

ФОРМИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ КОМБИНАЦИИ СМЕЩЕННЫХ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ

В. К. Урюпина¹, К. А. Целогородцев¹, Н. Н. Лосевский², Е. В. Разуева³

В работе продемонстрирован метод расчета спиральных пучков заданной конфигурации на основе линейной комбинации смещенных гауссовых пучков. Реализован новый способ формирования спиральных пучков. Экспериментально исследовано влияние масштабирования фазового распределения на качество формируемых световых полей. Синтезированные поля апробированы в эксперименте по оптической манипуляции ансамблями одиночных микрочастиц.

Ключевые слова: спиральные пучки, вихревые световые поля, пространственный модулятор света, оптическая манипуляция.

Введение. В прикладных оптических задачах довольно часто возникает необходимость построения световых полей с заданным распределением интенсивности. В последнее время достаточно много работ посвящено изучению структурированного света – световых полей со сложным распределением интенсивности, фазы, углового момента либо поляризации [1–5]. Как правило, при распространении в свободном пространстве световые поля претерпевают количественные и качественные изменения, однако существуют классы пучков, сохраняющих свою структуру. К последним относятся спиральные пучки. Спиральные пучки – параксиальные пучки света, сохраняющие свою структуру при распространении с точностью до масштаба и поворота [6, 7]. Спиральные пучки представляют интерес для различных задач современной оптики, в том числе для кодирования информации за счет использования дополнительных степеней свободы, обу-

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086 Россия, Самара, Московское ш., 34; e-mail: lerauryupina07@gmail.com.

² Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221.

³ Лицей авиационного профиля № 135 (Базовая школа РАН), 443077 Россия, Самара, ул. Свободы, 129.

словленных наличием углового момента, для увеличения разрешающей способности микроскопа в продольном направлении [8], для контурного анализа [9, 10]. Благодаря наличию углового момента спиральные пучки применяются в задачах по перемещению частиц вдоль заданной траектории [11–16].

На сегодняшний день известны такие методы получения спиральных пучков, как метод линейной композиции пучков Лагерра–Гаусса и метод интегрального преобразования функции требуемого распределения интенсивности [7]. Для формирования вихревого светового поля в задачах по оптической манипуляции ансамблями одиночных микрочастиц удобно использовать линейную композицию спиральных пучков, обладающих свойством поворота при распространении. Такие вихревые поля могут быть получены на основе простейших спиральных пучков – смещенных гауссовых пучков [7, стр. 120]. Отметим, что фазовая часть спирального пучка позволяет создавать поля, в некоторой области обладающие свойствами спиральных пучков с формой распределения интенсивности, схожим с исходным [17].

Разрабатываемый нами метод формирования вихревых полей отличается от существующих возможностью их синтеза с использованием информации только о фазовом распределении спиральных пучков в виде упорядоченного набора гауссовых пучков.

Смещенный гауссов пучок. Распределение комплексной амплитуды в плоскости, находящейся на расстоянии z от исходной, можно найти в параксиальном приближении с помощью преобразования Френеля:

$$F(x, y, z) = FR_z[F(\xi, \eta, 0)](x, y, z) = \frac{1}{\pi i \omega^2 z / z_R} \iint_{R^2} \exp \left[\frac{i z_R ((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)}{2z \omega^2(0)} \right] F(\xi, \eta, 0) d\xi d\eta. \quad (1)$$

В исходной плоскости комплексная амплитуда задана формулой $F(x, y, 0)$, ω – ширина гауссова пучка в исходной плоскости, $z_R = \frac{k\omega^2(0)}{2}$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

Амплитуда осевого гауссова пучка:

$$G(x, y, 0) = \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(0)} \right]. \quad (2)$$

Это означает, что комплексная амплитуда гауссова пучка, центр которого смещен в точку (x_0, y_0) , имеет вид:

$$G(x, y, 0|x_0, y_0) = \exp \left[\frac{-(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}{\omega^2} \right] \exp[i\varphi(x, y)]. \quad (3)$$

Найдем фазу $\varphi(x, y)$ такого пучка. Предположим, что эта фаза является линейной функцией координат $\varphi(x, y) = ax + by$ и определим коэффициенты a, b из условия сохранения формы спирального пучка (3). Для этого найдем преобразование Френеля смещенного гауссова пучка. После ряда математических преобразований выражение примет вид:

$$G(x, y, z|x_0, y_0) = \frac{1}{1 + \frac{2iz}{k}} \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{1 + \frac{2iz}{k}} \right] \times \\ \times \exp \left[\frac{i(ax + by)}{1 + \frac{2iz}{k}} - \frac{i(ax_0 + by_0)}{1 - \frac{ik}{2z}} \right]. \quad (4)$$

