

## ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МИКРОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ АСИММЕТРИЧНЫХ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ–ГАУССА

А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, А.А. Ковалёв<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

### Аннотация

Исследуется оптический захват, вращение и перемещение полистироловых микрошариков диаметром 5 мкм в лазерных асимметричных пучках Бесселя–Гаусса в виде полумесяца, которые обладают орбитальным угловым моментом. Эти пучки были сформированы с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусированы микрообъективом с числовой апертурой 0,85. Экспериментально показано, что при постоянном значении топологического заряда пучка с ростом степени асимметрии пучка почти линейно растёт скорость движения микрочастиц. Это подтверждает линейную зависимость орбитального углового момента лазерного пучка от степени его асимметрии. Пучки в виде полумесяца можно использовать для уменьшения теплового воздействия при оптическом манипулировании биологическими объектами.

**Ключевые слова:** оптический захват, пространственный модулятор света, формирование лазерных пучков, асимметричный пучок Бесселя–Гаусса, орбитальный угловой момент.

**Цитирование:** Порфирьев, А.П. Оптический захват и перемещение микрочастиц с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса / А.П. Порфирьев, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 152-157. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.

### Введение

В [1–4] рассмотрены непараксиальные асимметричные моды Бесселя (аБ-моды) и параксиальные асимметричные пучки Бесселя–Гаусса (аБГ), обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ). В поперечном сечении этих лазерных пучков распределение интенсивности имеет вид полумесяца. В [5] аБ-моды исследовались экспериментально с помощью цифровой матрицы микрозеркал. В [6] по аналогии с [2] (вводя комплексное смещение моды Бесселя) рассмотрены асимметричные пучки Чебышева–Бесселя. В [3–5] исследовалась также параксиальная фокусировка аБ-пучков. С другой стороны, известны векторные пучки Бесселя [7, 8], которые распространяются без дифракции и имеют различные состояния поляризации. В [7] показано, что бездифракционный линейно-поляризованный векторный пучок Бесселя выражается через ряды из функций Бесселя и имеет в своем спектре бесконечное число угловых гармоник. Векторные пучки Бесселя с азимутальной и радиальной поляризациями можно сформировать с помощью 4 конических поверхностей с углом Брюстера или 4 аксиконов [9]. Сфокусированный лазерный пучок с распределением интенсивности в виде полумесяца используется для оптического захвата и перемещения биологических микрообъектов [10]. Но данный пучок рассчитывается итеративно в параксиальном приближении, и его острая фокусировка в [10] не исследуется. Острая фокусировка аБГ-пучков исследовалась в [11].

В данной работе исследуется оптический захват, вращение и перемещение полистироловых микрошариков с помощью аБГ-пучков с разной степенью асимметрии. Экспериментально доказано, что при постоянном значении топологического заряда с ро-

стом степени асимметрии пучка растёт ОУМ лазерного аБГ-пучка и скорость перемещения микрочастиц вдоль искривлённой траектории этого пучка в поперечной плоскости.

### 1. Асимметричный пучок Бесселя–Гаусса

В [3, 4] рассмотрен асимметричный пучок Бесселя–Гаусса:

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

который получается из обычного БГ-пучка [12]

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

с помощью комплексного смещения моды Бесселя 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  $\lambda$ ,  $\theta_0$  – угол конической волны, формирующей пучок Бесселя

ля,  $q(z) = 1 + iz/z_0$ ,  $z_0 = k\omega_0^2/2$  – длина Рэлея,  $\omega_0$  – 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  $c$ . Но для простоты в дальнейшем будем считать постоянную  $c$  вещественной положительной величиной:  $c \geq 0$ . Хотя если рассмотреть  $c$  как комплексную величину  $c = |c| \arg c$  или учесть, что она может быть отрицательной  $c < 0$ , то распределение интенсивности поля (1) повернется на угол  $\arg c$  вокруг оптической оси. На рис. 1 показано 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  $-40\lambda \leq x, y \leq 40\lambda$ .

