

Астигматические Лаггер-Гауссовые пучки света с быстрыми осцилляциями ОУМ

С.И. Халилов

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

server.khalilov.94@mail.ru

С.И. Якубов

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

yakubiv-selim@mail.ru

М.В. Брецько

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

mihailbretcko4@gmail.com

А.В. Воляр

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

volyar@cfuv.ru

С.Н. Лапаева

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

myhomm@gmail.com

Д.В. Максимов

*Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского
Республика Крым, г. Симферополь,
Россия*

northerncomfort@bk.ru

Аннотация — Разработан и экспериментально воплощен ABCD матричный формализм для описания структурированных преобразований и орбитального углового момента структурированных Лаггер-Гауссовых пучков в астигматической оптической системе, содержащей одну цилиндрическую линзу. Показано, что матричный формализм не только хорошо согласуется с методом интегральных астигматических преобразований, но и значительно расширяет область его применения.

Ключевые слова — структурированный свет, орбитальный угловой момент, пучки Эрмита-Гаусса

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы структурированные Лаггер-Гауссовые (ЛГ) пучки [1] света стали объектом исследования в научном сообществе, благодаря своим уникальным оптическим характеристикам и потенциалу для практического применения. Эти пучки, обладающие сложной фазовой структурой, предоставляют новые возможности для манипуляции микрочастицами, модуляции световых полей и создания эффективных оптических систем [2].

Как отмечено в нескольких исследованиях, структурированные пучки обладают высокой устойчивостью к различным воздействиям и обладают способностью к самовосстановлению при их распространении [3]. В данной работе мы фокусируемся на проблеме устойчивости таких пучков к внешним возмущениям, в частности, рассматривая устойчивость структурированных Лагера-Гаусса (сЛГ) пучков по отношению к простому астигматизму при распространении по свободному пространству.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЧКА

Представим стандартный пучок ЛГ в виде конечной суммы мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) [4]:

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

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

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

Отметим, что в роли (2) может выступать произвольная функция. В данном исследовании функция была выбрана таким образом, чтобы обеспечить плавное изменение коэффициентов ЭГ мод. С учетом воздействия возмущения (2) суперпозиция мод (1) демонстрирует, что возбужденное состояние структурированного пучка света, представляет собой комбинацию двух стандартных мод: ЛГ и гибридных Эрмит-Лаггер-Гауссовых (ЭЛГ) мод. Структура последних зависит от амплитудных и фазовых параметров, которые могут быть изменены. Распределения интенсивности полученных пучков при различных значениях параметров ε и θ представлены на рис. 1, при $Z = 0$.

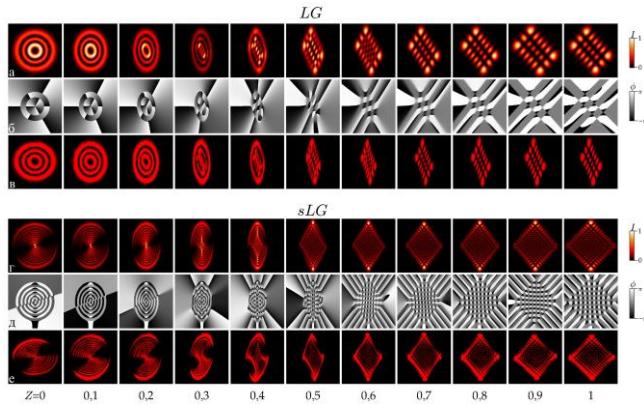
Используя правило ABCD, можно для астигматической среды типа цилиндрической линзы, которая не изменяет масштаб в направлении u записать комплексный параметр q следующим образом:

$$q_y(z_1) = z_1 - iz_0, \\ q_x(z) = z_0 \frac{[Z_1(\kappa_x^2 + 1) - \kappa_x] - i}{\kappa_x^2 + 1}, \quad (3)$$

$$\text{где } Z_1 = \frac{z_1}{z_0}, \quad \kappa_x = \frac{z_0}{f_x}.$$

И комплексную амплитуду астигматического сЛГ (асЛГ) пучка после прохождения через цилиндрическую линзу можно записать в виде, как показано в нашей работе [5] формуле (15). Компьютерное моделирование и экспериментальные результаты эволюции картин интенсивности (а-с) стандартной ЛГ моды и (д-ф) сЛГ пучка вдоль направления распространения Z_1 показаны на рис. 1. Как и ожидалось, ЛГ пучок преобразуется в ЭГ пучок на длине $z_1 = 2f_x(Z_1 = 1)$, а количество нулей

интенсивности вдоль осей x и y позволяет определить топологический заряд ЛГ пучка [6].



III. ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ

При распространении сЛГ пучка (1) с учетом (2) через цилиндрическую линзу CL происходит его астигматическое преобразование, как показано на рис. 2. В эксперименте камеру $CMOS2$ передвигали вдоль оси распространения Z и измеряли распределение интенсивности, показанной на рис. 1.