Чтобы пучок был спиральным, должно выполняться условие:

$$ax_0 + by_0 = 0 \Rightarrow \begin{pmatrix} a = -2y_0 \\ b = 2x_0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Подставив условие (5) в выражение (4), получим комплексную амплитуду гауссова пучка в исходной плоскости:

$$G(x, y, 0|x_0, y_0) = \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - 2i(xy_0 - yx_0)}{\omega^2} \right]. \quad (6)$$

Линейная комбинация смещенных гауссовых пучков. На основе полученного выражения для смещенного гауссова пучка можно рассчитать поля для манипуляции ансамблями одиночных микрочастиц, а именно поля с распределением интенсивности в заданной плоскости в виде набора точечных световых пятен с вихревой составляющей. Для быстрого и удобного синтеза таких спиральных пучков была создана программа по анализу изображений, которая по заданному эскизу определяет количество смещенных пучков и их положение. Для определения интенсивности и фазы искомого пучка использовались численные методы. Расчет может быть выполнен, например, при помощи пакета Wolfram Mathematica для получения фазового распределения с заданным пространственным разрешением. На рис. 1 приведены примеры построения спиральных пучков в виде набора смещенных гауссовых пучков: слева показаны распределения интенсивности пучка, справа – соответствующие фазовые распределения. На рис. 2 показано распределение интенсивности спирального пучка в исходной плоскости и плоскости Фурье. Из рис. 2 видно, что распределения интенсивности различаются масштабом и поворотом на 90 градусов, при этом они сохранили свою структуру. Это является доказательством, что сформированный пучок – спиральный.

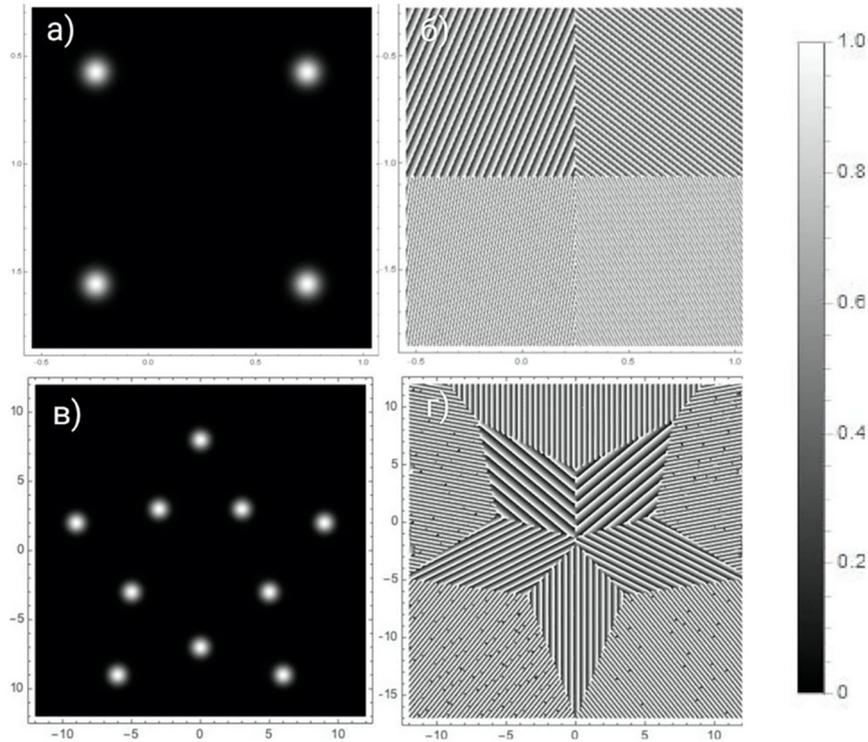


Рис. 1: Распределения интенсивности и фазы спиральных пучков в форме вершин фигур: (а) квадрата и (в) звезды; ((б), (г)) – соответствующие распределения фазы. Цвета изображения соответствуют распределению градации серого (0–255).

