

# ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ПЕРЕДАЧА ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА АСИММЕТРИЧНЫХ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА–ГАУССА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МИКРОЧАСТИЦАМ

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

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

### Аннотация

С помощью недавно открытых асимметричных лазерных пучков Лагерра–Гаусса осуществлён захват и передача орбитального углового момента диэлектрическим микрочастицам. При этом экспериментально показано, что при постоянном топологическом заряде и увеличивающемся параметре асимметрии пучка возрастает скорость движения полистироловых шариков при их движении по траектории в форме полумесяца.

**Ключевые слова:** теория дифракции, оптические вихри, распространение в пространстве, оптическая ловушка, орбитальный угловой момент, пучок Лагерра–Гаусса, асимметрия лазерного пучка, комплексное смещение.

**Цитирование:** Ковалёв, А.А. Передача орбитального углового момента асимметричных пучков Лагерра–Гаусса диэлектрическим микрочастицам / А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 305-311. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-305-311.

### Введение

Моды Лагерра–Гаусса (ЛГ) являются точным решением параксиального уравнения Гельмгольца и представляют собой световые поля с радиально-симметричной формой поперечного сечения, не меняющейся при распространении в пространстве. Моды ЛГ нашли применение в таких областях, как оптическое манипулирование микрообъектами, квантовая оптика, оптические коммуникации. Несмотря на большое количество публикаций о модах ЛГ, их свойства исследуются до сих пор [1–9]. Так, в [1] формируются суперпозиции мод ЛГ в виде массивов одиночных или парных тёмных пятен, расположенных на световых кольцах. В [2] исследуется физический смысл радиального индекса мод ЛГ, а в [3] – их острая фокусировка. В [4] рассматривается непараксиальное распространение мод ЛГ в присутствии апертуры, а в [5] – свойства световых полей, обладающих ОУМ и не имеющих радиальной симметрии, в присутствии гармонического потенциала. В [6] предлагается метод формирования мод ЛГ в резонаторе твёрдотельного лазера. В [7] показано, что при использовании моды ЛГ вместо обычного Гауссова пучка уменьшается доплеровская ширина линии в спектре поглощения атомов рубидия-85 и рубидия-87, а в [8] рассматривается применение мод ЛГ для уменьшения влияния теплового шума в детекторах гравитационных волн. В [9] исследуется использование мод ЛГ для организации спин-орбитального взаимодействия в ультрахолодных атомах.

Наряду с изучением пучков ЛГ, продолжают исследования применимости различных видов лазерных пучков для оптического управления микрообъектами.

В [10] предложена оптическая ловушка одновременно прозрачных и поглощающих частиц в воздухе с помощью одного структурированного лазерного пучка. В [11] сравнивается стабильность оптических

ловушек на основе встречных и четверных (quadruple) пучков Бесселя (пар встречных пучков, распространяющихся перпендикулярно друг другу) и показано преимущество последних. В работе [12] мода Лагерра–Гаусса используется для создания канала транспортировки атомов, покидающих магнитооптическую ловушку, на расстояние 30 см. По сравнению со свободно распространяющимся атомным пучком его расходимость была уменьшена с 40 до 3 мрад.

В [13, 14] с помощью комплексного смещения получены асимметричные бездифракционные моды Бесселя и Бесселя–Гаусса, а в работе [15] с их помощью осуществлён захват и перемещение полистироловых микрошариков. В работе [16] аналогично, пользуясь приёмом комплексного смещения в декартовых координатах, теоретически и экспериментально исследуются асимметричные пучки ЛГ. Подобно стандартным пучкам ЛГ, их распределение интенсивности в поперечной плоскости состоит из конечного числа световых колец, но распределение интенсивности на кольцах неравномерное. При больших параметрах асимметрии пучок имеет форму полумесяца, который при распространении вращается. Пучки в виде полумесяца используются для оптического захвата и перемещения живых клеток без их теплового повреждения [17]. Аналитически рассчитан нормированный орбитальный угловой момент (ОУМ) пучка ЛГ. Он линейно зависит от топологического заряда пучка и квадратично зависит от параметра асимметрии. В данной работе получено выражение для плотности ОУМ асимметричных пучков ЛГ. С помощью оптического захвата и перемещения полистироловых шариков диаметром 5 мкм в фокусе асимметричного пучка ЛГ доказано, что скорость движения шариков растёт при увеличении параметра асимметрии и постоянном топологическом заряде, причём скорость оказывается больше, чем в асимметричных пучках Бесселя–Гаусса [15].

