

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА АСИММЕТРИЧНЫХ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ-ГАУССА

А.П. Порфирьев, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Экспериментально исследуется новый тип пучков – ассиметричные пучки Бесселя-Гаусса, обладающие орбитальным угловым моментом. Показана возможность осуществления оптического захвата, вращения и перемещения микросфер полистирола диаметром 5 мкм с помощью пучков данного типа с различной степенью асимметрии, сформированных с помощью пространственного жидкокристаллического модулятора света. Продемонстрирована практически линейная зависимость скорости движения микрочастиц от параметра, отвечающего за асимметрию пучка.

Ключевые слова: оптическое манипулирование, пространственный модулятор света, ассиметричный пучок Бесселя-Гаусса, орбитальный угловой момент.

Введение

Лазерные пучки, обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ), в настоящее время находят широкое применение в таких областях, как оптическое манипулирование, оптические коммуникации, изображающие системы [1,2]. В частности, в области оптического манипулирования передача ОУМ частицам и связанный с ним момент частицы позволяет создавать так называемые «оптические гаечные ключи» (optical spanner or wrench) [3].

После того, как в работе [4] был продемонстрирован способ формирования пучков с высокими значениями ОУМ, резко выросло число публикаций, описывающих различные методы формирования таких пучков [5-9]. Отметим, что ОУМ обладают все оптические вихри или сингулярные лазерные пучки с фазовой особенностью или дислокацией волнового фронта [10]. У таких пучков вектор Умова–Пойнтинга (поток мощности) вращается по спирали вокруг точек фазовой сингулярности.

В данной работе экспериментально исследуется орбитальный угловой момент нового типа пучков, предложенных в работе [11] – ассиметричных пучков Бесселя-Гаусса (аБГ-пучки). Ранее было теоретически показано, что ОУМ пучков такого типа определяется не только их топологическим зарядом, но и параметром асимметрии [12]. Такие уникальные свойства данных пучков могут быть полезными в области оптического манипулирования объектами микро- и наномасштаба. Мы исследуем оптический захват, вращение и перемещение микросфер полистирола диаметром 5 мкм с помощью аБГ-пучков с разной степенью асимметрии. Экспериментально доказано, что при постоянном значении топологического заряда с ростом степени асимметрии пучка растёт ОУМ лазерного аБГ-пучка и растёт скорость перемещения микрочастиц вдоль искривлённой траектории этого пучка в поперечной плоскости.

1. Асимметричный пучок Бесселя-Гаусса

В [12, 13] рассмотрен асимметричный пучок Бесселя-Гаусса:

$$\begin{aligned}
 E_n(r, \varphi, z; c) = & \frac{1}{q} \exp\left(ikz - \frac{i\alpha^2 z}{2kq} - \frac{r^2}{q\omega_0^2} + in\varphi\right) \times \\
 & \times \left[\frac{\alpha r}{\alpha r - 2cq \exp(i\varphi)} \right]^{n/2} \times \\
 & \times J_n \left\{ q^{-1} \sqrt{\alpha r [\alpha r - 2cq \exp(i\varphi)]} \right\}, \\
 & q = q(z),
 \end{aligned} \tag{1}$$

который получается из обычного БГ-пучка [12]

$$\begin{aligned}
 E_n(r, \varphi, z) = & q^{-1}(z) \exp\left(ikz - \frac{i\alpha^2 z}{2kq(z)}\right) \times \\
 & \times \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2 q(z)} + in\varphi\right) J_n \left[\frac{\alpha r}{q(z)} \right],
 \end{aligned} \tag{2}$$

с помощью комплексного смещения по декартовым координатам

$$\begin{cases} x' = x - \frac{c}{\alpha}, \\ y' = y - \frac{ic}{\alpha}, \end{cases} \tag{3}$$

