

Внутренние и внешние возмущения структурированных вихревых пучков

А. Воляр

Физико-технический институт
Крымского федерального
университета им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
volyar@singular-optics.org

Е. Абрамочкин

Лаборатория когерентной оптики
Физического института им. П.Н.
Лебедева РАН
Самара, Россия
ega@fian.smr.ru

Ю. Акимова

Физико-технический институт
Крымского федерального
университета им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
yana_akimova_1994@mail.ru

М. Брецко

Физико-технический институт
Крымского федерального
университета им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
mihailbretcko4@gmail.com

Ю. Егоров

Физико-технический институт
Крымского федерального
университета им. В.И. Вернадского
Симферополь, Россия
yuriy.crimea@gmail.com

Аннотация—В данной работе мы коснемся вопроса внутренних возмущений структурированных ЛГ пучков, вызванных гармонической модуляцией каждой ЭГ моды. Мы покажем, что, хотя возмущение вносится в каждую ЭГ моду, не вызывая связи между ними, в структурированном ЛГ пучке возникает перекрестная связь между модами в ЛГ базисе. При этом, несмотря на возрастание информационной энтропии Шеннона и ОУМ, полный топологический заряд (ТЗ) пучка остается неизменным

Ключевые слова— топологический заряд, структурированные пучки Лагерра-Гаусса, орбитальный и спиновый угловой момент.

1. ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью структурированных вихревых пучков является их способность переносить большие массивы данных за счет присущих им множества степеней свободы [1]: орбитальный (ОУМ) и спиновый угловой момент, а также радиальные квантовые числа вихревых мод [2]. Однако широкое применение структурированных пучков в различных областях нашей жизни [2] обеспечивается специальными устройствами, получивших название пространственные модуляторы света, что позволяет быстро обрабатывать огромные массивы данных [3]. Важнейшим свойством структурированных пучков является их структурная устойчивость к внешним возмущениям [4]. В частности были исследованы частные случаи разрушения и/или самовосстановления структурированных пучков при действии на них возмущений посредством фигурных диафрагм [5-7], а также случайных фазовых возмущений в многомодовых оптических волокнах [8]. В работе [9] мы рассмотрели преобразования тонкой структуры потоков энергии в структурированных пучках Лагерра-Гаусса (ЛГ), связанной с модуляцией мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) в их составе. Знакопеременное возмущение ЭГ мод приводит к структурной перестройке критических точек пучка и изменению картины интенсивности, которая

сопровождается переходом между устойчивыми состояниями.

2. ВОЗМУЩЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Вихревой ЛГ пучок с комплексной амплитудой $LG_{n,\ell}$ записывается в базисе ЭГ мод в виде [9]

$$LG_{n,\ell}(\mathbf{r} | \varepsilon, \theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \times \sum_{k=0}^{2n+\ell} (-2i)^k P_k^{(n+\ell-k, n-k)}(0) \varepsilon_k(\theta) HG_{2n+\ell-k,k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $P_k^{(n,\ell)}$ - многочлен Якоби, а $HG_{2n+\ell-k,k}$ - комплексная амплитуда ЭГ моды. В стандартной форме параметр возмущения ε_k равен единице $\varepsilon_k = 1$. Внесем в каждую моду гармоническое возмущение

$$\varepsilon_k = 1 + \varepsilon e^{ik\theta}, \quad (2)$$

где ε и θ - амплитудный и фазовый управляющие параметры, соответственно, которые превращают стандартную ЛГ моду в структурированный ЛГ пучок, подверженный гармоническому возмущению каждой ЭГ моды.