**1. Свойства асимметричных пучков Лагерра–Гаусса**

При распространении в свободном пространстве на произвольном расстоянии  $z$  комплексная амплитуда смещённого пучка ЛГ имеет вид:

$$E(x, y, z) = \frac{w(0)}{w(z)} \left[ \frac{\sqrt{2}}{w(z)} \right]^n \times \times [(x-x_0) + i(y-y_0)]^n L_m^n \left[ \frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right] \times \times \exp \left[ -\frac{\rho^2}{w^2(z)} + \frac{ik\rho^2}{2R(z)} - i(n+2m+1)\zeta(z) \right], \tag{1}$$

где

$$\rho^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2, w(z) = w \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2}, R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_R}{z} \right)^2 \right], \zeta(z) = \arctan \left( \frac{z}{z_R} \right), \tag{2}$$

где  $(x, y, z)$  и  $(r, \phi, z)$  – декартовы и цилиндрические координаты,  $(x_0, y_0)$  – комплексные координаты смещения центра пучка ЛГ,  $w$  – радиус перетяжки Гауссова пучка,  $n$  – топологический заряд оптического вихря,  $L_m^n(x)$  – присоединённый многочлен Лагерра,  $z_R = kw^2/2$  – расстояние Рэлея,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число света с длиной волны  $\lambda$ . В поперечном сечении интенсивность такого пучка не имеет радиальной симметрии, как у обычных пучков ЛГ [18]. Степень асимметрии зависит от параметров  $x_0/w$  и  $y_0/w$ . На рис. 1 показаны распределения интенсивности в плоскости  $z=0$  для аЛГ-пучков при следующих параметрах: длина волны  $\lambda = 532$  нм, радиус перетяжки  $w = 2\lambda$ , индекс пучка  $(m, n) = (3, 5)$ , поперечные смещения  $x_0 = 0,01wi$  и  $y_0 = 0,01wi$  (рис. 1а),  $x_0 = 0,05wi$  и  $y_0 = 0,05wi$  (рис. 1б),  $x_0 = 0,1wi$  и  $y_0 = 0,1wi$  (рис. 1в),  $x_0 = 0,2wi$  и  $y_0 = 0,2wi$  (рис. 1г),  $x_0 = 0,5wi$  и  $y_0 = 0,5wi$  (рис. 1д),  $x_0 = 2wi$  и  $y_0 = 2wi$  (рис. 1е). Размер расчётной области равен  $2R$ , где  $R = 10\lambda$ .

Из рис. 1 видно, что все эти пучки имеют разный вид – почти радиально симметричные световые кольца на рис. 1а, световой полумесяц, окружённый периферийными кольцами (на рис. 1б и в) полумесяц с разорванными периферийными кольцами (рис. 1г), полумесяц без периферийных колец (рис. 1д) и эллиптическое световое пятно (рис. 1е).

Проекция ОУМ на ось  $z$  смещённого пучка Лагерра–Гаусса (остальные проекции для параксиальных пучков равны нулю) удобно искать через угловой спектр плоских волн:

$$J_z = -i\lambda^2 \iint_{\mathbb{R}^2} A^* \frac{\partial A}{\partial \theta} \rho d\rho d\theta. \tag{3}$$

Для пучка ЛГ (1), смещённого на расстояния  $x_0$  и  $y_0$  вдоль координат  $x$  и  $y$ , выражение для углового спектра плоских волн имеет вид:

$$A(\rho, \theta) = C_0 \rho^n \exp \left[ -\frac{(k\rho)^2}{4} + in\theta \right] \times \times L_m^n \left[ \frac{(k\rho)^2}{2} \right] \exp \left[ -ik\rho(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \right]. \tag{4}$$