где c – безразмерный параметр асимметрии, $\alpha = k \sin \theta_0 = (2\pi/\lambda) \sin \theta_0$ – масштабирующий множитель, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число света с длиной волны λ , θ_0 – угол конической волны, формирующей пучок Бесселя, где $q(z) = 1 + iz/z_0$, $z_0 = k\omega_0^2/2$ – длина Рэлея, ω_0 – радиус перетяжки гауссова пучка, $J_n(x)$ – функция Бесселя первого рода n -го порядка, n – топологический заряд пучка. Поле (1) формирует параксиальный асимметричный пучок Бесселя-Гаусса при любых целых n и любой комплексной постоянной c . На рис. 1 показаны распределение интенсивности и фазы аБГ-пучка (1) при значении параметра асимметрии c равном 10. При моделировании были использованы следующие значения параметров: длина волны $\lambda = 532$ нм, радиус перетяжки гауссова пучка $\omega_0 = 10\lambda$, масштабирующий множитель $\alpha = 1/(10\lambda)$, границы расчётной области $-40\lambda \leq x, y \leq 40\lambda$.

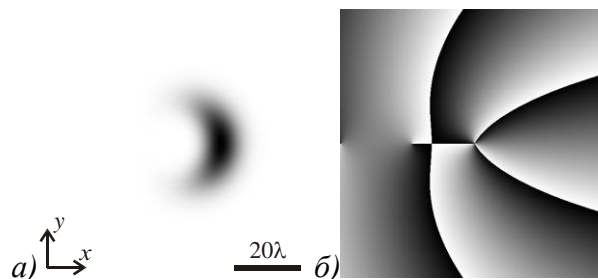


Рис. 1. Распределение интенсивности (негатив) (а) и фазы (б) светового пучка (1) с топологическим зарядом $n = 3$ в начальной плоскости при $z = 0$ для $c = 10$

Выражение для орбитального углового момента (ОУМ) аБГ-пучка, нормированного на мощность, имеет вид ($\text{Im}(c) = 0$) [12, 13]:

$$\frac{J_z}{W} = n + \sum_{p=0}^{\infty} \frac{c^{2p} p I_{n+p}(y)}{(p!)^2} \left[\sum_{p=0}^{\infty} \frac{c^{2p} I_{n+p}(y)}{(p!)^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $y = \alpha^2 \omega_0^2 / 4$, $I_n(y)$ - модифицированные функции Бесселя. Из (4) следует, что ОУМ аБГ-пучков больше n , так как все слагаемые рядов в (4) положительные. То есть с ростом параметра c , растёт асимметрия аБГ-пучка и почти линейно растёт его ОУМ, как видно из рис. 2.

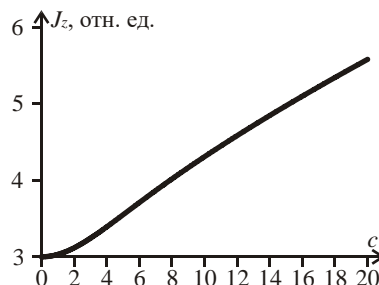


Рис. 2. Зависимость ОУМ от параметра асимметрии c при $n = 3$, $\omega_0 = 10\lambda$, $\alpha = 1/(10\lambda)$

2. Экспериментальное исследование оптического манипулирования с помощью асимметричных пучков Бесселя-Гаусса

Для экспериментального формирования аБГ-пучков мы использовали оптическую схему, показанную на рис. 3. Выходной пучок твердотельного лазера L ($\lambda = 532$ нм, максимальная выходная мощность 1500 мВт) расширялся с помощью системы, состоящей из микрообъектива $MO1$ ($16\times$, $NA = 0,3$) и линзы $L1$ ($f1 = 250$ мм). Далее лазерный пучок направлялся на дисплей пространственного модулятора света SLM (PLUTO VIS, разрешение 1920×1080 пикселей, размер пикселя 8 мкм). Отражённый от модулятора лазерный пучок с помощью системы линз $L2$ ($f2 = 350$ мм) и $L3$ ($f3 = 150$ мм) направлялся во входное отверстие микрообъектива $MO2$ ($60\times$, $NA = 0,85$). Изображение плоскости манипулирования проецировалось на матрице CMOS камеры LOMO TC-1000 (разрешение 1280×960 пикселей, размер пикселя 1,67 мкм) с помощью микрообъектива $MO3$ ($16\times$, $NA = 0,4$). Для подсветки области захвата использовалась система, состоящая из конденсора C и освещающей лампы I , свет от которой вводился с использованием делителя пучка BS . Для манипулирования в эксперименте были использованы микросферы полистирола диаметром 5 мкм, которые находились на стеклянной подложке P .