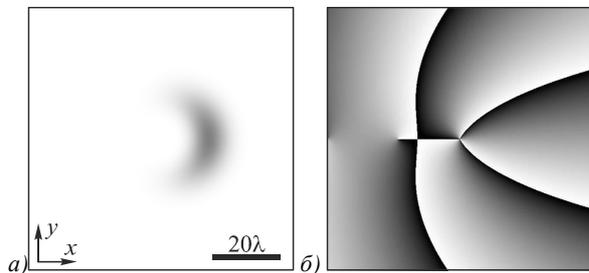


Рис. 1. Распределение интенсивности (негатив) (а) и фазы (б) светового пучка (1) с топологическим зарядом  $n = 3$  в начальной плоскости при  $z = 0$  для  $c = 10$

Угловой Фурье-спектр аБГ-пучка имеет вид [3, 4]:

$$A_n(\rho, \phi) = \exp\left[-\left(\frac{k\rho\omega_0}{2f}\right)^2 + in\phi\right] \times \left(\frac{\xi}{\xi + 2ce^{i(\phi-\pi/2)}}\right)^{n/2} \times I_p\left\{\sqrt{\xi[\xi + 2ce^{i(\phi-\pi/2)}]}\right\}, \quad (4)$$

где  $\xi = \alpha k\rho\omega_0^2/(2f)$ ,  $I_n(x)$  – модифицированная функция Бесселя. Угловой спектр (4) асимметричный: при  $\phi = \pi/2$  и на кольце фиксированного радиуса  $\rho = \rho_0$  модуль амплитуды (4) имеет максимум, а при  $\phi = -\pi/2$  – минимум. Вид углового спектра (4) похож на вид амплитуды аБГ-пучка (1) (с точностью до замены функции Бесселя модифицированной функцией Бесселя), но повернут на 90 градусов. Поэтому асимметрия спектра (4) похожа на асимметрию аБГ-пучка (1).

Выражение для ОУМ, нормированного на интенсивность, имеет вид [3, 4]:

$$\frac{J_z}{I} = n + \sum_{p=0}^{\infty} \frac{c^{2p} p I_{n+p}(y)}{(p!)^2} \left[ \sum_{p=0}^{\infty} \frac{c^{2p} I_{n+p}(y)}{(p!)^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $y = \alpha^2 \omega_0^2/4$ . Выражение (5) дальше упростить не удаётся. Из (5) следует, что ОУМ аБГ-пучков больше

$n$ , так как все слагаемые рядов в (5) положительные. То есть с ростом параметра  $c$  растёт асимметрия аБГ-пучка и почти линейно растёт его ОУМ, как видно из рис. 2. Так как параметры  $\alpha$  и  $c$  являются действительными положительными числами, то второе слагаемое в (5) может быть как целым, так и дробным положительным числом. Поэтому из (5) также следует, что аБГ-пучок нулевого порядка ( $n = 0$ ) может иметь любой ОУМ. Заметим также, что в (5) масштабные параметры пучка Бесселя  $\alpha$  и Гауссова пучка  $\omega_0$  входят в виде произведения, поэтому у разных аБГ-пучков, у которых  $\alpha\omega_0 = \text{const}$ , ОУМ будет одинаковым (при равных  $n$  и  $c$ ).

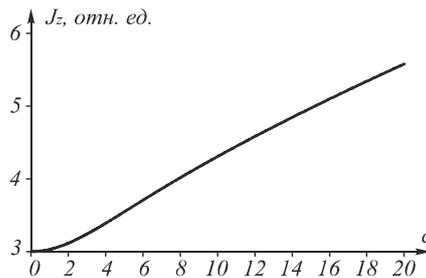


Рис. 2. Зависимость ОУМ от параметра асимметрии  $c$  при  $n = 3$ ,  $\omega_0 = 10\lambda$ ,  $\alpha = 1/(10\lambda)$

Для формирования аБГ-пучка был использован пространственный модулятор света SLM PLUTO-VIS (разрешение –  $1920 \times 1080$  пикселей, размер пикселя – 8 мкм). Фаза и амплитуда пучка (1) кодировалась в виде только фазы и выводилась на этот модулятор [11]. На рис. 3 показаны распределения интенсивности аБГ-пучка, сформированные SLM на некотором расстоянии (а), и интенсивность в фокусе иммерсионного микробиообъектива с высокой числовой апертурой ( $NA = 1,25$ ) (б). Видно, что в случае, представленном на рис. 3, пучок при фокусировке поворачивается на 90 градусов и при этом сохраняет свою структуру с точностью до масштаба.

