

Устойчивость структурированных пучков Лагерра-Гаусса к астигматическому преобразованию

М.В. Брецько
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
295007, Республика Крым, г.
Симферополь, Россия
mihailbretcko4@gmail.com

Я.Е. Акимова
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия
Ak1mova.yana@yandex.ru

А.В. Воляр
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия
volyar.singular.optics@gmail.com

С.И. Халилов
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия
server.khalilov.94@mail.ru

Ю.А. Егоров
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия
yuriyegorov@cfuv.ru

А.О. Ивахненко
Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского,
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия
ar1nalva@mail.ru

Аннотация — В работе исследуются структурированные пучки Лагерра-Гауссова с двумя управляющими параметрами при астигматическом преобразовании. Представленные пучки являются структурно устойчивой суперпозицией стандартной моды Лагерра-Гаусса и гибридной моды Эрмита-Лагерра-Гаусса. Изменяя фазовый параметр такого пучка, можно получить волновые решения, которые будут устойчивыми при простом астигматизме.

Ключевые слова — пучки Лагерра-Гаусса и Эрмита-Гаусса, орбитальный угловой момент, астигматическое преобразование

1. ВВЕДЕНИЕ

Последние 5 лет уделяется весьма большое внимание управлению массивами данных в структурированных пучках света за счет таких управляющих параметров как орбитальный, спиновый угловые моменты, а также топологический заряд (ТЗ) пучка [1]. Особое внимание в данной области уделяется работам таких ученых, как Э.Форбса [2], М. Паджета [3] и Ё. Чена [4], исследования которых направлены как на формирование, так и детектирование таких пучков. Также важным элементом таких исследований является отклик пучка к внешним возмущениям. Как показал ряд работ, структурированные пучки обладают весьма высокой сопротивляемостью к различного рода возмущениям и способны к самовосстановлению при распространении [5]. Именно проблему устойчивости таких пучков к внешним возмущениям мы и рассмотрим в данной работе, а именно устойчивость структурированных пучков Лагерра-Гаусса (ЛГ) к простому астигматизму при определенных значениях управляющих параметров.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЧКА

Представим стандартный пучок ЛГ в виде конечной суммы мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) [6]:

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

где $\mathbf{r} = (x, y)$, $P_k^{(n+\ell-k, n-k)}(\cdot)$ – многочлен Якоби, $HG_{2n+\ell-k, k}(\mathbf{r})$ – моды ЭГ. Для управления амплитудой и фазой пучка внесем под знак суммы (1) множитель:

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

Справедливо заметим, что в качестве (2) может быть выбрана любая функция. В нашем случае функция выбрана таким образом, чтобы мы могли плавно изменять коэффициенты мод ЭГ. Суперпозиция мод (1) с учетом возмущения (2) показывает, что возбужденное состояние структурированного ЛГ (сЛГ) пучка представляет собой сумму двух стандартных мод: ЛГ моды и гибридной Эрмит-Лагерр-Гауссовой (ЭЛГ) моды, структурой которой управляют амплитудный и фазовый параметры [7]. На рис. 1 представлены распределения интенсивности полученных пучков при различных параметрах ε и θ .

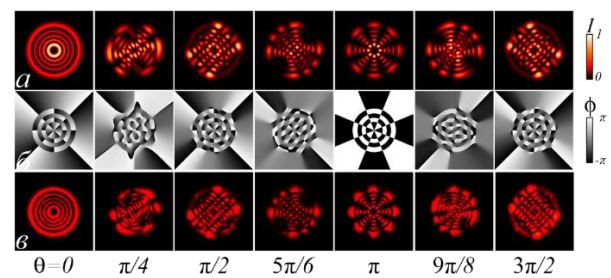


Рис. 1. Теоретические (а) и экспериментальные (б) картины интенсивности и фазы (б) сЛГ-пучка для амплитудного параметра $\varepsilon=1$ и некоторых значений фазового параметра θ

В многообразии структурных преобразований на рис. 1 привлекают внимание характерные картины для трех значений фазового параметра $\theta: \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Так, в случае $\theta = \pi/2$ и $3\pi/2$ возникает суперпозиция ЛГ и ЭГ мод с одинаковыми весовыми коэффициентами, а в случае $\theta = \pi$ образуются вырожденное состояние ЛГ пучка с противоположными знаками ТЗ. Важно отметить, что каждый сЛГ пучок остаётся структурно устойчивым при распространении при любых значениях параметров возмущения, поскольку каждая ЭГ мода в разложении (1) получает одно и то же значение фазы

Гуи. Общее выражение для орбитального углового момента (ОУМ) такого пучка можно представить в следующем виде:

$$\ell_z = \ell \cdot \frac{1 + 2\varepsilon \cos\left(\frac{1}{2}(2n + \ell)\theta\right) \cos^\ell\left(\frac{1}{2}\theta\right) P_n^{(0,\ell)}(\cos\theta) + \varepsilon^2 \cos\theta}{1 + 2\varepsilon \cos\left(\frac{1}{2}(2n + \ell)\theta\right) \cos^\ell\left(\frac{1}{2}\theta\right) P_n^{(0,\ell)}(\cos\theta) + \varepsilon^2}. \quad (3)$$

На рис. 2 показаны кривые $\ell_z(\theta)$, построенные по формуле (3), для случаев $\varepsilon = 1$ и $\varepsilon \ll 1$. При $\varepsilon = 1$ ОУМ обращается в ноль в одной точке $\theta = \pi$. Стоит только амплитудному параметру превысить единицу $\varepsilon > 1$, как особенность в нуле расщепляется на две точки, где ОУМ обращается в ноль в окрестности точки $\theta = \pi$. По мере увеличения амплитудного параметра точки нулей стремятся к $\theta = \pi/2$ и $\theta = 3\pi/2$, в то время как ОУМ стремится к максимальному ОУМ с противоположным знаком ТЗ.