В зависимости от параметра c сформированного аБГ-пучка в ходе экспериментов наблюдалось либо вращение микросфер полистирола вдоль сформированного светового кольца с асимметричным распределением интенсивности (при значениях $c < 1$), либо перемещение захваченных микросфер вдоль сформированной световой кривой в форме полумесяца (при значениях $c \geq 1$). Типичные результаты экспериментов с использованием аБГ-пучков с параметрами $c1 = 0,3$ и $c2 = 3$ и показаны на рис. 4 и 5, соответственно. Для формирования данных пучков были использованы выведенные на дисплей модулятора света фазовые функции, закодированные суперпиксельным методом [14]. В каждом из этих случаев значение параметра n равно 3. Как видно в экспериментах, представленных на рис. 4, наблюдается вращение трёх захваченных микрочастиц полистирола по часовой стрелке.

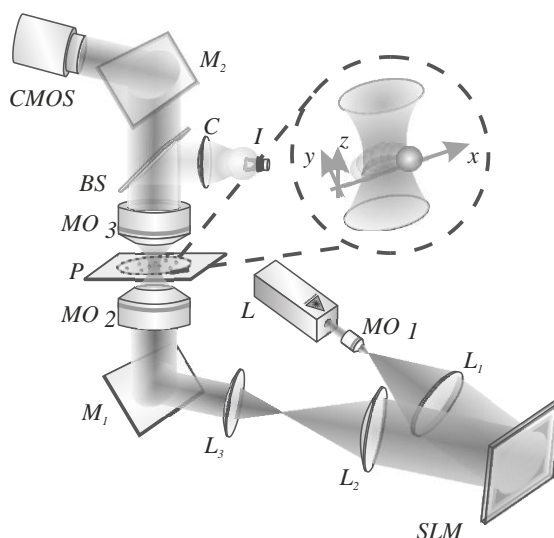


Рис. 3. Экспериментальная схема установки для исследования передачи ОУМ микросферам полистирола с использованием аБГ-пучков: L – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм, максимальная выходная мощность 1500 мВт), MO_1 – микрообъектив ($8\times$, $NA = 0,3$), L_1 , L_2 и L_3 - линзы с фокусными расстояниями ($f_1 = 250$ мм, $f_2 = 350$ мм, $f_3 = 150$ мм), SLM – пространственный модулятор света PLUTO VIS (разрешение 1920×1080 пикселей, размер пикселя 8 мкм), MO_2 - микрообъектив ($60\times$, $NA = 0,85$), P – стеклянная подложка со взвесью микросфер полистирола, MO_3 – микрообъектив ($16\times$, $NA = 0,4$), CMOS - видеокамера LOMO TC-1000 (разрешение 1280×960 пикселей, размер пикселя 1,67 мкм), C – конденсор, I – освещающая лампа, BS – делитель пучка

В случае, когда параметр $s_2 = 3$ неподвижная микросфера полистирола, попав в область пучка, ускоряется и перемещается вдоль световой кривой (рис. 5), сформированной в плоскости захвата.

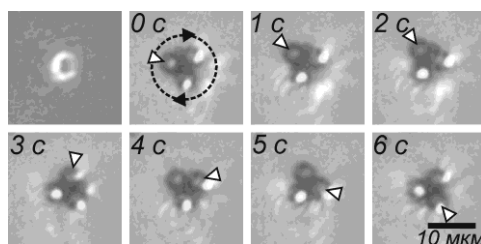


Рис. 4. Распределение интенсивности в плоскости захвата (верхний левый кадр) и стадии движения трёх микросфер полистирола, захваченных с помощью аБГ-пучка с параметрами $n = 3$, $s = 0,3$. Стрелочка показывает изменение положения одной из частиц

