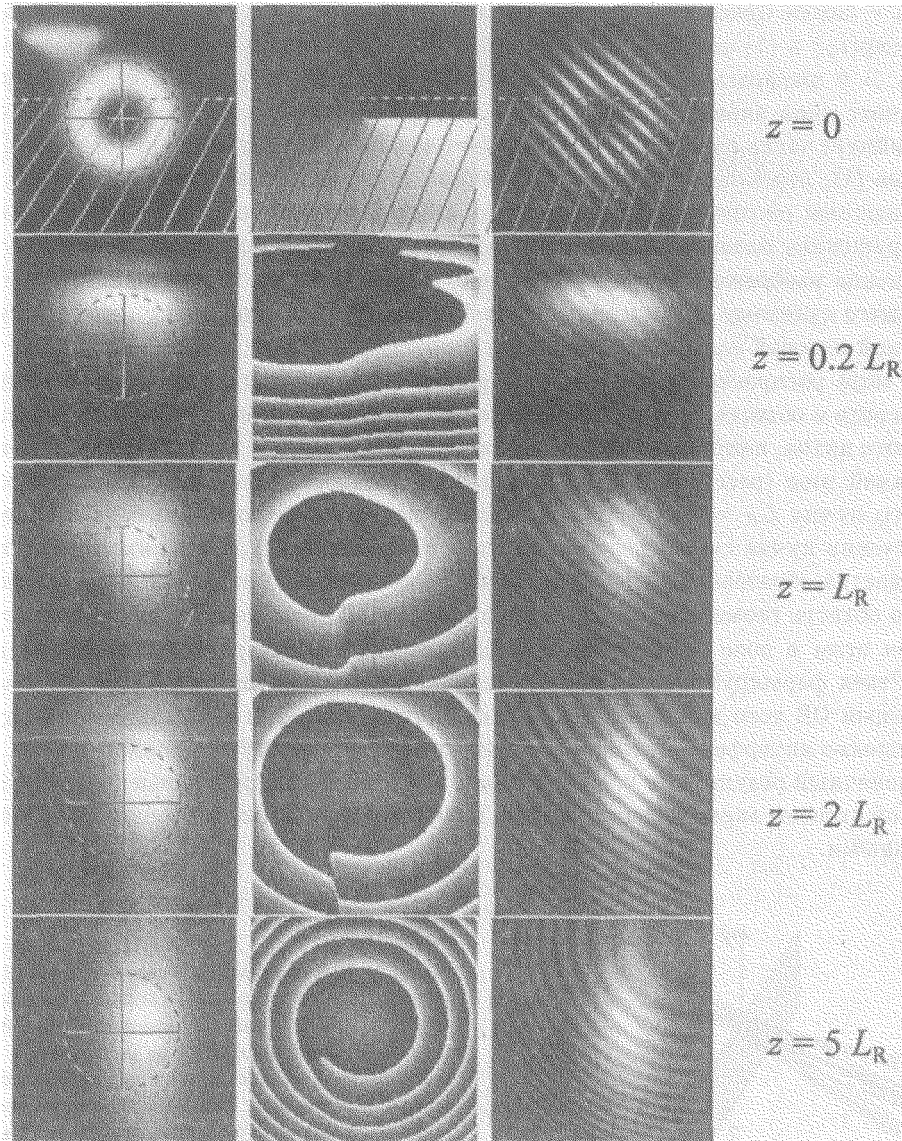


Рис.1. Расчет распределения интенсивности в поперечном сечении пучка с осевым ОВ, $m = -1$ (первая колонка), на различных расстояниях после экрана, отрезающего заштрихованную часть пучка при $z = 0$ (верхний ряд), соответствующие распределения фазы (вторая колонка) и картина интерференции с плоской волной (третья колонка). Поперечный размер невозмущенного пучка на том же расстоянии показан штриховой окружностью

На рис.1 даны результаты численного эксперимента по моделированию регенерации ОВ в пучке, представляемого в плоскости $z = 0$ в виде перетяжки моды LG_0^1 с отрезанием части пучка экраном:

$$E(x, y) = \begin{cases} 0, & y \leq y_0 \\ \sqrt{(x^2 + y^2)} \exp[-(x^2 + y^2)/r_0^2 + i\varphi], & y > y_0 \end{cases} \quad (1)$$

