

## МАНИПУЛЯЦИЯ МИКРООБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНЫХ ЛОВУШЕК, ФОРМИРУЕМЫХ ВИХРЕВЫМИ АКСИКОНАМИ

Скиданов Р.В., Порфирьев А.П., Ганчевская С.В.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

### Аннотация

Рассмотрен метод формирования линейных световых ловушек с помощью вихревых аксиконов. Представлены результаты эксперимента по захвату и перемещению полистироловых микрочастиц диаметром 5 мкм. Экспериментально подтверждена анизотропия силы захвата такой линейной ловушки.

**Ключевые слова:** линейная световая ловушка, вихревой аксикон, сортировка микрочастиц.

### Введение

Как показано в [1], основные тенденции в оптической микроманипуляции – это постоянное усложнение формы ловушек за счёт использования всё более сложных световых пучков.

Создание анизотропных по пространственным свойствам оптических ловушек – одна из важнейших задач в оптической микроманипуляции [2–8]. Такие ловушки создают силу захвата, которая зависит от направления перемещения захваченного микрообъекта. Чаще всего такие ловушки имеют форму вытянутой световой линии [3, 4, 6, 8]. Основные задачи таких ловушек – сортировка микрочастиц по размерам [4–7] или оптическим свойствам или перемещение вытянутых объектов, например, волокон [9, 11, 13]. В некоторых случаях рассматривается позиционирование наночастиц в вытянутые структуры [12].

Создаётся линейная ловушка либо с использованием излучения полупроводниковых лазеров [3, 4], либо с использованием цилиндрических линз [14], либо с использованием пространственных модуляторов света, которые опять же формируют фазовую функцию, близкую к фазовой функции цилиндрической линзы [8, 12]. В большинстве случаев создаётся световая ловушка в форме очень вытянутой линии [3, 4, 8, 12–14]. Для задач сортировки микрообъектов это хорошо, но если говорить о задаче перемещения вытянутых микрообъектов, то лучше формировать вытянутую ловушку, у которой отношение длины к ширине не превосходит 10. Дело в том, что вытянутые объекты редко бывают идеально прямыми, и световая ловушка в форме длинной линии энергетически неэффективна. Поэтому в качестве отдельной задачи выступает необходимость в формировании вытянутых ловушек с относительно небольшим отношением длины к ширине [15, 16]. Но в [15, 16] рассматриваются вытянутые световые ловушки, которые вдобавок имеют градиент фазы вдоль линии, т.е. частица, попавшая в такую ловушку, будет смещаться вдоль световой линии, что не всегда нужно. Причём в [16–18] рассматривается использование вихревых полей для формирования световых ловушек. В [16] интерференция двух вихревых полей даёт линейную ловушку. В [17] рассматривается модифицированный (логарифмический) аксикон для создания световых ловушек с новыми свойствами. В

[18, 19] рассматриваются эксперименты по манипуляции микрообъектами в вихревых пучках разных порядков, которые пространственно разделены. На основе объединения этих подходов можно создать ловушки нового типа, т.е. мы будем рассматривать суперпозицию нескольких вихревых пучков, которые распространяются по одной оси, а формируются модифицированным аксиконом [20].

### 1. Моделирование

Пучок формировался как суперпозиция пучков 2-го, 0-го, –2-го порядков с помощью ДОЭ, фаза которого представлена на рис. 1а [20]. Распределение интенсивности и фазовая функция, полученные в результате моделирования дифракции в дальней зоне, приведены на рис. 1б, в. Размер раstra изображения на рис. 1б, в составил 1 мм при фокусном расстоянии 600 мм.

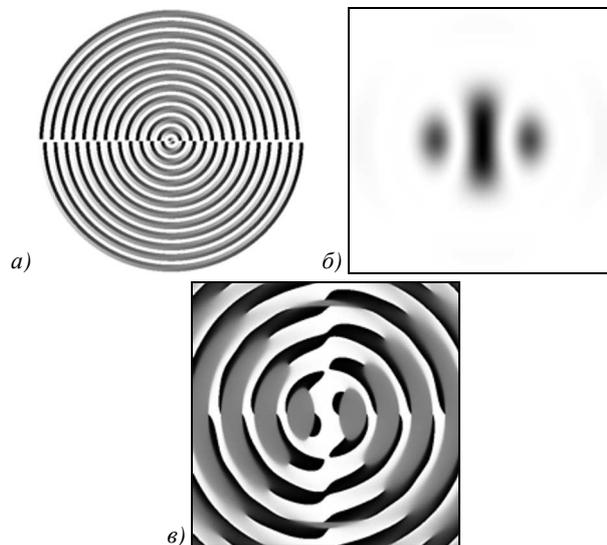


Рис. 1. Фазовая функция ДОЭ (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в)

Такой ДОЭ формирует распределение интенсивности, характеризующееся очень малой шириной по одной из координат. Рассмотрим сечения распределения интенсивности по горизонтальной и вертикальной координатам (рис. 2).