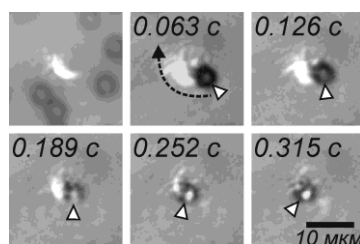


Рис. 5. Распределение интенсивности в плоскости захвата (верхний левый кадр) и стадии движения микросферы полистирола, захваченной с помощью аБГ-пучка с параметрами $n = 3$, $s = 3$. Стрелочка показывает изменение положения одной из частиц

Как следует из уравнения (4) и графика, представленного на рис. 2, значение ОУМ аБГ-пучка зависит не только от топологического заряда n пучка, но также и от параметра s . Как было сказано выше, данный параметр отвечает за асимметрию формируемого распределения интенсивности. Если считать, что мощность пучков с различными параметрами одинаковая, то отношение ОУМ двух аБГ-пучков с различными

параметрами c будет выражаться как $(J_z|_{c=c_1})/(J_z|_{c=c_2})$. В табл. 1 приведены значения отношения ОУМ пучков с различными параметрами c к ОУМ пучка с параметром $c = 1$. Для представленных пучков значение топологического заряда равно $n = 3$.

Для экспериментального подтверждения наличия данной зависимости были проведены эксперименты с асимметричными пучками Бесселя-Гаусса с параметрами $c = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$. В этих экспериментах, так же как и в экспериментах, представленных на рис. 4 и 5, в зависимости от параметра c наблюдалось либо вращение захваченных микросфер по окружности с неоднородной интенсивностью, либо их перемещение вдоль сформированной световой кривой. Отметим, что экспериментально измеренная эффективность формирования данных пучков в пределах погрешности используемого измерителя мощности была одинаковой для пучков с различными параметрами c . В табл. 2 приведены данные об экспериментально измеренных скоростях движения захваченных микросфер полистирола для каждого из сформированных пучков.

Табл. 1. Рассчитанные по формуле (4) значения отношений ОУМ аБГ-пучков с параметрами $c = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ к ОУМ аБГ-пучка с параметром $c = 1,0$. Топологический заряд пучков $n = 3$

c	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\frac{J_z _c}{J_z _{c=1}}$	1,00	1,14	1,28	1,42	1,55

Табл. 2. Экспериментально измеренные значения скоростей движения полистироловых микросфер v , захваченных с помощью аБГ-пучка с одним и тем же топологическим зарядом $n = 3$, но с разными значениями параметра асимметрии c

c	v , МКМ/с
1,0	13,6 ± 0,9
1,5	15,3 ± 1,8
2,0	17,5 ± 2,6
2,5	17,7 ± 2,8
3,0	19,0 ± 2,8

В табл. 3 представлены значения отношений величин скоростей движения полистироловых микросфер, приведённых в табл. 2.

Табл. 3. Экспериментально измеренные значения отношений величин скоростей движения полистироловых микросфер $(v/c)/(v|_{c=1})$, захваченных с помощью аБГ-пучков с одним и тем же топологическим зарядом $n = 3$, но с разными значениями параметра асимметрии c

c	$(v/c)/(v _{c=1})$
1,0	1,0
1,5	1,1 ± 0,2
2,0	1,3 ± 0,2
2,5	1,3 ± 0,2
3,0	1,4 ± 0,2

На рис. 6 представлена зависимость отношения экспериментально измеренных скоростей движения микросфер полистирола, захваченных с помощью аБГ-пучков с различными значениями параметра c от значения данного параметра.