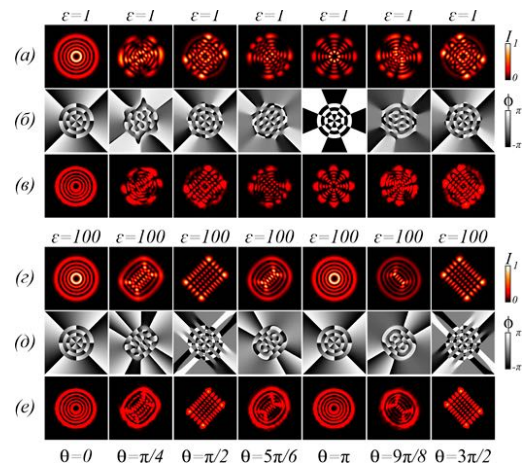


Рис. 1. Теоретическое (а,г) и экспериментальное (в,е) распределение интенсивности, фазы (б,д) для различных значений ε . (а-в) $\varepsilon = 1$, (г-е) $\varepsilon = 100$ при $\theta \in (0, 3\pi/2)$ для возмущенной $LG_{n=4}^{\ell=4}$ моды

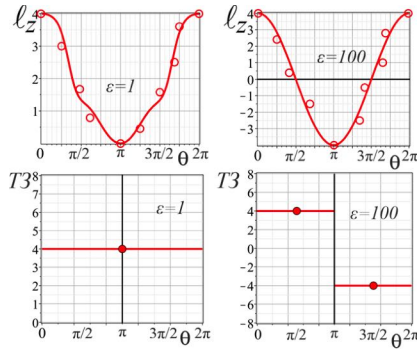


Рис. 2. ОУМ и полный топологический заряд структурированного пучка ЛГ с $\ell=4; n=4$ и масштабными параметрами $\varepsilon=1, \varepsilon=100$, зависящими от параметра θ . Сплошные кружки указывают на разрывы функции ТЗ

Характерное распределение интенсивности и фазы для структурированных ЛГ пучков при двух значениях амплитудного параметра $\varepsilon=1$ и $\varepsilon=100$ и различных фазовых параметрах θ представлено на рис. 1. Две группы рис. (а)-(в) и (г)-(е) представляют собой два различных типа структурированных пучков для амплитудных параметров $\varepsilon \leq 1$ и $\varepsilon \gg 1$. Действительно, оба типа пучка имеют исходное состояние с $\theta=0$ в форме LG моды с ТЗ, равным $\ell=4$, и радиальным числом $n=4$. Например, при $\theta=\pi/2$ первый тип пучка ($\varepsilon=1$, рис. 1а-в) переходит в устойчивое смешанное состояние с регулярной сеткой оптических вихрей в поперечном сечении, в то время как второй тип пучков пучка ($\varepsilon=100$, рис. 1г-е) превращается в стандартную ЭГ моду, повернутую на угол $\varphi=\pi/4$. При $\theta=\pi$ первый тип пучка образует вырожденное состояние с лучами краевых радиальных дислокаций, а второй тип пучка превращается в стандартную ЛГ моду, но с противоположным знаком $T3=-4$. Было получено выражение (1) в базисе ЛГ мод

$$LG_{n,\pm\ell}^{(pert)}(\mathbf{r}|\varepsilon,\theta) - LG_{n,\ell}(\mathbf{r}) = \varepsilon \frac{\pm i^{2\ell-n} e^{\pm i(2n+\ell)\theta/2}}{2^{n+\ell} n!} \times \sum_{k=0}^{2n+\ell} (\mp i)^k c_k^{(n,n+\ell)} \cdot (-1)^{\min} 2^{\max} \min! LG_{\min, 2n+\ell-2k}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где $\min = \min(2n+\ell-k, k)$, $\max = \max(2n+\ell-k, k)$ и

$$c_k^{(n,n+\ell)} = 2^{\max} \min! \sum_{j=\max(0, k-n+\ell)}^{\min(k, n)} (-1)^{k-j} \binom{n}{j} \binom{n+\ell}{k-j} \times (\sin \theta/2)^{n+k-2j} (-\cos \theta/2) \quad (4)$$

Зная амплитуды $c_k^{(n,n+\ell)}$ ЛГ мод в (4) можно рассчитать ОУМ и информационную энтропию Шеннона [5], а, используя методы статьи [10] и выражение (3), можно найти ТЗ структурированного пучка при различных управляющих параметрах ε и θ .