Ширина линии по полуспаду по горизонтальной координате намного уже, чем по вертикальной координате. При расчёте силы, действующей на сферический микрообъект, согласно методу, представленному

в [21], сила захвата микрообъекта, который будет двигаться вдоль горизонтальной оси, больше, чем сила захвата объекта, который будет двигаться в перпендикулярном направлении. Расчёт дал отношение этих сил, равное 3,7. Таким образом, можно осуществлять сортировку микрочастиц простым поворотом ловушки.

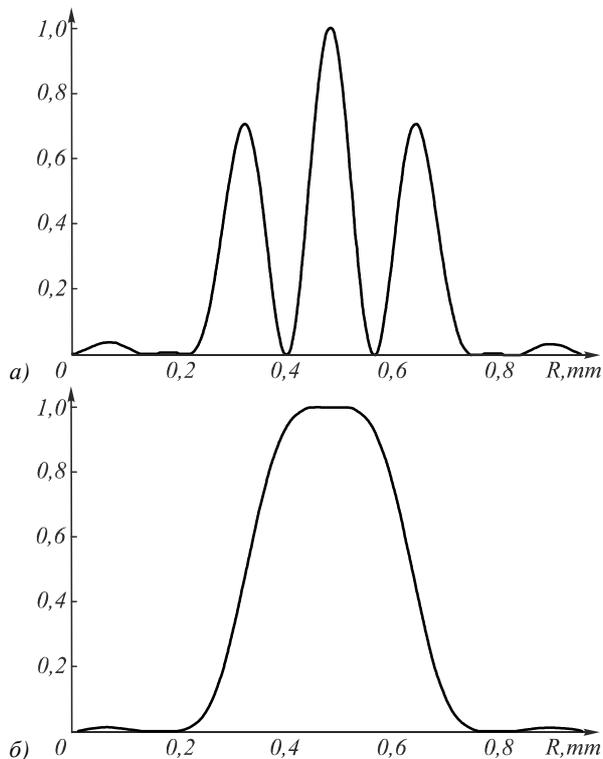


Рис. 2. Сечение распределения интенсивности по горизонтальной (а) и вертикальной (б) координате

## 2. Эксперимент

Путём добавления несущей частоты (10 лин/мм) был рассчитан бинарный аналог вихревого аксикона, фаза центральной части которого приведена на рис. 3.

Дифракционный оптический элемент диаметром 4 мм для проведения эксперимента был изготовлен методом фотолитографии на подложке из плавящего кварца. Для этого был выведен фотошаблон на станции лазерной записи, а затем осуществлено плазмохимическое травление на глубину 530 нм.

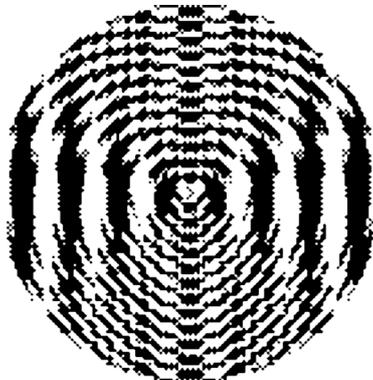


Рис. 3. Фазовая функция центральной части бинарного ДОЭ для формирования вихревого пучка с топологическими зарядами 2, 0, -2

Был проведён эксперимент, в ходе которого в одном из дифракционных порядков такого ДОЭ был сформирован вихревой пучок с топологическими зарядами 2, 0, -2. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 4. Затем этот пучок был сфокусирован на микрочастицах полистирола диаметром 5 мкм, расположенных внутри капли дистиллированной воды на поверхности стеклянной подложки. Целью проведения эксперимента было доказать различную силу захвата при разной ориентации ловушки относительно направления перемещения микрообъекта. Для эксперимента был использован лазер с максимальной средней мощностью 2 Вт. Для перемещения платформы с установленной на ней кюветой использовалась система из двух шаговых двигателей, которая позволяла перемещать платформу с шагом 0,5 мкм.