где r_0 – параметр поперечного размера, φ – азимутальный угол, равный $\text{arctg}(x/y)$, $y = y_0$ – линия среза пучка непрозрачным экраном, $y_0 = \frac{1}{3}r_0$. Наличие фазового члена $\exp(i\varphi)$ в (1) соответствует осевому ОВ с зарядом $m = 1$. Как видно из (1), при $y_0 > 0$ диафрагмирование пучка полуплоскостью (штриховая линия на рис.1 обозначает край экрана, закрывающего нижнюю часть пучка) оставляет лишь периферийную часть пучка, не содержащую фазовой сингулярности, но обладающую, согласно (1), переменной фазой в поперечном сечении. В первой колонке представлены картины распределения интенсивности пучка в поперечном сечении; штриховая окружность показывает текущий размер свободно распространяющегося пучка. Фаза волны изображена в средней колонке в градациях от черного цвета, соответствующего нулевому значению фазы, до белого, фаза 2π . Картины интерференции с несоосной плоской волной представлены в третьей колонке.

По мере распространения пучка за экраном происходит дифракционное заплывание света в область геометрической тени, сопровождающееся общим “поворотом” светового пятна, направление которого определяется знаком заряда ОВ [4]. При этом в ближней зоне (расстояние вдоль оси z пронормировано на длину Рэлея невозмущенного пучка $L_R = \pi r_0^2/\lambda$, где λ – длина волны) фазовая структура в поперечном сечении пучка существенно меняется. На расстояниях, меньших длины Рэлея, наблюдается образование дифракционных полос и несимметричное проникновение света в область геометрической тени, описанное в [7] как поворот пучка вокруг оси z . При этом в поле зрения ОВ не наблюдаются. В интервале от одной до двух длин Рэлея формируется фазовая ступенька, из которой впоследствии выделяется единичный ОВ того же знака, как у исходного пучка. При $z = 5L_R$ можно видеть расщепление интерференционной полосы, что свидетельствует о появлении ОВ. При этом конечный результат – восстановление единичного вихря в дальней зоне – не зависит от степени экранирования пучка, хотя промежуточные состояния могут быть различными.

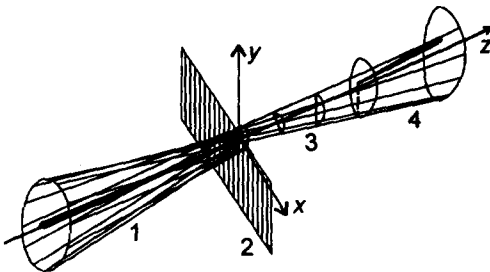


Рис.2. 1 – оптический осевой вихрь (LG_0^1 - мода), 2 – непрозрачный экран, отсекающий центр вихря, 3 – дифрагированное поле в ближней зоне, сингулярностей не содержит, 4 – поле в дальней зоне содержит восстановившийся вихрь. Штриховой линией обозначена фазовая ступенька волнового фронта, предшествовавшая формированию вихря

Экспериментально регенерация оптического вихря из части исходного пучка была реализована в оптической схеме, показанной на рис.2. Пучок He-Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм) первоначально направлялся на синтезированную дифракционную решетку, и в первом порядке дифракции воспроизводился пучок с осевым ОВ [8].

Полученный таким способом пучок фокусировался линзой с фокусным расстоянием 50 см, при этом размер сечения пучка в перетяжке составлял $r_0 \approx 0.25$ мм. В плоскости перетяжки размещался непрозрачный экран, отрезающий часть пучка по уровню $y_0 \approx \frac{1}{4}r_0$. Степень экранирования пучка контролировалась с помощью вспомогательной линзы, переносящей изображение края экрана.