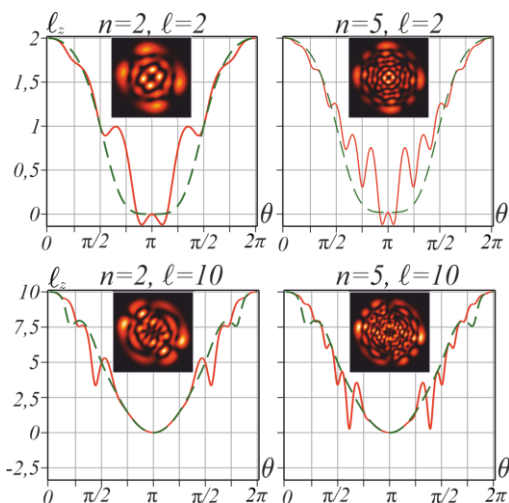


Рис. 2. Зависимость ОУМ ℓ_z от фазового параметра θ для различных (n, ℓ) для $\varepsilon = 1$. На выносках представлено распределение интенсивности сЛГ пучков для $\theta = \pi/2$

Когда радиальное число становится ненулевым $n \neq 0$, то на графиках ОУМ возникают осцилляции, характер которых показан на рис. 2. Чем больше разность между радиальным n и азимутальным ℓ числами, тем больше частота осцилляций.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ сЛГ ПУЧКОВ УСТОЙЧИВЫХ К ПРОСТОМУ АСТИГМАТИЗМУ

При распространении сЛГ пучка (1) с учетом (2) через цилиндрическую линзу происходит его астигматическое преобразование. Оказалось, что при определенных амплитудном ε и фазовых θ параметрах можно получить устойчивые к астигматизму сЛГ пучки. Сравнение типичных картин интенсивности сЛГ пучков (рис. 3а) без астигматизма и с астигматической инвариантностью (асЛГ) (рис. 3б) в разных состояниях (n, ℓ) показано на рис. 3. Из рис. 3 видно, что структура картин интенсивности в целом не изменилась, но наблюдается поворот особых точек на угол $\theta \rightarrow -\theta$. Также видно, что «вилки» интерференционной картины также не изменили направления ветвей, за исключением

небольших смещений их центров. Это означает, что ТЗ вихревых мод в асЛГ пучке не изменили свой знак.

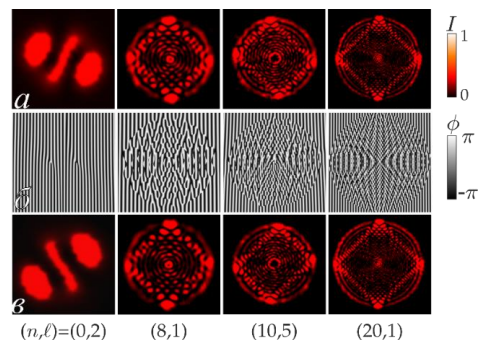


Рис. 3. Экспериментальные картины интенсивности сЛГ (а) и асЛГ (б) пучков для различных (n, ℓ) с амплитудным $\varepsilon = 1$, фазовым $\theta = \pi/2$, а также их интерференционные картины (б)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что сЛГ пучок, представленный через сумму мод ЭГ с управляющими параметрами (2) является суперпозицией мод ЛГ и гибридной моды ЭЛГ, обладающий структурной устойчивостью при распространении. Меняя амплитудный и фазовые параметры, можно получать различные распределения интенсивности. Интересным является случаи для фазового параметра $\theta = \pi/2$ и $3\pi/2$ при которых сЛГ пучок превращается в суперпозицию мод ЛГ и ЭГ с одинаковыми коэффициентами, а если фазовый параметр $\theta = \pi$, то в этом случае сЛГ пучок превращается в вырожденную моду ЛГ с противоположными ТЗ.

Пропуская такой пучок через цилиндрическую линзу, можно подобрать фазовый параметр таким образом, что пучок не изменит свое распределение интенсивности. Подобные свойства пучков могут быть полезны при создании уплотненных по орбитальному угловому моменту оптических линий связи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. Berry, M. Dennis et al // J. Opt. – 2017. – Vol. 19. – 013001.
- [2] Forbes, A. Structured light / A. Forbes, M. Oliveira, M. R. Dennis // Nat. Photon. – 2021. – Vol. 15. – P. 253-262.
- [3] Gibson, G. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Graham, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, S. Franke-Arnold // Opt. Express. – 2004. – Vol.12. – P. 5448-5456.
- [4] 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 Sci. Appl. – 2019. – Vol. 8. – P. 1-29.
- [5] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media: Review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624.
- [6] Абрамочкин, Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников. –М.: Физматлит, 2010. –184 с.
- [7] Воляр, А.В. Может ли радиальное число вихревых мод управлять орбитальным угловым моментом?. / А.В. Воляр, Е.Г. Абрамочкин, М.В. Брещко, Я.Е. Акимова, Ю.А. Егоров // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 6. – С. 853-863.