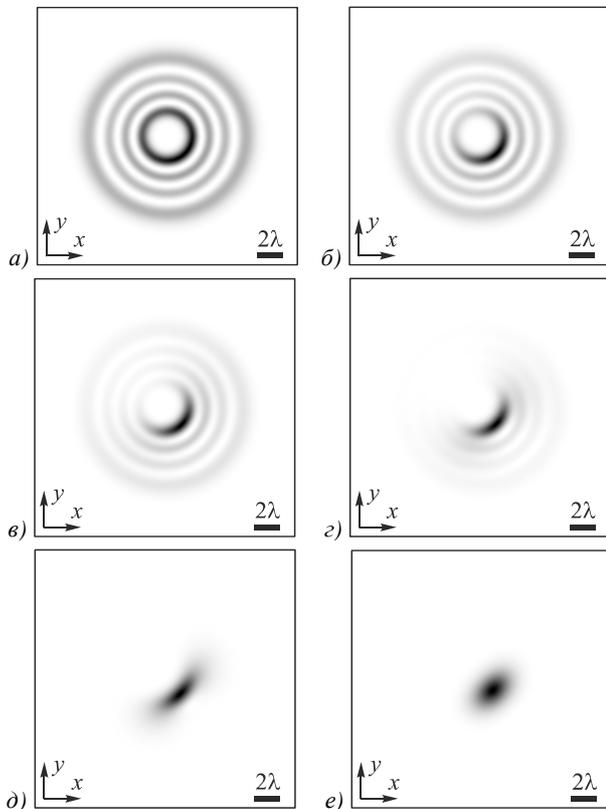


Рис. 1. Распределения интенсивности в плоскости  $z = 0$  для асимметричных пучков ЛГ при следующих параметрах: длина волны  $\lambda = 532$  нм, радиус перетяжки  $w = 2\lambda$ , индекс пучка  $(m, n) = (3, 5)$ , поперечные смещения  $x_0 = 0,01wi$  и  $y_0 = 0,01wi$  (а),  $x_0 = 0,05wi$  и  $y_0 = 0,05wi$  (б),  $x_0 = 0,1wi$  и  $y_0 = 0,1wi$  (в),  $x_0 = 0,2wi$  и  $y_0 = 0,2wi$  (г),  $x_0 = 0,5wi$  и  $y_0 = 0,5wi$  (д),  $x_0 = 2wi$  и  $y_0 = 2wi$  (е)

Подставим (4) в (3) и получим:

$$J_z = nW + \frac{2 \operatorname{Im}(x_0^* y_0)}{w^2} \times \times \left[ \frac{L_m^1 \left( -\frac{2D_0^2}{w^2} \right)}{L_m \left( -\frac{2D_0^2}{w^2} \right)} + \frac{L_{m+n}^1 \left( -\frac{2D_0^2}{w^2} \right)}{L_{m+n} \left( -\frac{2D_0^2}{w^2} \right)} - 1 \right] W, \tag{5}$$

где

$$D_0 = \sqrt{(\operatorname{Im} x_0)^2 + (\operatorname{Im} y_0)^2}. \tag{6}$$

Мощность  $W$  в (5) выражается через амплитуду спектра плоских волн в виде:

$$W = \iint_{\mathbb{R}^2} E^* E dx dy = \lambda^2 \iint_{\mathbb{R}^2} A^* A d\alpha d\beta, \tag{7}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – декартовы координаты в спектральной плоскости.

Подставив в (7) выражение (4), получим:

$$W = \frac{\pi w^2 (m+n)!}{2 m!} \times \exp\left(\frac{2D_0^2}{w^2}\right) L_{m+n}\left(-\frac{2D_0^2}{w^2}\right) L_m\left(-\frac{2D_0^2}{w^2}\right), \quad (8)$$

где  $L_m(\xi) = L_m^0(\xi)$ . В частном случае при смещении пучка на вещественные расстояния параметр  $D_0$  становится равным нулю и мощность (8) принимает значение  $[\pi w^2/2][(m+n)!/m!]$ , совпадающее с выражением из [18]. Из (5) видно, что нормированный ОУМ (ОУМ на один фотон)  $J_z/W$  не зависит от длины волны, а линейно зависит от топологического заряда  $n$  и произведения параметров асимметрии  $x_0/w$  и  $y_0/w$ . При  $|x_0/w|=|y_0/w|=c$  ОУМ в (5) зависит от квадрата параметра асимметрии  $c$ . Можно показать, что увеличение или уменьшение нормированного ОУМ полностью определяется знаком величины  $\text{Im}(x_0^* y_0)$ , так как выражение в квадратных скобках (5) всегда больше или равно 1. Заметим, что для всех пучков на рис. 1 нормированный ОУМ  $J_z/W$ , рассчитанный по формулам (5) и (8), должен быть равен 5. При численном расчёте с помощью интегралов (3) и (7) он оказался равен 4,999 (рис. 1а-з) и 4,998 (рис. 1д, е).