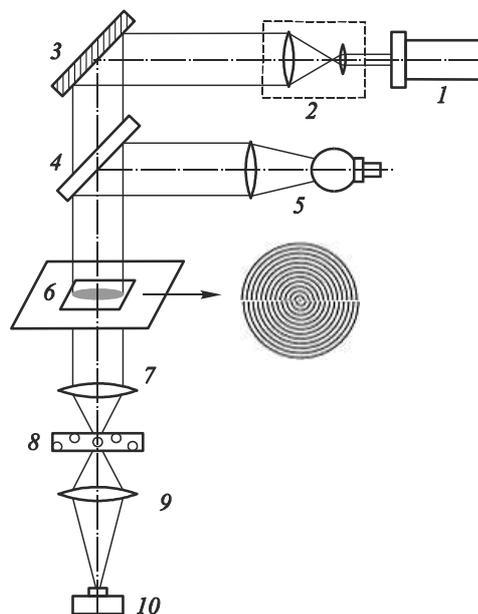


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микрообъектов в пучке. В оптической схеме введены обозначения: 1 – лазер с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 2 Вт; 2 – коллиматор; 3, 4 – поворотные зеркала; 5 – подсветка; 6 – аксикон; 7 – фокусирующий микробиообъектив (16×); 8 – подложка с микрочастицами; 9 – изображающий микробиообъектив (32×); 10 – CCD-камера

На рис. 5 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловой частицы диаметром 5 мкм, снятые с интервалом 2 с.

Как видно из рис. 5, сформированная линейная световая ловушка осуществляет стабильный захват (перемещение осуществляется под углом менее 90° к световой линии).

Для определения силы захвата световой ловушки был использован метод отрывных сил. За счёт программного задания скорости можно было её линейно увеличивать. Полистироловые микрочастицы диаметром 5 мкм захватывались световой ловушкой с распределением интенсивности, которое представлено на рис. 1б. Затем микрочастицы перемещались с постоянно увеличивающейся скоростью, сначала в

направлении, перпендикулярном световой линии, затем вдоль световой линии.

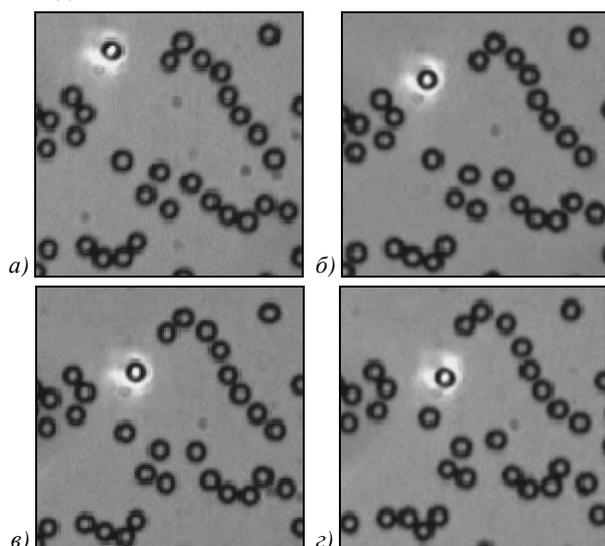


Рис. 5. Стадии процесса микроманипуляции полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

Для измерения скорости отрыва использовались два последних кадра, на которых микрочастица полистирола ещё находится в пучке (на следующем кадре микрочастица из пучка выходит). На рис. 6 графически изображён процесс расчёта скорости микрочастицы для перемещения в горизонтальном направлении (рис. 6а, б), и для перемещения в вертикальном направлении (рис. 6в, г). Частица 1 – это микрочастица, прилипшая ко дну, которая используется в качестве точки отсчёта. Частица 2 – это захваченная пучком микрочастица. На рис. 6 отмечены вертикальные и горизонтальные отрезки от захваченной микрочастицы 2 до микрочастицы 1. На рис. 6а, б видно существенное смещение по горизонтали (отмеченный горизонтальный отрезок на рис. 6б немного короче, чем на рис. 6а). На рис. 6в, г также видно небольшое смещение по вертикали (отмеченный вертикальный отрезок на рис. 6г немного короче, чем на рис. 6в). Затем скорость рассчитывалась, исходя из разницы длин этих отрезков и интервала времени между кадрами по формуле (1):

$$v_x = \frac{|x_2 - x_1|}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$v_y = \frac{|y_2 - y_1|}{\Delta t}.$$

Наличием небольших компонент  $v_y$  для рис. 6а, б и  $v_x$  для рис. 6в, г пренебрегаем.