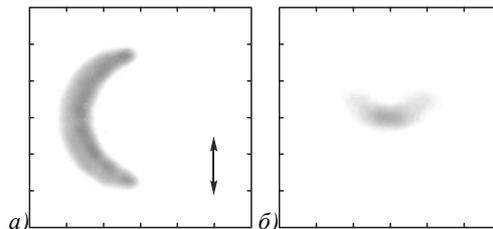


Рис. 3. Фокусировка асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью микробиообъектива с высокой числовой апертурой ( $NA = 1,25$ ). Полумесяц вытянут вдоль направления линейной поляризации освещающего пучка лазера (отмечено двунаправленной стрелочкой): а) распределение интенсивности в плоскости входного зрачка микробиообъектива (шаг сетки равен 200 мкм); б) распределение интенсивности в фокальной плоскости микробиообъектива (шаг сетки равен 2 мкм)

## 2. Эксперимент по передаче ОУМ микросферам полистирола с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса

В этом параграфе мы экспериментально докажем, что с увеличением параметра асимметрии аБГ-пучка

растёт ОУМ, и, значит, при прочих равных условиях большая часть ОУМ пучка должна передаваться микрочастице. Используемая оптическая схема показана на рис. 4. Выходной пучок твердотельного лазера  $L$  ( $\lambda = 532$  нм, максимальная выходная мощность – 1500 мВт) расширялся с помощью системы, состоящей из микрообъектива  $MO_1$  ( $16\times$ ,  $NA = 0,3$ ) и линзы  $L_1$  ( $f_1 = 250$  мм). Расширенный лазерный пучок направлялся на дисплей пространственного модулятора света SLM (PLUTO VIS, разрешение –  $1920 \times 1080$  пикселей, размер пикселя – 8 мкм). Отражённый от модулятора модулированный лазерный пучок с помощью системы линз  $L_2$  ( $f_2 = 350$  мм) и  $L_3$  ( $f_3 = 150$  мм) направлялся во входное отверстие микрообъектива  $MO_2$  ( $60\times$ ,  $NA = 0,85$ ). Изображение плоскости манипулирования проецировалось на матрицу CMOS камеры LOMO TC-1000 (разрешение –  $1280 \times 960$  пикселей, размер пикселя 1,67 мкм) с помощью микрообъектива  $MO_3$  ( $16\times$ ,  $NA = 0,4$ ). 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 пластинке  $P$ .

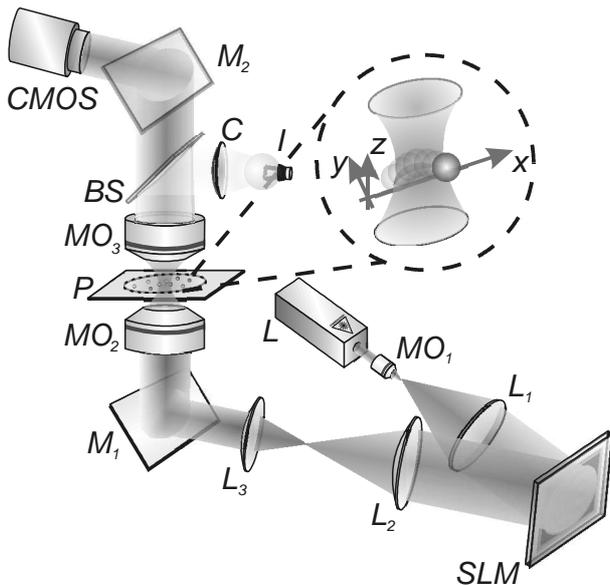


Рис. 4. Экспериментальная схема установки для исследования передачи ОУМ микросферам полистирола с использованием асимметричных пучков Бесселя–Гаусса:  $L$  – твердотельный лазер ( $\lambda = 532$  нм, максимальная выходная мощность 1500 мВт),  $MO_1$  – микрообъектив ( $8\times$ ,  $NA = 0,3$ ),  $L_1, L_2$  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 –  $1920 \times 1080$  пикселей, размер пикселя – 8 мкм),  $MO_2$  – микрообъектив ( $60\times$ ,  $NA = 0,85$ ),  $P$  – стеклянная пластинка со взвесью микросфер полистирола,  $MO_3$  – микрообъектив ( $16\times$ ,  $NA = 0,4$ ), CMOS – видеокамера LOMO TC-1000 (разрешение –  $1280 \times 960$  пикселей, размер пикселя – 1,67 мкм),  $C$  – конденсор,  $I$  – освещающая лампа,  $BS$  – делитель пучка

В зависимости от параметра  $c$  сформированного SLM (рис. 3) асимметричного пучка Бесселя–Гаусса 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 асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с параметрами  $c_1 = 0,3$  и  $c_2 = 3$  и показаны на рис. 5 и 6 соответственно. В каждом из этих случаев значение параметра  $n$  равно 3. Как видно в экспериментах, представленных на рис. 5, наблюдается вращение трёх захваченных микрочастиц полистирола со скоростью  $1,5 \pm 0,4$  мкм/с.

