

# Астигматические Лаггер-Гауссовы 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

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.И. Якубов

Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Республика Крым, г. Симферополь,  
Россия  
yakubiv-selim@mail.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-Гауссовы (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 Лаггер-Гаусса (сЛГ) пучков по отношению к простому астигматизму при распространения по свободному пространству.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЧКА

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

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

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

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

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-Гауссовских (ЭЛГ) мод. Структура последних зависит от амплитудных и фазовых параметров, которые могут быть изменены. Распределения интенсивности полученных пучков при различных значениях параметров  $\varepsilon$  и  $\theta$  представлены на рис. 1, при  $Z = 0$ .

Используя правило ABCD, можно для астигматической среды типа цилиндрической линзы, которая не изменяет масштаб в направлении  $y$  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 (a-c) стандартной ЛГ моды и (d-f) 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].

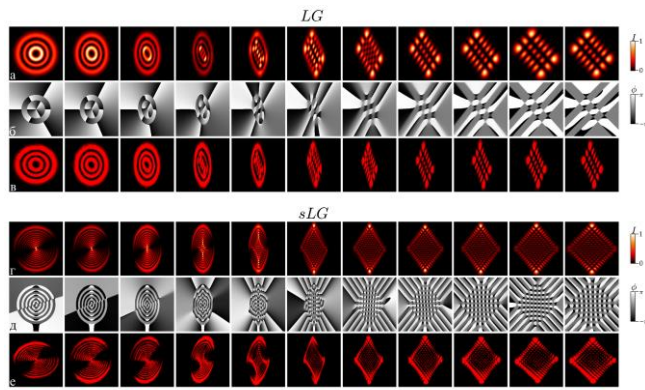


Рис. 1. Распределение интенсивности (а, г) теория и (в, е) эксперимент, (б, д) фазы, эволюции ЛГ (а-в)  $n=2$ ,  $\ell=3$  и астигматического сЛГ (г-е)  $n=10$ ,  $\ell=1$ ,  $\varepsilon=1$ ,  $\theta=0,99\pi$  пучка, с  $z_0=1$  м,  $f_x=0,5$  м

### 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.

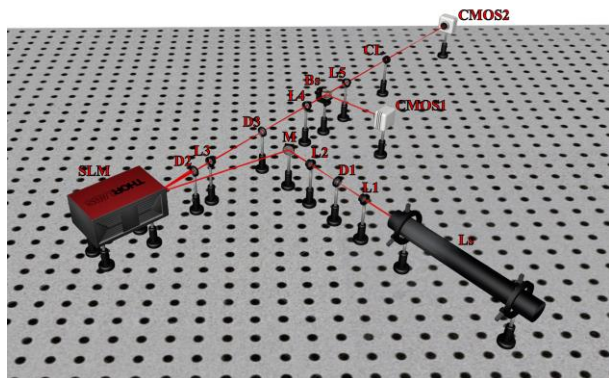


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:  $L_s$  –  $He-Ne$  лазер ( $\lambda=0,633$  мкм),  $L$  – сферическая линза,  $D$  – диафрагма,  $M$  – зеркало,  $SLM$  – пространственный модулятор света,  $B_s$  – делительная призма,  $CL$  – цилиндрическая линза ( $f_x=0,5$  м)

Мы обнаружили, что полученные результаты для орбитального-углового момента представленные на рис. 3 в виде быстрых осцилляций ОУМ при изменении управляющего параметра  $\theta$  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.

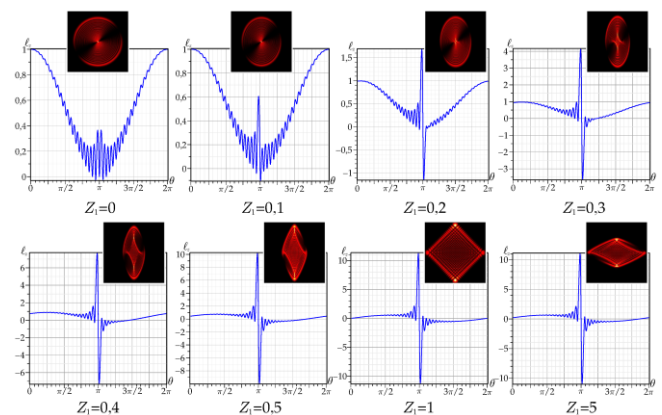


Рис. 3. Осцилляции ОУМ  $\ell_z(\theta)$  при вариации  $\theta$  –управляющего параметра аСЛГ пучка с  $n=20$ ,  $\ell=1$ ,  $\varepsilon=1$  на различных длинах пучка  $Z_1$ . Выноски: картины интенсивности для первого всплеска ОУМ

### 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 light. 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.