Можно также найти плотность ОУМ для аЛГ-пучка при  $m=0$  и  $x_0=aw, y_0=iaw$ :

$$j_z = \text{Im}\left\{E_{0n}^* \frac{\partial E_{0n}}{\partial \phi}\right\} = |E_{0n}(x, y, z)|^2 \left(n + kaw \frac{z_R x + zy}{z^2 + z_R^2}\right), \quad (9)$$

где  $a$  – параметр асимметрии,  $|E_{0n}(x, y, z)|^2$  – распределение интенсивности аЛГ-пучка (1). В отличие от полного ОУМ (5), который пропорционален квадрату параметра асимметрии  $a^2$ , плотность ОУМ (9) зависит от  $a$  линейно.

## 2. Экспериментальное исследование оптического захвата микрочастиц и передача им орбитального углового момента от асимметричного пучка Лагерра–Гаусса

Далее мы экспериментально покажем, что ОУМ, который аЛГ-пучок передает микрочастице и который пропорционален скорости движения микрочастицы, также почти линейно зависит от параметра асимметрии  $a$ . Схема эксперимента по манипуляции микрочастицами с помощью асимметричных пучков ЛГ с линейной поляризацией показана на рис. 2. Выходной пучок твердотельного лазера  $L$  ( $\lambda = 532$  нм, максимальная выходная мощность – 1500 мВт) расширялся с помощью системы, состоящей из микрообъектива  $MO_1$  ( $8\times, NA=0,3$ ) 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  $MO_2$  ( $40\times, NA=0,65$ ). Изображение плоскости манипулирования проецировалось на матрице 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  $P$ , радиус Гауссова пучка  $w = 1$  мм.

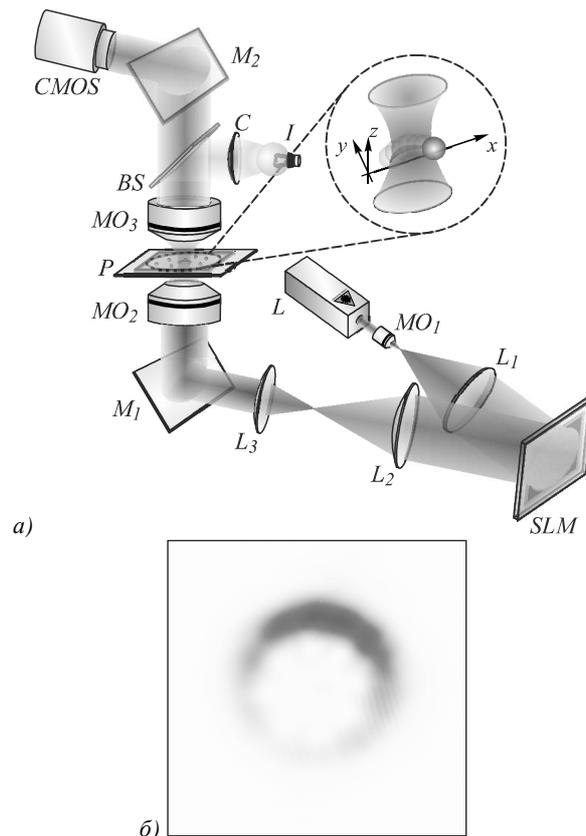


Рис. 2. Схема эксперимента для исследования передачи ОУМ микросферам полистирола с использованием асимметричных пучков ЛГ:  $L$  – твердотельный лазер ( $\lambda = 532$  нм, мощность – 1500 мВт),  $MO_1$  – микрообъектив ( $8\times, NA = 0,3$ ),  $L_1, L_2$  и  $L_3$  – линзы с фокусными расстояниями ( $f_1 = 250$  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 ( $40\times, NA = 0,65$ ),  $P$  – 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. Показан асимметричный пучок ЛГ (негатив) (б), сформированный SLM при следующих параметрах:  $w_0 = 1$  мм,  $n = 8$ ,  $x_0 = 0,2w_0$ ,  $y_0 = 0,2w_0i$ , размер кадра –  $2 \times 2$  мм

В зависимости от параметра комплексного смещения  $x_0$  сформированного асимметричного SLM пучка ЛГ в ходе экспериментов наблюдалось либо вращение

микросфер полистирола вдоль сформированного светового кольца с асимметричным распределением интенсивности (при значениях  $x_0 < 0,3w$ ), либо перемещение захваченных микросфер вдоль сформированной световой кривой в форме полумесяца (при значениях  $x_0 \geq 0,3w$ ). Когда частица движется по длинной траектории (при  $x_0 < 0,3w$ ), на неё действует сила, пропорциональная плотности ОУМ (9). А когда частица движется по короткой траектории (при  $x_0 \geq 0,3w$ ), на неё действует сила, которая пропорциональна усреднённому по траектории (полному) ОУМ (5).