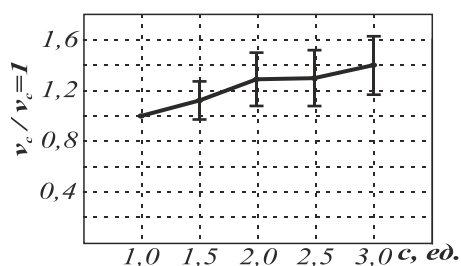


Рис. 6. Зависимость отношения экспериментально измеренных скоростей движения микросфер полистирола, захваченных с помощью аБГ-пучков с различными значениями параметра c от значения данного параметра ($n = 3$)

Видно, что с возрастанием значения c увеличивается средняя скорость движения захваченных микросфер. Скорость движения захваченных микросфер должна быть прямо пропорциональна переданному им ОУМ. В то же время формула (4) не учитывает такие факторы, как броуновское движение частиц, вязкость жидкости и прочие. Кроме того, экспериментально сформированные асимметричные пучки Бесселя-Гаусса формировались с помощью закодированных фазовых функций, которые не полностью учитывают амплитудную составляющую кодируемых комплексных распределений. Все эти факторы приводят к небольшим количественным отклонениям экспериментально измеренных отношений скоростей (табл. 3) захваченных частиц (нормировка производилась относительно скорости движения микросфер, захваченных с помощью асимметричного пучка Бесселя-Гаусса с параметрами $n = 3$ и $c = 1$) от рассчитанных по формуле (5) отношений ОУМ (табл. 1) асимметричных пучков Бесселя-Гаусса, использованных при захвате (нормировка производилась относительно ОУМ асимметричного пучка Бесселя-Гаусса с параметрами $n = 3$ и $c = 1$). Наличие качественного соответствия эксперимента и численного расчёта очевидно из представленных результатов.

3. Заключение

В работе экспериментально доказан почти линейный рост величины удельного орбитального углового момента лазерных асимметричных пучков Бесселя-Гаусса, предсказанный теоретически ранее в [1-4]. Эксперименты показали, что асимметричные пучки Бесселя-Гаусса с одинаковым топологическим зарядом ($n = 3$) и одинаковой мощностью, но имеющие разную степень асимметрии по разному вращают (перемещают) микрочастицы. С ростом параметра асимметрии (от $c = 1$ до $c = 3$) скорость движения микрочастиц по траектории пучка в поперечной плоскости почти линейно увеличилась в 1,4 раза. При этом орбитальный угловой момент пучка по теории должен увеличиться в 1,55 раза.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-9498.2016.9), а также грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, и 15-47-02492.

Литература

1. Yao, A.M. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / A.M. Yao, M.J. Padgett // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – Vol. 3. – P. 161-204.
2. Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7. – P. 66-106.
3. Padgett, M. Optical tweezers and spanners / M. Padgett, L. Allen // *Physics World*. – 1997. – Vol. 10. – P. 35-38.
4. Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
5. Berry, M. V. Orbital and spin angular momentum in conical diffraction / M.V. Berry, M.R. Jeffrey, M. Mansuripur // *Journal of Optics: A-Pure and Applied Optics*. – 2005. – Vol. 7(11). – P. 685-690.
6. Wang, X.-L. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization / X.-L. Wang, J. Chen, Y. Li, J. Ding, C.-S. Guo, H.-T. Wang // *Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 105(25). – P. 253602.
7. Kotlyar, V.V. Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, H. Elfstrom, J. Turunen, A.A. Almazov, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2005. – Vol. 22(5). – P. 849-861.
8. Kotlyar, V.V. Diffraction of a finite-radius plane wave and a Gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Y. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2007. – Vol. 24(7). – P. 1955-1964.
9. Yu, H. Optical orbital angular momentum conservation during the transfer process from plasmonic vortex lens to light / H. Yu, H. Zhang, Y. Wang, S. Han, H. Yang, X. Xu, Z. Wang, V. Petrov, J. Wang // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. – P. 3191.
10. Berry, M. The elliptic umbilic diffraction catastrophe / M. Berry, J. Nye, F. Wright // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1979. – Vol. 291. – P. 453-484.
11. Kotlyar, V.V. Assymmetric Bessel-Gauss beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2014. – Vol. 31(9). – P. 1977-1983.
12. Kotlyar, V.V. Asymmetric Bessel modes / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39(8). – P. 2395-2398.
13. Котляр, В.В. Вращающиеся элегантные пучки Бесселя–Гаусса / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 162-170.
14. Goorden, S.A. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device / S.A. Goorden, J. Bertolotti, A.P. Mosk // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22. – P. 17999-18009.