Скорость отрыва частицы по горизонтальной координате составила 14,6 мкм/с, по вертикальной – 4 мкм/с, т. е. отношение силы захвата при перемещении по горизонтальной координате к силе захвата по вертикальной координате составляет 3,65. Это очень хорошо совпадает с результатами теоретического расчёта и доказывает возможность использования таких световых ловушек для сортировки микрочастиц.

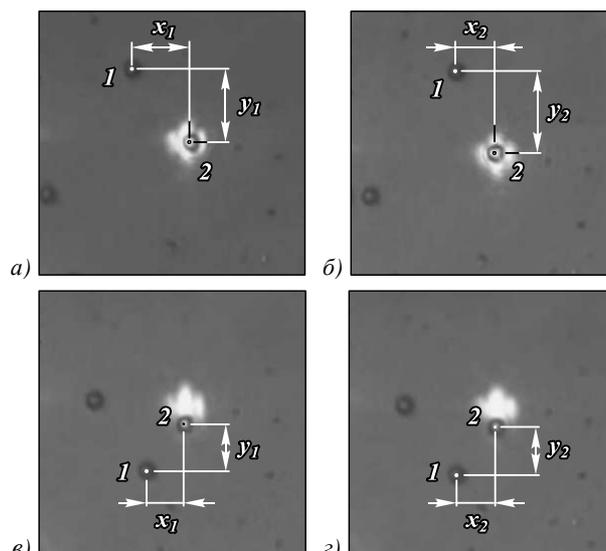


Рис. 6. Измерение скорости для вычисления соотношения отрывных сил захвата в линейной ловушке

### Заключение

Реализованный метод формирования линейных световых ловушек как суперпозиции вихревых пучков позволяет формировать вытянутые световые ловушки с анизотропной силой захвата, что допускает потенциальную возможность использования таких световых ловушек для сортировки микрообъектов. Использование линейных световых ловушек на основе суперпозиции вихревых пучков позволяет за счёт изменения порядка этих вихревых пучков получать линейные световые ловушки различной длины, а также с разным соотношением ширины и длины, что является преимуществом предложенного метода по сравнению с известными методами формирования линейных ловушек.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

### Литература

1. **Qiu, C.-W.** Engineering light-matter interaction for emerging optical manipulation applications / Cheng-Wei Qiu, D. Palima, A. Novitsky, D. Gao, W. Ding, S.V. Zhukovsky and J. Gluckstad // *Nanophotonics*. – 2014. – P. 1-21.
2. **Buican, T.N.** Automated single-cell manipulation and sorting by light trapping / T.N. Buican, M.J. Smyth, H.A. Crissman, G.C. Salzman, C.C. Stewart, J.C. Martin // *Applied Optics*. – 1987. – Vol. 26. – P. 5311-5316.
3. **Applegate, R.W.** Particle size limits when using optical trapping and deflection of particles for sorting using diode laser bars / R.W. Applegate, D.W.M. Marr, J. Squier, S.W. Graves // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17. – P. 16731-16738.
4. **Applegate Jr., R.W.** Microfluidic sorting system based on optical waveguide integration and diode laser bar trapping / R.W. Applegate Jr., J. Squier, T. Vestad, J. Oakley, D.W.M. Marr, P. Bado, M.A. Dugand, A.A. Said // *Lab Chip*. – 2006. – Vol. 6. – P. 422-426.
5. **MacDonald, M.P.** Microfluidic sorting in an optical lattice / M.P. MacDonald, G.C. Spalding, K. Dholakia // *Letters to Nature*. – 2003. – P. 426:421.

