

Секторное возмущение спиральных вихревых пучков

Я.Е. Акимова
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
Ak1mova.yana@yandex.ru

М.В. Брецько
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
mihailbretcko4@gmail.com

А.В. Воляр
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
volyar@cfuv.ru

Ю.А. Егоров
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
yuriyegorov@cfuv.ru

С.И. Халилов
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
server.khalilov.94@mail.ru

С.И. Якубов
Крымский Федеральный
университет им. В. И. Вернадского
Крым, Россия
yakubov-selim@mail.ru

Аннотация—В данной работе представлены исследования структурной устойчивости спирального пучка, подверженного секторному возмущению. Секторное возмущение вызывает изменение направления циркуляции линий тока вектора Пойнтинга в области возмущения, которые вызваны появлением вихрей с отрицательными топологическими зарядами. Однако изменение орбитального углового момента пучка такие возмущения не вызывают, несмотря на рост числа вихревых мод, и возмущенный пучок остается структурно устойчивым.

Ключевые слова— оптические вихри, спиральный пучок, орбитальный угловой момент.

1. ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес к структурно устойчивым вихревым пучкам сильно возрос за последние несколько лет и занимает ключевые места в списках всемирно признанных научных журналов [1–4]. С одной стороны возросший интерес связан с необыкновенным свойством таких пучков сохранять свою структуру после прохождения через препятствия [5], с другой стороны, с возможностью использования скрытой симметрии пучка в самых разнообразных областях науки и техники от квантовой механики [6] до компьютерных технологий [7], от систем захвата и транспортировки микрочастиц до генетики и молекулярной биологии [8]. К структурно устойчивому классу относятся спиральные вихревые (СВ) пучки, открытые более чем 20 лет назад профессором Абрамочкиным и профессором Волостниковым [9], которые представляют собой особый класс устойчивых сингулярных пучков, сохраняющих свою форму при распространении с точностью до масштаба и поворота. Целью данной работы является исследование структурной устойчивости СВ пучков, подверженных секторному возмущению. В качестве СВ пучка использовался семи квантованный треугольный пучок с углом поворота $\theta = -1$ [10].

2. МОДЕЛЬ СЕКТОРНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ПУЧКА

В качестве СВ пучка рассматривался треугольный спиральный пучок света [10]. Схематически, геометрия секторного возмущения приведена на рис.1б. Поскольку невозмущенный спиральный пучок можно представить в виде бесконечной суперпозиции Лагерр-Гауссовых (ЛГ) мод [10], то имеет смысл исследовать секторное

возмущение единичного ЛГ пучка, а затем рассмотреть их суперпозицию в СВ пучке.

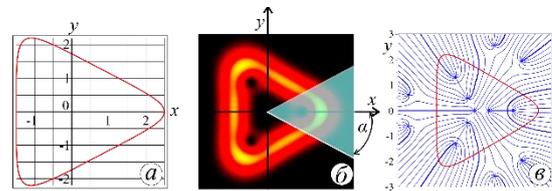


Рис. 1. Треугольный спиральный пучок: (а) треугольная образующая $\zeta(t) = 2e^{it} + (1/2)e^{-it}$ [10]; (б) распределение интенсивности; (в) распределение фазы на фоне треугольной образующей. Клинь на рис.1(б) характеризует секторное возмущение

Комплексную амплитуду возмущенного СВ пучка треугольной формы запишем в виде:

$$\Psi_{\Delta}(X, Y, Z|\alpha) = \sum_{m=0}^{\infty} C_{3m+1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{3m+1, n}(\alpha) LG_{0, n}(X, Y, Z), \quad (1)$$

где C_{3m+1} - амплитудные коэффициенты ЛГ мод, входящих в состав СВ пучка, $C_{m, n}(\alpha)$ - амплитудные коэффициенты каждой возмущенной ЛГ моды сектором, которые определяются как

$$C_{m, n}(\alpha) = (-1)^{m-n} \Gamma\left(\frac{|m|+|n|}{2} + 1\right) \times \frac{\sin\left[(m-n)(\pi-\alpha)\right]}{m-n} / \left(\pi 2^{\frac{|m|-|n|}{2}} |n|!\right). \quad (2)$$

Построение линий тока вектора Пойнтинга содержит тонкие детали процесса разрушения сингулярной структуры пучка и проявляются в виде узора критических точек потока энергии. В отличие от фазового распределения, линии тока очерчивают сложные траектории в окрестности особых точек. Форма линий тока определяется градиентом фазы СВ пучка

$$\nabla(\Phi_{\Delta}), \quad \nabla = \mathbf{i}\partial_x + \mathbf{j}\partial_y + \mathbf{k}\partial_z,$$

и записывается как [11,12]:

$$\mathbf{J}_{\Delta}(\mathbf{r}) = \text{Im}(\Psi_{\Delta}^* \nabla \Psi_{\Delta}). \quad (3)$$

Картина линий тока СВ пучка на рис.2получена после секторного возмущения. Линии оптического тока в невозмущенном СВ пучке рассматривались в работе [13] и характеризуются двумя сепаратрисами внутри каустики, которые охватывают по три центра, расположенные в центре и в углах треугольного СВ

пучка. Слабое возмущение на рис. 2, хотя и частично разрушает пучок, вырезает два вихря в вершинах двух треугольников внутри пучка и затрагивает вихрь на оси пучка, но не изменяет существенно внутреннюю структуру линий тока.