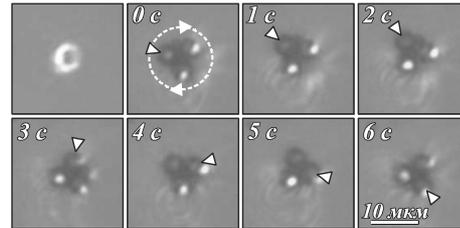


Рис. 5. Распределение интенсивности в плоскости захвата (верхний левый кадр) и стадии движения трёх микросфер полистирола, захваченных с помощью асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с параметрами  $n = 3, c = 0,3$ . Стрелочка показывает изменение положения одной из частиц

Во втором случае ( $c_2 = 3$ ) неподвижная микросфера полистирола, попав в область пучка, ускоряется и перемещается вдоль световой кривой (рис. 6), сформированной в плоскости захвата (средняя скорость перемещения равна  $22,9 \pm 1,0$  мкм/с). Для формирования данных пучков были использованы выведенные на дисплей модулятора света фазовые функции, закодированные суперпиксельным методом [13].

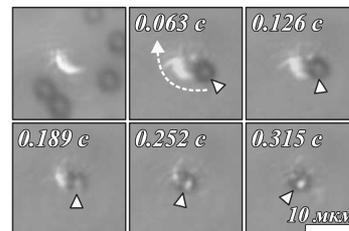


Рис. 6. Распределение интенсивности в плоскости захвата (верхний левый кадр) и стадии движения микросферы полистирола, захваченной с помощью асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с параметрами  $n = 3, c = 3$ . Стрелочка показывает изменение положения одной из частиц

Из уравнения (5) и рис. 2 видно, что на значение ОУМ влияние оказывает не только топологический заряд  $n$  сформированного асимметричного пучка Бесселя–Гаусса, но также и параметр  $c$ , отвечающий за асимметрию формируемого распределения интенсивности. Если считать, что мощность пучков с различными параметрами одинаковая, то отношение ОУМ двух асимметричных пучков Бесселя–Гаусса 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  $c = 1,0$ . Для представленных пучков значение топологического заряда равно  $n = 3$ .

Табл. 1. Рассчитанные по формуле (5) значения отношений ОУМ асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с параметрами  $c = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$  к ОУМ асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с параметром  $c = 1,0$ . Топологический заряд пучков  $n = 3$

$c$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$(J_z _c)/(J_z _{c=1})$	1,00	1,14	1,28	1,42	1,55

Для экспериментального подтверждения наличия данной зависимости были проведены эксперименты с асимметричными пучками Бесселя–Гаусса с параметрами  $c = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ , аналогичные показанным на рис. 5 и 6. Экспериментально измеренная эффективность формирования данных пучков совпадала в пределах погрешности используемого измерителя мощности. В табл. 2 приведены данные об экспериментально измеренных скоростях движения захваченных микросфер полистирола для каждого из сформированных пучков.

Табл. 2. Экспериментально измеренные значения скоростей движения полистироловых микросфер  $v$ , захваченных с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с одним и тем же топологическим зарядом  $n = 3$ , но с разными значениями параметра асимметрии  $c$

$c$	$v$ , мкм/с
1,0	$13,6 \pm 0,9$
1,5	$15,3 \pm 1,8$
2,0	$17,5 \pm 2,6$
2,5	$17,7 \pm 2,8$
3,0	$19,0 \pm 2,8$

А в табл. 3 – 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 асимметричных пучков Бесселя–Гаусса 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	$1,1 \pm 0,2$
2,0	$1,3 \pm 0,2$
2,5	$1,3 \pm 0,2$
3,0	$1,4 \pm 0,2$

На рис. 7 представлена зависимость отношения экспериментально измеренных скоростей движения микросфер полистирола, захваченных с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с различными значениями параметра  $c$  от значения данного параметра.

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 (5) не учитывает такие факторы, как броуновское движение частиц, вязкость жидкости, градиентные и прочие силы, которые влияют на результаты измерения скорости микрочастиц.

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.