Попав в область аЛГ-пучка, микросфера начинает испытывать действие силы, которая прямо пропорциональна ОУМ пучка. Под действием этой силы, а также силы, возникающей из-за градиента интенсивности, микросфера начинает двигаться равноускоренно вдоль сформированной световой кривой. Чем больше плотность ОУМ, тем большее ускорение получает микросфера при движении в аЛГ-пучке. При достижении равновесия сил, приводящих частицу в движение, и сил трения и сопротивления жидкости, действующих на микросферу, она перестаёт двигаться равноускоренно и начинает двигаться равномерно.

На рис.3 показаны кадры вращения трёх микрочастиц в фокусе асимметричного пучка ЛГ параметрами асимметрии  $x_0 = 0,1w = -iy_0$  ( $n = 3$ ). Средняя линейная скорость вращения частиц в пучке после установления равновесия всех сил равнялась  $0,45 \pm 0,02$  мкм/с (рис. 3).

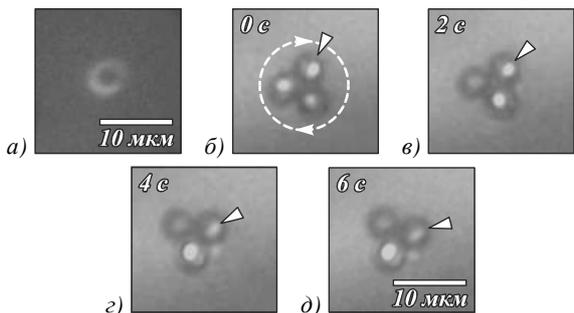


Рис. 3. Распределение интенсивности в области манипулирования (крайний левый кадр) и стадии движения трёх микросфер полистирола, захваченных с помощью асимметричного пучка Бесселя с параметрами  $n = 3, x_0 = 0, 1w = -iy_0$

Типичные результаты экспериментов с использованием асимметричных пучков ЛГ с параметром  $x_0 = 0,4w = -iy_0$  показаны на рис. 4.

Как видно, неподвижная микросфера полистирола, попав в область пучка, ускоряется и перемещается вдоль световой кривой, сформированной в плоскости захвата (средняя скорость перемещения равна  $0,84 \pm 0,04$  мкм/с). Следует отметить, что аЛГ-пучки формировались с помощью фазового модулятора SLM, от которого отражалась одинаковая часть энергии для пучков с разным параметром асимметрии  $a$ . Но только часть всей отражённой энергии попадала в область фокуса, где захватываются микросферы. Причем, чем больше асимметрия аЛГ-пучка, тем меньше энергии после модулятора попадает в область фокуса.

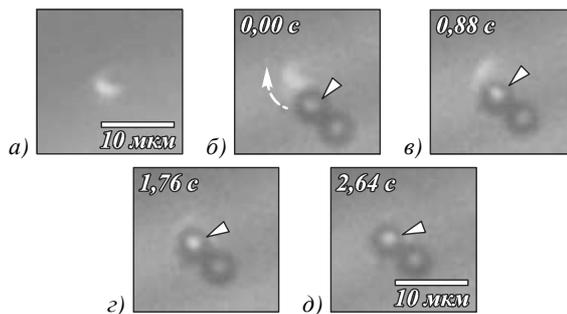


Рис. 4. Распределение интенсивности в области манипулирования (крайний левый кадр) и стадии движения микросферы полистирола, захваченной с помощью асимметричного пучка Бесселя с параметрами  $n = 3, x_0 = 0,4w = -iy_0$

Так, эффективность формирования аЛГ-пучка, представленного на рис. 4, в 1,8 раза меньше эффективности формирования пучка на рис. 3. И, тем не менее, скорость движения микросферы по более короткой траектории (рис. 4) почти в 2 раза больше, чем по длинной траектории (рис. 3).

В табл. 1 приведены рассчитанные значения отношения ОУМ пучков с различными параметрами  $x_0/w = -iy_0/w$  к ОУМ пучка с параметром  $x_0 = 0$  ( $n = 3$ ).