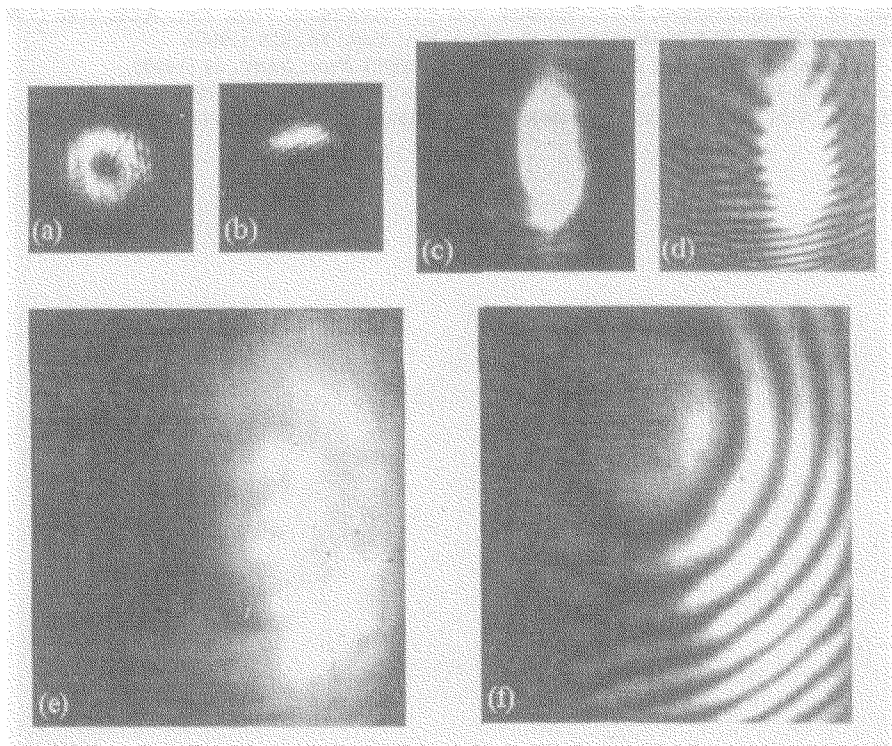


Рис.3. Распределение интенсивности осевого единичного ОВ на различных расстояниях после дифрагирующего экрана, отрезающего заштрихованную часть пучка: а) в месте установки непрозрачного экрана, б) часть ОВ, пропущенная экраном, не содержит нуля амплитуды, с) картина интенсивности на расстоянии $z = L_R$, d) соответствующая картина интерференции с плоской волной, (е, f) картины интенсивности и интерференции в дальней зоне

Наблюдаемые картины распределения интенсивности пучка и его интерференции с референтной плоской волной в точности совпали с расчетными. На рис.3 показаны экспериментальные результаты, полученные в ближней и дальней зонах. Интерференционный анализ обнаруживает “вилку” слева от яркого пятна, что указывает на появление ОВ.

Таким образом, в работе показан способ восстановления оптического вихря, то есть оптического пучка с геликоидальным волновым фронтом, из его части, не содержащей оси вихря. Объяснение обнаруженного эффекта, по нашему мнению, заключается в перераспределении орбитального углового момента в поперечном сечении пучка в процессе распространения после экрана. Наличие остаточного орбитального углового момента приводит к формированию ОВ, несущего эту величину. Сдвиг центра ОВ по отношению к оси пучка обусловлен присутствием “бездислокационной” компоненты [9].

-
1. Ю.А.Ананьев, *Оптические резонаторы и проблема расходности лазерного излучения*, М.: Наука, 1979.
 2. A.Boivin, J.Dow, and E.Wolf, *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 1171 (1967).
 3. J.F.Nye and M.V.Berry, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A336**, 165 (1974).
 4. M.Vasnetsov and K.Staliunas (eds.), *Optical Vortices*, Nova Science, NY, 1999.
 5. L.Allen, M.W.Beijersbergen, R.J.C.Spreeuw, and J.P.Woerdmam, *Phys. Rev.* **A45**, 8185 (1992).
 6. H.He, M.E.J.Friese, N.R.Heckenberg et al., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 826 (1995).
 7. M.V.Vasnetsov, I.V.Basistiy, L.V.Kreminskya et al., *SPIE Proc.* **3487**, 34 (1998).
 8. В.Ю.Баженов, М.В.Васнецов, М.С.Соскин, *Письма в ЖЭТФ* **52**, 1037 (1990).
 9. M.S.Soskin, V.N.Gorshkov, M.V.Vasnetsov et al., *Phys. Rev.* **A56**, 4064 (1997).