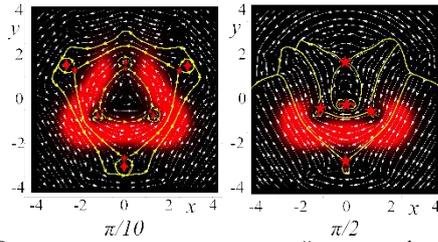


Рис. 2. Распределение оптических линий тока на фоне плотности тока $\rho(x, y)$ для различных углов возмущения сектором в $z = 0$ плоскости. Критические точки двух типов – \blacklozenge центр и \blackstar седло; среди других линий сепаратриса выделяется толщиной

Орбитальный угловой момент (ОУМ) пучка определялся по формуле:

$$\ell_z = \sum_{m=0}^N \sum_{n=-M}^M n \bar{C}_{m,n}^2, \quad (4)$$

где $\bar{C}_{m,n} \rightarrow C_{m,n} \sqrt{\pi 2^{-2-m} m!}$. ОУМ на участке $\alpha \in (0, \pi/2)$ практически не изменяется, и только вблизи углов $\alpha \sim 170^\circ$ возникает резкое падение ОУМ. Полученные результаты объясняют наблюдаемое сохранение структурной устойчивости СВ пучка (см. рис. 3) даже при больших углах секторного возмущения $\alpha \rightarrow \pi/2$, поскольку в этой области углов возмущения, вихри с отрицательными ТЗ в основном участвуют в увеличении формировании линий тока с противоположным направлением циркуляции на рис. 2 (для $\pi/2$) в области тени в картине интенсивности.

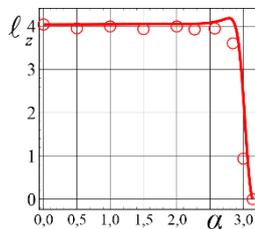


Рис. 3. ОУМ $\ell_z(\alpha)$ возмущенного СВ пучка для угла α в области $\alpha \in (0, \pi)$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя методы компьютерного моделирования и измерение 3D спектров мод (амплитуд и фаз) мы исследовали свойство спиральных пучков треугольной формы сохранять структурную устойчивость, несмотря на значительные секторные возмущения. Было обнаружено, что секторное возмущение вызывает существенные искажения картины линий тока в области тени секторной диафрагмы. Тем не менее, они имеют одинаковое направление циркуляции на всей площади поперечного сечения пучка при небольших углах возмущения. При больших углах секторной диафрагмы появляются широкие участки сечения пучка с

противоположной циркуляцией линий тока. Оказалось, что ОУМ остается неизменным в широкой области углов возмущения, несмотря на быстрый рост числа состояний, и только при углах сектора около 170° возникает резкое падение ОУМ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 20-37-90066 в части «методы измерения спектра оптических вихрей», № 20-37-90068 в части «экспериментальные результаты») и гранта Государственного Совета Республики Крым в части «Спиральные вихревые пучки».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forbes, A. Structured light tailored for purpose / A. Forbes // Optics and Photonics News. – 2020. – Vol. 31(6). – P. 24-31. DOI: 10.1364/OPN.31.6.000024.
- [2] 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, M. Gong, X. Yuan // Light: Science & Applications. – 2019. – Vol. 8. – P. 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [3] Forbes, A. Structured light / A. Forbes, M. de Oliveira, M.R. Dennis // Nature Photonics. – 2021. – Vol. 15. – P. 253-262. DOI: 10.1038/s41566-021-00780-4.
- [4] Willner, A.E. OAM light for communications / A.E. Willner // Optics and Photonics News. – 2021. – Vol. 32(6). – P. 34-41. DOI: 10.1364/OPN.32.6.000034.
- [5] Aiello, A. Wave-optics description of self-healing mechanism in Bessel beams / A. Aiello, G.S. Agarwal // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(24). – P. 6819-6822. DOI: 10.1364/OL.39.006819.
- [6] Erhard, M. Twisted photons: New quantum perspectives in high dimensions / M. Erhard, R. Fickler, M. Krenn, A. Zeilinger // Light: Science & Applications. – 2018. – Vol. 7. – P. 17146. DOI: 10.1038/lsa.2017.146.
- [7] Marrucci, L. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications / L. Marrucci, E. Karimi, S. Slussarenko, B. Piccirillo, E. Santamato, E. Nagali, F. Sciarrino // Journal of Optics. – 2011. – Vol. 13(1). – P. 064001. DOI: 10.1088/2040-8978/13/6/064001.
- [8] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry, M.R. Dennis, D.L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N.M. Litchinitser, N.P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J.P. Torres, T.W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A.B. Stilgoe, J. Romero, A.G. White, R. Fickler, A.E. Willner, G. Xie, B. McMorrán, A.M. Weiner // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19(1). – P. 013001. DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [9] Abramochkin, E. Spiral-type beams: optical and quantum aspects / E. Abramochkin, V. Volostnikov // Optical Communications. – 1996. – Vol. 125. – P. 302-323. DOI:10.1016/0030-4018(95)00640-0.
- [10] Абрамочкин, Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников. – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
- [11] Berry, M.V. Optical currents / M.V. Berry // Journal of Optics A Pure and Applied Optics. – 2009. – Vol. 11. – P. 004001. DOI: 10.1088/1464-4258/11/9/094001.
- [12] Berry, M.V. Stream function for optical energy flow / M.V. Berry, M.R. Dennis // Journal of Optics. – 2011. – Vol. 13. – P. 064004. DOI:10.1088/2040-8978/13/6/064004.
- [13] Volyar, A. Geometry of spiral beams: 3D curved structured vortex beams and optical currents / A. Volyar, E. Abramochkin, E. Razuvaeva, M. Bretsko, Ya. Akimova // Journal of Optics. – 2021. – Vol. 23. – P. 044003. DOI:10.1088/2040-8986/abcd5c.