Табл. 1. Рассчитанные по формулам (5), (6) отношения нормированных ОУМ асимметричных пучков ЛГ с параметрами  $x_0/w = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  и  $0,5$  к ОУМ асимметричного пучка ЛГ с параметром  $x_0 = 0$  ( $n = 3$ )

$x_0/w = -iy_0/w$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$J_z / W  _{x_0}$						
$J_z / W  _{x_0=0}$	1,00	1,03	1,10	1,19	1,31	1,43

Для экспериментального подтверждения наличия данной зависимости были проведены эксперименты с асимметричными пучками ЛГ с теми же параметрами. Мы вычисляли скорость и ускорение микросферы, которое она приобретала спустя некоторое время  $t$  после начала движения до того момента, пока движение частицы ещё можно было рассматривать как равноускоренное. Во всех экспериментах время  $t$  было одинаковым. Табл. 2 показывает рост скорости, а табл. 3 – ускорения микросфер с ростом параметра асимметрии  $a = x_0/w$ .

Табл. 2. Экспериментально измеренные значения отношений величин скоростей движения полистироловых микросфер, захваченных с помощью асимметричных пучков ЛГ с одним и тем же топологическим зарядом  $n = 3$ , но с разными значениями параметра комплексного смещения  $x_0/w = -iy_0/w$

$x_0/w = -iy_0/w$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$v  _{x_0}$						
$v  _{x_0=0}$	1,0	1,2±0,2	1,3±0,2	1,4±0,2	1,8±0,3	1,9±0,3

Табл. 3. Экспериментально измеренные значения отношений величин ускорения полистироловых микросфер, захваченных с помощью асимметричных пучков ЛГ с одним и тем же топологическим зарядом  $n = 3$ , но с разными значениями параметра комплексного смещения  $x_0/w = -iy_0/w$

$x_0/w = -iy_0/w$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$\frac{a _{x_0}}{a _{x_0=0}}$	1,0	1,2±0,3	1,3±0,3	1,3±0,3	1,4±0,3	1,6±0,3

Показано, что нормированный ОУМ квадратично зависит от топологического заряда и параметра асимметрии пучка. Экспериментально показано, что скорости движения микрочастиц, захваченных в асимметричных пучках ЛГ, возрастают с ростом параметра симметрии при сохранении топологического заряда. Результаты расчёта (табл. 1) и эксперимента (табл. 2 и 3) согласуются.

Заметим, что интенсивность на световом полумесяце не постоянна (рис. 1б,в и 2б), поэтому на частицу действует градиентная сила, которая приводит сначала к ускорению при движении до точки с максимальной интенсивностью и к замедлению после её прохождения. В силу симметрии интенсивности относительно центра полумесяца ускорение и замедление компенсируют друг друга, поэтому градиентная сила не учитывалась при анализе экспериментальных результатов.

### Заключение

В данной работе получено выражение для плотности орбитального углового момента асимметричных лазерных пучков ЛГ. Показано, что нормированный ОУМ квадратично зависит от параметра асимметрии пучка, а плотность ОУМ – линейно. Экспериментально показано, что скорости движения микрочастиц, захваченных в асимметричных пучках ЛГ возрастают с ростом параметра симметрии при сохранении топологического заряда. Результаты расчёта (Таблица 1) и эксперимента (Таблицы 2 и 3) согласуются.

### 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, 15-47-02492, и 16-29-11698.

### Литература

- Huang, S. Composite vortex beams by coaxial superposition of Laguerre-Gaussian beams / S. Huang, Z. Miao, C. He, F. Pang, Y. Li, T. Wang // Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 78. – P. 132-139.
- Plick, W.N. Physical meaning of the radial index of Laguerre-Gauss beams / W.N. Plick, M. Krenn // Physical Review A. – 2015. – Vol. 92(6). – 063841.