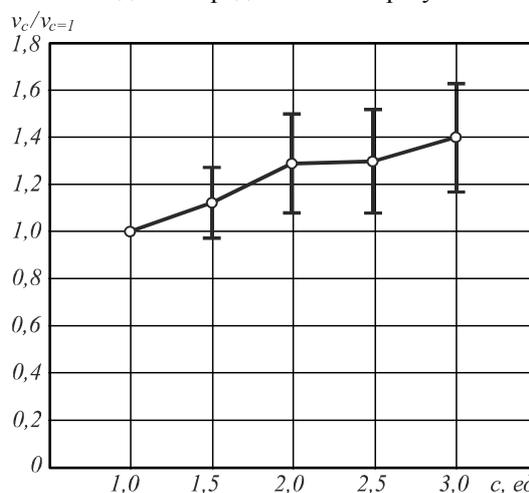


Рис. 7. Зависимость отношения экспериментально измеренных скоростей движения микросфер полистирола, захваченных с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с различными значениями параметра  $c$  от значения данного параметра ( $n = 3$ )

### Заключение

В работе экспериментально доказан близкий к линейному рост величины удельного орбитального углового момента лазерных асимметричных пучков Бесселя–Гаусса, предсказанный теоретически ранее в [1–4]. Для этого были проведены исследования по оптическому захвату, вращению и перемещению слабопоглощающих полистироловых шариков диаметром 5 мкм с помощью лазерных асимметричных пучков Бесселя–Гаусса с линейной поляризацией и длиной волны 532 нм, сформированных отражающим фазовым жидкокристаллическим микродисплеем и сфокусированных микрообъективом с числовой апертурой 0,85 в водный раствор этих микрочастиц. 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 увеличи-

лась 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), и грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 16-29-11698, и 15-47-02492

### Литература

1. **Котляр, В.В.** Бездифракционные асимметричные элегантные пучки Бесселя с дробным орбитальным угловым моментом / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 4-10.
2. **Kotlyar, V.V.** Asymmetric Bessel modes / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(8). – P. 2395-2398.
3. **Котляр, В.В.** Вращающиеся элегантные пучки Бесселя–Гаусса / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 162-170.
4. **Kotlyar, V.V.** Asymmetric 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.
5. **Gong, L.** Observation of the asymmetric Bessel beams with arbitrary orientation using a digital micromirror device /

- L. Gong, X.-Z. Qiu, Y.-X. Ren, H.-Q. Zhu, W.-W. Liu, J.-H. Zhou, M.-C. Zhong, X.-X. Chu, Y.-M. Li // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(22). – P. 26763-26776.
6. **Sheppard, C.J.R.** Two-dimensional complex source point solutions: application to propagationally invariant beams optical fiber modes, planar waveguides, and plasmonic devices / C.J.R. Sheppard, S.S. Kou, J. Lin // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(12). – P. 2674-2679.
7. **Bouchal, Z.** Non-diffractive vector Bessel beams / Z. Bouchal, M. Olivik // Journal of Modern Optics. – 1995. – Vol. 42(8). – P. 1555-1566.
8. **Yu, Y.Z.** Vector analysis of nondiffracting Bessel beams / Y.Z. Yu, W.B. Dou // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2008. – Vol. 5. – P. 57-71.
9. **Schafer, F.P.** On some properties of axicons / F.P. Schafer // Applied Physics B. – 1986. – Vol. 39. – P. 1-8.
10. **Rykov, M.A.** Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap / M.A. Rykov, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53(2). – P. 156-164.
11. **Kotlyar, V.V.** Tight focusing of an asymmetric Bessel beam / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.P. Porfirev // Optics Communications. – 2015. – Vol. 357. – P. 45-51.
12. **Gori, F.** Bessel-Gauss beams / F. Gori, G. Guattari, C. Padovani // Optics Communications. – 1987. – Vol. 64. – P. 491-495.
13. **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.

### Сведения об авторах

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики СГАУ, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование.

E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

**Ковалёв Алексей Андреевич**, 1979 года рождения, в 2002 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2012 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН. В списке научных работ более 80 статей. Область научных интересов: математическая теория дифракции, фотонно-кристаллические устройства. E-mail: [alanko@smr.ru](mailto:alanko@smr.ru).

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** см. стр. 145 этого номера.

Поступила в редакцию 2 февраля 2016 г. Окончательный вариант – 4 апреля 2016 г.