Световые поля, обладающие свойством поворота, были сформированы экспериментально, с использованием только фазового распределения рассчитанных спиральных пучков. Формирование осуществлялось с помощью жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС HoloEye NEO-1080P) с разрешением 1080 на 1920 пикселей с размером пикселя 8 мкм. К фазовому распределению дополнительно вписывалась линза с фокусным расстоянием $F = 501$ мм. Распределения интенсивности фиксировались в фокальной плоскости вписанной линзы. Съемка производилась на камеру Canon EOS 350D со снятым объективом.

При юстировке оптических схем часто возникает потребность масштабирования фазового распределения с помощью пространственного модулятора света. В работе было экспериментально проверено влияние различных масштабов фазового распределения на качество распределения интенсивности. Для опыта было рассчитано фазовое распределение размером 256×256 пикселей, затем увеличено до 512×512 и 1024×1024 . Сформированные с помощью ЖК ПМС распределения интенсивности при увеличении

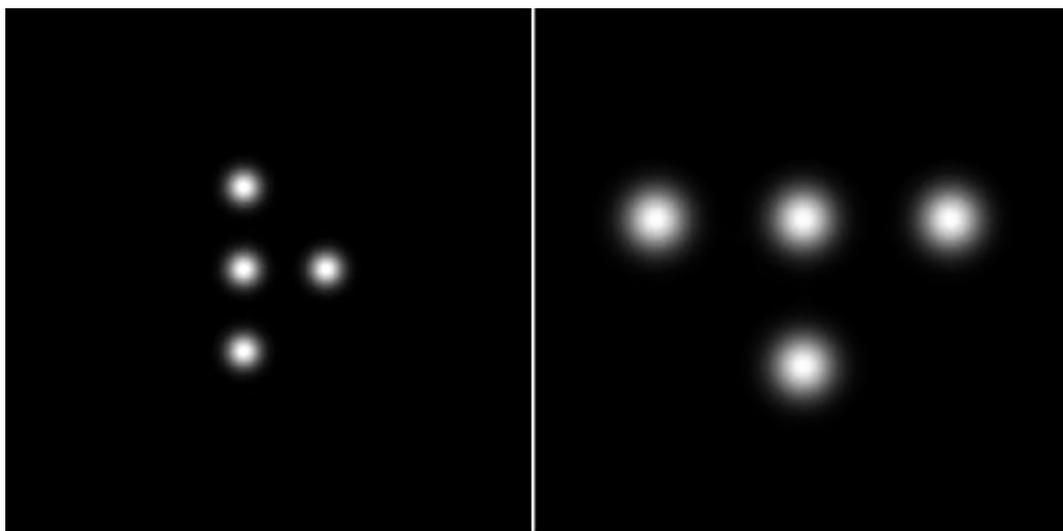


Рис. 2: Распределения интенсивности спиральных пучков: (а) в исходной плоскости, (б) в фурье-плоскости.

разрешения фазового распределения представлены на рис. 3. Изображения 3(а)–(в) соответствуют размерам 256×256 , 512×512 и 1024×1024 . Затем для проверки предположения было аналогично рассчитано фазовое распределение размером 1024×1024 пикселей и сжато до размера 512×512 и 256×256 . Результаты представлены на рис. 4.

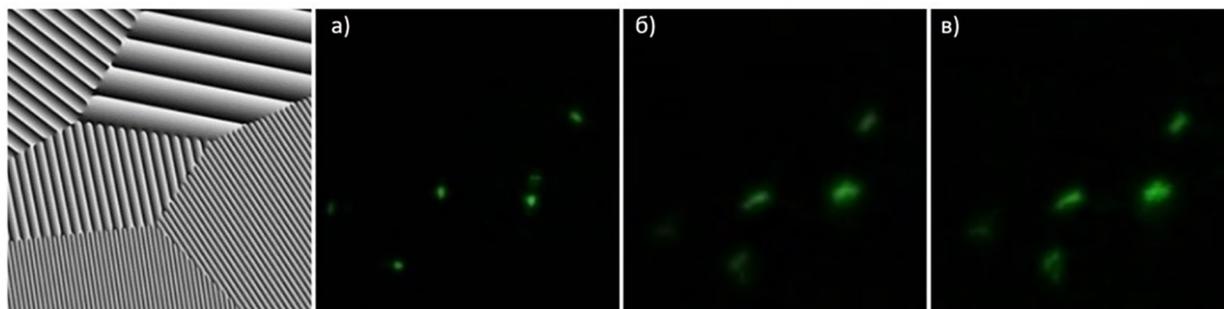


Рис. 3: Изображения распределений интенсивности вихревых световых полей при фазовом распределении размером: (а) 256×256 , (б) 512×512 , (в) 1024×1024 .