6. **Jakl, P.** Static optical sorting in a laser interference field / P. Jakl, T. Cizmar, M. Sery, P. Zemanek // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – P. 161110-161113.
7. **Brzobohaty, O.** Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a “tractor beam” / O. Brzobohaty, V. Karasek, M. Šiler, L. Chvatal, T. Čížmar, P. Zemanek // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 123-127.
8. **Tietjen, G.T.** An efficient method for the creation of tunable optical line traps via control of gradient and scattering forces / G.T. Tietjen, Y. Kong, R. Parthasarathy // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(14). – P. 10341-10348.
9. **Pauzauskie, P.J.** Optical trapping and integration of semiconductor nanowire assemblies in water / P.J. Pauzauskie, A. Radenovic, E. Trepagnier, H. Shroff, P. Yang, J. Iphardt // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 97-101.
10. **Borghese, F.** Radiation force and torque on optically trapped linear nanostructures / F. Borghese, P. Denti, R. Saija, M.A. Iati, O.M. Maragò // *Physical Review Letters*. – 2008. – P. 163903.
11. **Yu, T.** The manipulation and assembly of CuO nanorods with line optical tweezers / T. Yu, F.-C. Cheong, C.-H. Sow // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 15. – P. 1732-1736.
12. **Yan, Z.** Guiding Spatial Arrangements of Silver Nanoparticles by Optical Binding Interactions in Shaped Light Fields / Z. Yan, R.A. Shah, G. Chado, S.K. Gray, M. Pelton, N.F. Scherer // *ACS Nano*. – 2013. – Vol. 7(2). – P. 1780-1802.
13. **Biancaniello, P.L.** Line optical tweezers instrument for measuring nanoscale interactions and kinetics / P.L. Biancaniello, J.C. Crocker // *Review of Scientific Instruments*. – 2006. – V. 77. – P. 113702.
14. **Demergis, V.** High precision and continuous optical transport using a standing wave optical line trap / V. Demergis, E.L. Florin // *Optics Express*. – 2011. – V. 19 (21). – P. 20833-20848.
15. **Marchington, R.F.** Optical deflection and sorting of microparticles in a near-field optical geometry / R.F. Marchington, M. Mazilu, S. Kuriakose, V. Garces-Chavez, P.J. Reece, T.F. Krauss, M. Gu, K. Dholakia // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(6). – P. 3712-3726.
16. **Морозов, А.А.** Формирование светового поля для линейного перемещения микрообъекта // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)* – 2010. – № 4. – С. 232-237.
17. **Kotlyar, V.V.** Generating hypergeometric laser beams with a diffractive optical element / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, S.N. Khonina, J. Turunen // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47(32). – P. 6124-6133.
18. **Методы компьютерной оптики** / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, В.С. Соловьёв, Г.В. Успенъев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2003.,– 688 с.
19. **Скиданов, Р.В.** Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 14-21.
20. **Скиданов, Р.В.** Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 65-71.
21. **Скиданов, Р.В.** Расчёт силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 28. – С. 18-21.