## OPTICAL TRAPPING AND MOVING OF MICROPARTICLES USING ASYMMETRICAL BESSEL-GAUSSIAN BEAMS

A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, A.A. Kovalev<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute,

Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,

<sup>2</sup> Samara State Aerospace University, Samara, Russia

### Abstract

We study the optical trapping, rotating and moving of 5- $\mu\text{m}$  polystyrene microspheres in asymmetrical crescent-shaped Bessel-Gaussian laser beams that carry the orbital angular momentum. The beams are generated by a liquid crystal microdisplay and focused by a microobjective with a numerical aperture of  $\text{NA} = 0.85$ . It is shown experimentally that while the topological charge of the beam remains unchanged, an increasing asymmetry of the beam causes a near-linear increase in the micro-particles velocity. This serves to confirm that the orbital angular momentum (OAM) of the beam depends in a linear manner on the beam's asymmetry. The use of crescent-shaped beams can reduce the thermal exposure of biological objects during optical micromanipulation.

**Keywords:** optical trapping, spatial light modulators, laser beam shaping, asymmetrical Bessel-Gaussian beam, orbital angular momentum.

**Citation:** Porfirev AP, Kovalev AA, Kotlyar VV. Optical trapping and moving of microparticles using asymmetrical Bessel-Gaussian beams. *Computer Optics* 2016; 40(2): 152-7. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.

**Acknowledgements:** The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, RF Presidential grant for support of leading scientific schools (NSH-9498.2016.9), and Russian Foundation of Basic Research grants ##14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 16-29-11698, and 15-47-02492.

### References

- [1] Kotlyar VV, Kovalev AA, Soifer VA. Diffraction-free asymmetric elegant Bessel beams with fractional orbital angular momentum. *Computer Optics* 2014; 38(1): 4-10.
- [2] Kotlyar VV, Kovalev AA, Soifer VA. Asymmetric Bessel modes. *Optics Letters* 2014; 39(8): 2395-2398.
- [3] Kotlyar VV, Kovalev AA, Skidanov RV, Soifer VA. Rotating elegant Bessel-Gaussian beams. *Computer Optics* 2014; 38(2): 162-170.
- [4] Kotlyar VV, Kovalev AA, Skidanov RV, Soifer VA. Asymmetric Bessel-Gauss beams. *Journal of the Optical Society of America A* 2014; 31(9): 1977-1983.
- [5] Gong L, Qiu XZ, Ren YX, Zhu HQ, Liu WW, Zhou JH, Zhong MC, Chu XX, Li YM. Observation of the asymmetric Bessel beams with arbitrary orientation using a digital micromirror device. *Optics Express* 2014; 22(22): 26763-26776.
- [6] Sheppard CJR, Kou SS, Lin J. Two-dimensional complex source point solutions: application to propagationally invariant beams, optical fiber modes, planar waveguides, and plasmonic devices. *Journal of the Optical Society of America A* 2014; 31(12): 2674-2679.
- [7] Bouchal Z, Olivik M. Non-diffractive vector Bessel beams. *Journal of Modern Optics* 1995; 42(8): 1555-1566.
- [8] Yu YZ, Dou WB. Vector analysis of nondiffracting Bessel beams. *Progress In Electromagnetics Research Letters* 2008; 5: 57-71.
- [9] Schafer FP. On some properties of axicons. *Applied Physics B* 1986; 39: 1-8.
- [10] Rykov MA, Skidanov RV. Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap. *Applied Optics* 2014; 53(2): 156-164.
- [11] Kotlyar VV, Stafeev SS, Porfirev AP. Tight focusing of an asymmetric Bessel beam. *Optics Communications* 2015; 357: 45-51.
- [12] Gori F, Guattari G, Padovani C. Bessel-Gauss beams. *Optics Communications* 1987; 64: 491-495.
- [13] Goorden SA, Bertolotti J, Mosk AP. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device. *Optics Express* 2014; 22: 17999-18009.

### Authors' information

**Alexey Petrovich Porfirev** (b. 1987) graduated (2010) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Physics and Mathematics. Candidate in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor in Technical Cybernetics department of SSAU and a researcher in Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). His current research interests include diffractive optics and optical manipulation.

**Alexey Andreevich Kovalev** (b. 1979), graduated (2002) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths degree (2012). He is a senior researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). He is co-author of more than 80 scientific papers. Research interests are mathematical diffraction theory, photonic crystal devices.

The information about author **Victor Victorovich Kotlyar** you can find on page 146 of this issue.

*Received February 2, 2016. The final version – April 4, 2016.*