На основании проведенных экспериментов можно сделать несколько выводов. Во-первых, рассчитанные поля при необходимости могут быть подвержены намеренной деформации, сохраняя свою структуру и свойства. Во-вторых, мы наблюдаем, что при сжатии происходит деформация фазы, сингулярности смещаются случайным образом. При сильном уменьшении масштаба это приводит к потере информации о сингуляр-

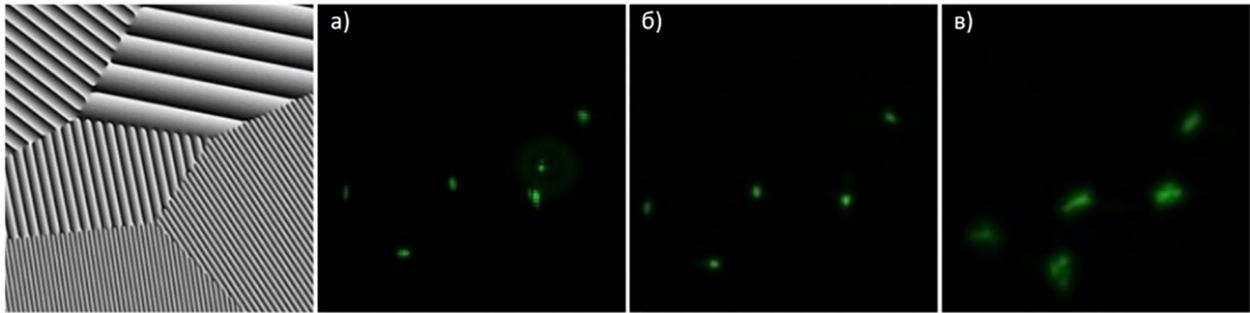


Рис. 4: Изображения распределений интенсивности вихревых световых полей при фазовом распределении размером: (а) 1024×1024 , (б) 512×512 , (в) 256×256 .

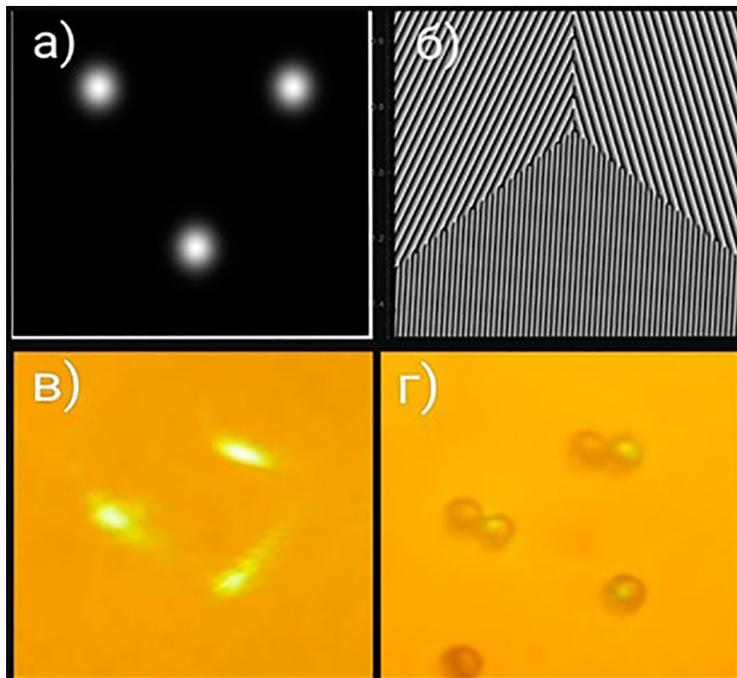


Рис. 5: (а) распределение интенсивности спиральных пучков; (б) фазовое распределение спиральных пучков; (в) распределение интенсивности в рабочей зоне пинцета; (г) кадр из эксперимента по захвату латексных сфер (изображение 60 на 60 мкм). Размер изображений (а) и (б) составляет 1024×1024 пикселей.

ностях фазового распределения, поэтому мы получаем некорректное изображение на эксперименте.