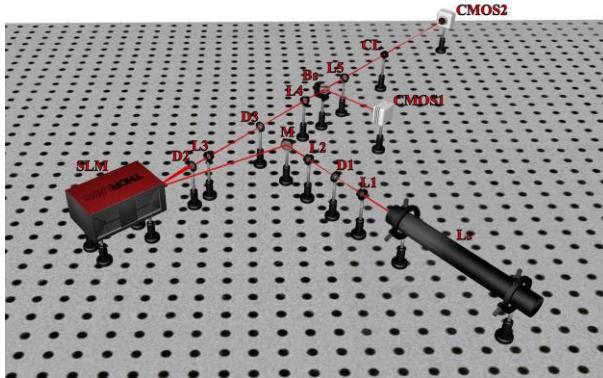


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: L_s – He-Ne лазер ($\lambda = 0,633$ мкм), L – сферическая линза, D – диафрагма, M – зеркало, SLM – пространственный модулятор света, Bs – делительная призма, CL – цилиндрическая линза ($f_x = 0,5$ м)

Мы обнаружили, что полученные результаты для орбитального-углового момента представленные на рис. 3 в виде быстрых осцилляций ОУМ при изменении управляющего параметра θ в различных поперечных сечениях Z_1 пучка. Мы видим возникновение и подавление быстрых осцилляций ОУМ по мере смещения Z_1 вдоль пучка, в то время как вблизи $\theta = 0,98\pi$ зарождается и растет всплеск ОУМ. Второй всплеск ОУМ с противоположным знаком возникает вблизи $\theta = 1,02\pi$. Важно, что ОУМ при $Z_1 = 1$, хорошо согласуется с результатами нашей работы [7], использующий метод интегральных преобразований, но ABCD матричный метод позволяет проследить

эволюцию быстрых осцилляций в всплесков по всей длине Z_1 пучка.

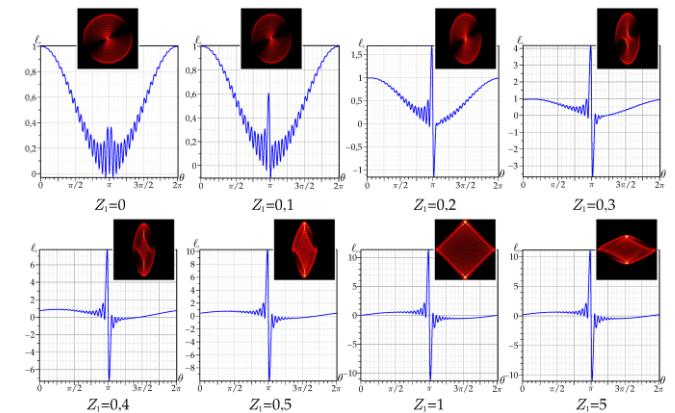


Рис. 3. Осцилляции ОУМ $\ell_z(\theta)$ при вариации θ -управляющего параметра асЛГ пучка с $n=20$, $\ell=1$, $\varepsilon=1$ на различных длинах пучка Z_1 . Выноски: картины интенсивности для первого всплеска ОУМ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы продемонстрировали эффективность ABCD матричного подхода, которое расширило математическое описание астигматических преобразований структурированных пучков. Было показано, что астигматическое преобразование приводит к возникновению всплесков ОУМ, амплитуда которых превышает половину радиального числа асЛГ пучка с минимальным азимутальным числом. Более того, в отличие от метода интегральных преобразований, мы продемонстрировали эволюцию тонкой структуры интенсивности и ОУМ по всей длине пучка. Было показано, что ОУМ незначительно изменяется в дальней области дифракции цилиндрической линзы, несмотря на то, что сЛГ-пучок теряет свою структурную устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forbes, A. Structured light / M. De Oliveira, M.R. Dennis // Nature Photonics. – 2021.– Vol. 15. – P. 253-262. DOI: 10.1038/s41566-021-00780-4.
- [2] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured ligh. Journal of Optics / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry and et. al. // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19(1). – 013001. DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [3] 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. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [4] Абрамочкин, Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников. –М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
- [5] Volyar, A. Structurally stable astigmatic vortex beams with super-high orbital angular momentum (ABCD matrix approach) / A. Volyar, M. Bretsko, S. Khalilov, Y. Akimova // Photonics. – 2023. – V. 10. – 1048. DOI: 10.3390/photonics10091048.
- [6] Victor, V. Orbital angular momentum of paraxial propagation-invariant laser beams / V. Victor, V. Kotlyar, A. Alexey, A. Kovalev // J. Opt. Soc. Am. A. – 2022. – Vol. 39. – P. 1061-1065. DOI: 10.1364/JOSAA.457660.
- [7] Volyar, A. Astigmatic-Invariant Structured Singular Beams / A. Volyar, E. Abramochkin, Y. Akimova, M. Bretsko // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – 842. DOI: 10.3390/photonics9110842.