- Савельев, Д.А. Особенности острой фокусировки вихревых пучков Гаусса-Лагерра / Д.А. Савельев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 654-662. – DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-5-654-662.
- Stilgoe, A.B. Energy, momentum and propagation of non-paraxial high-order Gaussian beams in the presence of an aperture / A.B. Stilgoe, T.A. Nieminen, H. Rubinsztein-Dunlop // Journal of Optics (United Kingdom). – 2015. – Vol. 17(12). – 125601 (12 p). – DOI:10.1088/2040-8978/17/12/125601.
- Zhang, Y. Anharmonic propagation of two-dimensional beams carrying orbital angular momentum in a harmonic potential / Y. Zhang, X. Liu, M. Belić, W. Zhong, F. Wen, Y. Zhang // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40. – P. 3786-3789.
- Kim, D.J. High-power TEM00 and Laguerre-Gaussian mode generation in double resonator configuration / D.J. Kim, J.W. Kim // Applied Physics B. – 2015. – Vol. 121(3). – P. 401-405.
- Das, B.C. Narrowing of Doppler and hyperfine line shapes of Rb - D2 transition using a vortex beam / B.C. Das, D. Bhattacharyya, S. De // Chemical Physics Letters. – 2016. – Vol. 644. – P. 212-218.
- Allocca, A. Higher-order Laguerre-Gauss interferometry for gravitational-wave detectors with in situ mirror defects compensation / A. Allocca, A. Gatto, M. Tacca, R.A. Day, M. Barsuglia, G. Pillant, C. Buy, G. Vajente // Physical Review D. – 2015. – Vol. 92(10). – 102002.
- Sun, K. Spin-orbital-angular-momentum coupling in Bose-Einstein condensates / K. Sun, C. Qu, C. Zhang // Physical Review A. – 2015. – Vol. 91(6). – 063627.
- Redding, B. Optical trap for both transparent and absorbing particles in air using a single shaped laser beam / B. Redding, Y. Pan // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40(12). – P. 2798-2801.
- Thanopoulos, I. Dynamics of submicron aerosol droplets in a robust optical trap formed by multiple Bessel beams / I. Thanopoulos, D. Luckhaus, T.C. Preston, R. Signorell // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115(15). – 154304.
- Carrat, V. Long-distance channeling of cold atoms exiting a 2D magneto-optical trap by a Laguerre-Gaussian laser beam / V. Carrat, C. Cabrera-Gutiérrez, M. Jacquy, J. Tabosa, B. Viaris de Lesegno, L. Pruvost // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(3). – P. 719-722.
- 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. – P. 1977-1983.
- Kotlyar, V.V. Asymmetric Bessel modes / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(8). – P. 2395-2398.
- 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.
- Ковалёв, А.А. Пучки Лагерра-Гаусса с комплексным смещением в декартовых координатах / А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, С.Г. Засканов, Д.С. Калинкина // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40. – № 1. – P. 5-11.
- 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. – P. 156-164.
- Kim, H.C. Hermite-Gaussian and Laguerre-Gaussian beams beyond the paraxial approximation / H.C. Kim, Y.H. Lee // Optics Communications. – 1999. – Vol. 169. – P. 9-16.

### Сведения об авторах

**Ковалёв Алексей Андреевич**, 1979 года рождения, в 2002 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2012 год), работает старшим научным со-

трудником лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» 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).

**Котляр Виктор Викторович**, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств.

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий ИСОИ РАН– филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование. E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

ГРПТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 5 апреля 2016 г. Окончательный вариант – 14 июня 2016 г.

## TRANSFER OF ORBITAL ANGULAR MOMENTUM FROM ASYMMETRIC LAGUERRE-GAUSSIAN BEAMS TO DIELECTRIC MICROPARTICLES

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

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,  
<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

### Abstract

Transfer of the orbital angular momentum to dielectric microparticles optically trapped using recently discovered asymmetric Laguerre-Gaussian (LG) laser beams is demonstrated. We experimentally show that at a fixed topological charge, increasing beam asymmetry parameter leads to increasing velocity of the polystyrene beads moving along a crescent-shaped path.

**Keywords:** diffraction theory, optical vortices, propagation, optical trap, orbital angular momentum, Laguerre-Gaussian beam, asymmetry of a laser beam, complex shift.

**Citation:** Kovalev AA, Kotlyar VV, Porfirev AP. Transfer of orbital angular momentum from asymmetric Laguerre-Gaussian beams to dielectric microparticles. *Computer Optics* 2016; 40(3): 305-11. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-305-311.