Оптическая манипуляция ансамблем микрообъектов. Эксперименты по оптической манипуляции проводились световым полем в виде вершин треугольника. Поле форми-

ровалось с помощью ЖК ПМС PLUTO-2-NIR-011. Схема установки включала в себя DPSS лазер с мощностью 51 мВт на длине волны 532 нм, систему линз и зеркал, направляющих пучок в объектив микроскопа, CD камеру и ПК. На модулятор подавалось фазовое распределение (рис. 5(б)) для спирального пучка в виде вершин треугольника. Сфокусированный с помощью микрообъектива с 40X увеличением пучок служил для захвата частиц латекса диаметром 4 мкм. На рис. 5(г) приведен кадр с захваченными латексными микросферами. В двух ловушках захвачены микрочастицы, которые были жестко сцеплены друг с другом. Несмотря на это, можно отчетливо увидеть положения частиц в виде вершин треугольника. Размер изображений (а) и (б) 1024×1024 пикселей.

Заключение. В статье представлено развитие одного из методов формирования спиральных пучков в виде линейной комбинации смещенных гауссовых пучков, продемонстрированы результаты реализации программы по синтезу таких пучков. Экспериментально показано, что при изменении масштаба фазового распределения качество остается приемлемым при сжатии не более чем в четыре раза. Сформированные вихревые световые поля на основе рассчитанных фазовых распределений таких пучков были апробированы при манипулировании ансамблем микроскопических объектов в оптическом пинцете.

Реализованный нами способ расчета позволил значительно упростить и ускорить процесс создания вихревых световых полей для оптической манипуляции ансамблями микрообъектов.

Выражаем благодарность Прокоповой Д. В. за помощь при проведении экспериментов при формировании вихревых световых полей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Y. Yang, Y. Ren, M. Chen, et al., *Advanced Photonics* **3**(03), 034001 (2021). DOI: 10.1117/1.AP.3.3.034001.
- [2] H. Rubinstein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, et al., *Journal of Optics* **19**(1), 013001 (2016). DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [3] L. Zhu, Y. Tai, H. Li, et al., *Photonics Research* **11**(9), 1524 (2023). DOI: 10.1364/PRJ.490103.
- [4] J. A. Rodrigo, M. Angulo, T. Alieva, *Photonics Research* **9**(1), 1 (2021). DOI: 10.1364/PRJ.408680.

- [5] A. P. Porfirev, S. N. Khonina, A. R. Skidanova, et al., *Physics of Wave Phenomena* **32**(2), 83 (2024). DOI: 10.3103/S1541308X24700031.
- [6] E. G. Abramochkin, V. G. Volostnikov, *Opt. Commun.* **125**, 302 (1996). DOI: 10.1016/0030-4018(95)00640-0.
- [7] Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников, *Современная оптика гауссовых пучков* (М., Физматлит, 2010).
- [8] И. Ю. Еремчев, Д. В. Прокопова, Н. Н. Лосевский и др., *Успехи физических наук* **192**(6), 663 (2022). DOI: 10.3367/UFNr.2021.05.038982.
- [9] В. Г. Волостников, С. А. Кишкин, С. П. Котова, *Квантовая электроника* **48**(3), 268 (2018). DOI: 10.1070/QEL16920.
- [10] В. Г. Волостников, С. А. Кишкин, С. П. Котова, М. С. Русакова, *Квантовая электроника* **49**(1), 83 (2019). <https://doi.org/10.1070/QEL16920>.
- [11] E. G. Abramochkin, S. P. Kotova, A. V. Korobtsov, et al., *Laser Physics* **16**(5), 842 (2006). DOI: 10.1134/S1054660X06050161.
- [12] Е. Г. Абрамочкин, К. Н. Афанасьев, В. Г. Волостников и др., *Известия РАН. Серия физическая* **72**(1), 68 (2008). DOI: 10.3103/S1062873808010176.
- [13] С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, Д. В. Прокопова, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(11), 9 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622110045.
- [14] А. В. Коробцов, С. П. Котова, Н. Н. Лосевский и др., *Квантовая электроника* **52**(9), 856 (2022). DOI: 10.3103/S1068335623130043.
- [15] С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова и др., *Известия РАН. Серия физическая* **86**(12), 1434 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522120201.
- [16] А. В. Воляр, Е. Г. Абрамочкин, Е. В. Разуева и др., *Компьютерная оптика* **45**(4), 482 (2021). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-885.
- [17] E. G. Abramochkin, K. N. Afanasiev, V. G. Volostnikov, et al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **72**(1), 68 (2008). DOI: 10.3103/S1062873808010176.

Поступила в редакцию 22 февраля 2024 г.

После доработки 3 июня 2024 г.

Принята к публикации 4 июня 2024 г.