## References

1. **Qiu, C.-W.** Engineering light-matter interaction for emerging optical manipulation applications / Cheng-Wei Qiu, D. Palima, A. Novitsky, D. Gao, W. Ding, S.V. Zhukovsky and J. Gluckstad // *Nanophotonics*. – 2014. – P. 1-21.
2. **Buican, T.N.** Automated single-cell manipulation and sorting by light trapping / T.N. Buican, M.J. Smyth, H.A. Crissman, G.C. Salzman, C.C. Stewart, J.C. Martin // *Applied Optics*. – 1987. – Vol. 26. – P. 5311-5316.
3. **Applegate, R.W.** Particle size limits when using optical trapping and deflection of particles for sorting using diode laser bars / R.W. Applegate, D.W.M. Marr, J. Squier, S.W. Graves // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17. – P. 16731-16738.
4. **Applegate Jr., R.W.** Microfluidic sorting system based on optical waveguide integration and diode laser bar trapping / R.W. Applegate Jr., J. Squier, T. Vestad, J. Oakey, D.W.M. Marr, P. Bado, M.A. Dugand, A.A. Said // *Lab Chip*. – 2006. – Vol. 6. – P. 422-426.
5. **MacDonald, M.P.** Microfluidic sorting in an optical lattice / M.P. MacDonald, G.C. Spalding, K. Dholakia // *Letters to Nature*. – 2003. – P. 426:421.
6. **Jakl, P.** Static optical sorting in a laser interference field / P. Jakl, T. Cizmar, M. Sery, P. Zemanek // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – P. 161110-161113.
7. **Brzobohaty, O.** Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a “tractor beam” / O. Brzobohaty, V. Karasek, M. Šiler, L. Chvatal, T. Čížmar, P. Zemanek // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 123-127.
8. **Tietjen, G.T.** An efficient method for the creation of tunable optical line traps via control of gradient and scattering forces / G.T. Tietjen, Y. Kong, R. Parthasarathy // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(14). – P. 10341-10348.
9. **Pauzauskie, P.J.** Optical trapping and integration of semiconductor nanowire assemblies in water / P.J. Pauzauskie, A. Radenovic, E. Trepagnier, H. Shroff, P. Yang, J. Iphardt // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 97-101.
10. **Borghese, F.** Radiation force and torque on optically trapped linear nanostructures / F. Borghese, P. Denti, R. Saija, M.A. Iati, O.M. Maragò // *Physical Review Letters*. – 2008. – P. 163903.
11. **Yu, T.** The manipulation and assembly of CuO nanorods with line optical tweezers / T. Yu, F.-C. Cheong, C.-H. Sow // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 15. – P. 1732-1736.
12. **Yan, Z.** Guiding Spatial Arrangements of Silver Nanoparticles by Optical Binding Interactions in Shaped Light Fields / Z. Yan, R.A. Shah, G. Chado, S.K. Gray, M. Pelton, N.F. Scherer // *ACS Nano*. – 2013. – Vol. 7(2). – P. 1780-1802.
13. **Biancaniello, P.L.** Line optical tweezers instrument for measuring nanoscale interactions and kinetics / P.L. Biancaniello, J.C. Crocker // *Review of Scientific Instruments*. – 2006. – V. 77. – P. 113702.
14. **Demergis, V.** High precision and continuous optical transport using a standing wave optical line trap / V. Demergis, E.L. Florin // *Optics Express*. – 2011. – V. 19 (21). – P. 20833-20848.
15. **Marchington, R.F.** Optical deflection and sorting of microparticles in a near-field optical geometry / R.F. Marchington, M. Mazilu, S. Kuriakose, V. Garces-Chavez, P.J. Reece, T.F. Krauss, M. Gu, K. Dholakia // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(6). – P. 3712-3726.
16. **Morozov, A.A.** Superposition of the light field for linear movement microobject // *Herald of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)*. – 2010. – Vol. 4. – P. 232-237. – (In Russian).
17. **Kotlyar, V.V.** Generating hypergeometric laser beams with a diffractive optical element / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev,

- R.V. Skidanov, S.N. Khonina, J. Turunen // *Applied Optics*. – 2008. – V. 47(32). – P. 6124-6133.
18. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* / D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, ed. by V.A. Soifer // New York. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 784 p.
19. **Skidanov, R.V.** Experimental study of the movement of dielectric balls in light beams with angular harmonics of high order / R.V. Skidanov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 2007. – Vol. 31(1). – P. 14-21. – (In Russian).
20. **Skidanov, R.V.** Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects / R.V. Skidanov, S.V. Ganchevskaya // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(1). – P. 65-71.
21. **Skidanov, R.V.** The calculation of the force of interaction of the light beam with micro particles of arbitrary form / R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2005. – Vol. 28. – P. 18-21. – (In Russian).

## MANIPULATION OF MICRO-OBJECTS USING LINEAR TRAPS GENERATED BY VORTEX AXICONS

*R.V. Skidanov, A.P. Porfirev, S.V. Ganchevskaya*  
*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,*  
*Samara State Aerospace University*

### Abstract

We present a method of forming linear optical traps using vortex axicons. Experimental results on trapping and guiding of polystyrene microparticles with a diameter of 5  $\mu\text{m}$  are discussed. Such a linear trap is experimentally shown to possess the capturing force anisotropy.

**Key words:** linear optical trap, vortex axicon, microparticle sorting.

### Сведения об авторах

Сведения об авторе **Скиданов Роман Васильевич** – см. стр. 618 этого номера.

Сведения об авторе **Порфирьев Алексей Петрович** – см. стр. 657 этого номера.



**Ганчевская София Владиславовна**, 1992 года рождения, в 2013 получила степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Автор двух научных статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

**Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya** (b. 1992) received his bachelor in Applied Mathematics and Physics (2013) in SSAU. She is coauthor of 2 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.

Поступила в редакцию 21 октября 2014 г.