**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, 15-47-02492, and 16-29-11698.

### References

- [1] Huang S, Miao Z, He C, Pang F, Li Y, Wang T. Composite vortex beams by coaxial superposition of Laguerre-Gaussian beams. *Opt Las Eng* 2016; 78: 132-139.
- [2] Plick WN, Krenn M. Physical meaning of the radial index of Laguerre-Gauss beams. *Phys Rev A* 2015; 92(6): 063841.
- [3] Savelyev SA, Khonina SN. Characteristics of sharp focusing of vortex Laguerre-Gaussian beams. *Computer Optics* 2015; 39(5): 654-662. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-654-662.
- [4] Stilgoe AB, Nieminen TA, Rubinsztein-Dunlop H. Energy, momentum and propagation of non-paraxial high-order Gaussian beams in the presence of an aperture. *J Opt* 2015; 17(12): 125601. DOI:10.1088/2040-8978/17/12/125601.
- [5] Zhang Y, Liu X, Belić M, Zhong W, Wen F, Zhang Y. Anharmonic propagation of two-dimensional beams carrying orbital angular momentum in a harmonic potential. *Opt Lett* 2015; 40: 3786-3789.
- [6] Kim DJ, Kim JW. High-power TEM00 and Laguerre-Gaussian mode generation in double resonator configuration. *Appl Phys B* 2015; 121(3): 401-405.
- [7] Das BC, Bhattacharyya D, De S. Narrowing of Doppler and hyperfine line shapes of Rb - D2 transition using a vortex beam. *Chem Phys Lett* 2016; 644: 212-218.
- [8] Allocca A, Gatto A, Tacca M, Day RA, Barsuglia M, Pillant G, Buy C, Vajente G. Higher-order Laguerre-Gauss interferometry for gravitational-wave detectors with in situ mirror defects compensation. *Phys Rev D* 2015; 92(10): 102002.

- [9] Sun K, Qu C, Zhang C. Spin-orbital-angular-momentum coupling in Bose-Einstein condensates. *Phys Rev A* 2015; 91(6): 063627.
- [10] Redding B, Pan Y. Optical trap for both transparent and absorbing particles in air using a single shaped laser beam. *Opt Lett* 2015; 40(12): 2798-2801.
- [11] Thanopoulos I, Luckhaus D, Preston TC, Signorell R. Dynamics of submicron aerosol droplets in a robust optical trap formed by multiple Bessel beams. *J Appl Phys* 2014; 115(15): 154304.
- [12] Carrat V, Cabrera-Gutiérrez C, Jacquy M, Tabosa J, Viaris de Lesegno B, Pruvost L. Long-distance channeling of cold atoms exiting a 2D magneto-optical trap by a Laguerre-Gaussian laser beam. *Opt Lett* 2014; 39(3): 719-722.
- [13] Kotlyar VV, Kovalev AA, Skidanov RV, Soifer VA. Asymmetric Bessel–Gauss beams. *J Opt Soc Am A* 2014; 31: 1977-1983.
- [14] Kotlyar VV, Kovalev AA, Soifer VA. Asymmetric Bessel modes. *Opt Lett* 2014; 39(8): 2395-2398.
- [15] Porfirev AP, Kovalev AA, Kotlyar VV. Optical trapping and moving of microparticles by using the asymmetrical Bessel-Gaussian beams. *Computer Optics* 2016; 40(2): 152-157. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.
- [16] Kovalev AA, Kotlyar VV, Zaskanov SG, Kalinkina DS. Laguerre-Gaussian beams with complex shift in cartesian coordinates [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(1): 5-11.
- [17] Rykov MA, Skidanov RV. Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap. *Appl Opt* 2014; 53: 156-164.
- [18] Kim HC, Lee YH. Hermite–Gaussian and Laguerre–Gaussian beams beyond the paraxial approximation. *Opt Commun* 1999; 169: 9-16.

---

#### *Authors' information*

**Alexey Andreevich Kovalev** (b. 1979), graduated (2002) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths degree in 2012. He is a senior researcher of Laser Measurements laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. He is a co-author of more than 80 scientific papers. His current research interests are mathematical diffraction theory and photonic crystal devices.

**Victor Victorovich Kotlyar** is the head of a laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and a professor of Computer Science department at Samara National Research University. He graduated from Kuibyshev State University (1979), received his Candidate's and Doctor's Degrees in Physics & Mathematics from Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation of the RAS (1992). He is a co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current research interests include diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices.

**Alexey Petrovich Porfirev** (b. 1987) graduated (2010) from Samara National Research University, majoring in Applied Physics and Mathematics. He holds the Candidate's Degree in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor at Technical Cybernetics department of Samara National Research University and a researcher at Micro- and Nanotechnologies laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. His current research interests include diffractive optics and optical manipulation.

---

*Received April 5, 2016. The final version – June 14, 2016.*

---