Изменение управляющего параметра θ приводит к перекрестной связи между вторичными ЛГ модами таким образом, что энергия $|c_k^{(n,n+\ell)}|^2$ равным образом

перераспределяется между ЛГ модами с противоположными знаками ТЗ при $\varepsilon=1$ и $\theta=\pi$, в то время как при $\varepsilon \gg 1$ ЛГ мода с отрицательным ТЗ подавляет ЛГ моду с положительным ТЗ так, что происходит конверсия знака ТЗ (см. рис.1). На рис.2 приведена зависимость ОУМ $\ell_z(\theta)$ от управляющего параметра θ для $\varepsilon=1$ и $\varepsilon=100$. Мы видим, что ОУМ обращается в ноль $\ell_z(\theta=\pi, \varepsilon=1)=0$, но при $\varepsilon=100$ ОУМ меняет знак $\ell_z(\theta=\pi, \varepsilon=100)=-4$. При $\varepsilon \leq 1$, ТЗ не изменяется во всем интервале параметра $\theta \in (0, 2\pi)$, но при $\varepsilon=1$ возникает особая точка с $T3=0$, что соответствует вырожденному состоянию. В то же время, при $\varepsilon=100$ наблюдается резкое изменение знака ТЗ=-4 при $\theta=\pi$. Это означает, что при больших значениях амплитудного параметра $\varepsilon \gg 1$, сохраняется модуль ТЗ за исключением единственной $\theta=\pi$ точки с нулевым топологическим зарядом.

3. ВЫВОДЫ

В данной работе мы изучили вопрос внутренних возмущений структурированных ЛГ пучков, вызванных гармонической модуляцией каждой ЭГ моды. Мы показали, что, хотя возмущение вносится в каждую ЭГ моду, в структурированном ЛГ пучке возникает перекрестная связь между модами в ЛГ базисе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 20-37-90068, № 20-37-90066, № 19-29-01233).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shen, Yi. Structured ray-wave vector vortex beams in multiple degrees of freedom from a laser / Yi. Shen, Xi. Yang, D. Naidoo, X. Fu, A. Forbes // Optica. – 2020. – Vol. 7(7). – P. 820-831.
- [2] Volyar, A. Digital sorting perturbed Laguerre–Gaussian beams by radial numbers / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // J. Opt. Soc. Ammer. A. – 2020. – Vol. 37(2920). – P. 959-968.
- [3] Forbes, A. Structured light / A. Forbes, M. de Oliveira, M.R. Dennis // Nature Photonics. – 2021. – Vol. 15. – P. 253-262.
- [4] Абрамочкин, Е. Современная оптика гауссовых пучков / Е. Абрамочкин, В. Волостников. – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
- [5] Volyar, A. Orbital angular momentum and informational entropy in perturbed vortex beams / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // Opt. Lett. – 2019. – Vol. 44(29). – P. 5687-5680.
- [6] Воляр, А.В. Преобразование структурно устойчивых состояний спиральных пучков под действием секторных возмущений / А.В. Воляр, Я.Е. Акимова // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 789-799. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1009.
- [7] Volyar, A. Digital sorting perturbed Laguerre–Gaussian beams by radial numbers / A. Volyar, E. Abramochkin, M. Bretsko, Ya. Akimova // J. Opt. Soc. Ammer. A. – 2021. – Vol. 38(12). – P. 1793-1802.
- [8] Воляр, А.В. Цифровой анализ спекл картины хаотичной композиции мод и восстановление регулярного узора интенсивности после многомодового волокна / А.В. Воляр, М.В. Брещко, Я.Е. Акимова, Ю.А. Егоров // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 179-189. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-831.
- [9] Volyar, A. Fine structure of perturbed Laguerre–Gaussian beams: Hermite–Gaussian mode spectra and topological charge / A. Volyar, E. Abramochkin, Yu. Egorov, M. Bretsko, Ya. Akimova // Appl Opt. – 2021. – Vol. 59(25). – P. 7680-7687.
- [10] Kotlyar, V. Topological charge of a linear combination of optical vortices: topological competition / V. Kotlyar, A. Kovalev, A. Volyar // Opt Express. – 2020. – Vol. 28(6). – P. 8266-8281.