

Формирование контурных оптических ловушек с помощью четырехканального жидкокристаллического фокусатора

А.В.Коробцов, С.П.Котова, Н.Н.Лосевский, А.М.Майорова, С.А.Самагин

Теоретически и экспериментально исследованы возможности и особенности формирования контурных оптических ловушек и динамического управления ими с помощью четырехканального жидкокристаллического модулятора. Реализованы ловушки в виде колец, эллипсов и С-образные. Продемонстрированы захват и удержание сформированными ловушками поглощающих микрообъектов.

Ключевые слова: оптические ловушки, микрообъекты, динамическое манипулирование, жидкокристаллические модуляторы, поглощающие частицы.

1. Введение

Использование многоэлементных фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) в схемах оптических пинцетов позволило существенно расширить возможности лазерного манипулирования. Обеспечивая возможность управления в реальном времени пространственными характеристиками световых полей с максимальной интенсивностью до нескольких Вт/см², ЖК ПВМС широко применяются для формирования и перестройки массивов ловушек разнообразной формы [1–3], для формирования световых ловушек сложных конфигураций, в том числе с вихревой компонентой [4–6]. Как правило, технология изготовления используемых модуляторов и управления ими достаточно сложна и, следовательно, их стоимость высока. При этом для ряда практически значимых задач применение таких фазовых модуляторов оказывается избыточным. В работах [7–9] нами предложен и исследован так называемый ЖК фокусатор (или четырехканальный ЖК модулятор), реализованный на основе скрещенных подложек цилиндрических модальных линз. У данного ЖК модулятора меньше управляющих контактов (всего 4) по сравнению с коммерческими, что снижает его возможности в плане формирования световых полей. Однако он обладает достаточными функциональными возможностями, хорошей энергетической эффективностью и более широким рабочим спектральным диапазоном, а существенно более простая конструкция и система управления делают его значительно дешевле. ЖК фокусатор позволяет формировать точечные оптические ловушки с контроли-

руемым положением в плоскости манипуляции и ловушки в виде светового отрезка с заданной ориентацией. Эксперименты по применению ЖК фокусатора в схеме оптического пинцета описаны в [10]. Были реализованы перемещение прозрачного диэлектрического микрообъекта по заданной траектории в форме квадрата точечной ловушкой, а также одновременный захват нескольких частиц и их поворот ловушкой в виде отрезка. Таким образом, показано, что для ряда практически значимых задач ЖК фокусатор может использоваться в качестве недорогой, технологически простой и компактной альтернативы коммерческим многоэлементным пространственным модуляторам света.

В настоящей работе рассматривается возможность использования ЖК фокусатора для формирования световых ловушек в виде колец, в центре которых интенсивность минимальна. Интерес к оптическим ловушкам такого вида, в первую очередь, связан с возможностью захвата непрозрачных объектов либо объектов с меньшим показателем преломления, чем у окружающей среды, а также с задачей минимизации воздействия излучения на захватываемые объекты. Эти особенности интересны для биомедицинских исследований и задач микромеханики.

Методы формирования распределений интенсивности в виде световых колец хорошо известны и весьма разнообразны. Такие распределения имеют моды Лагерра–Гаусса высших порядков [11–13], пучки Бесселя [14–17] и Эйри [18–20]. Подобные световые пучки могут формироваться с помощью астигматических преобразований, интерференционными методами, за счет использования аксиконов либо фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Известны эксперименты по оптическому манипулированию с использованием ловушек в виде световых колец, сформированных как стационарными ДОЭ [21], так и с помощью ЖК ПВМС [6, 22]. Тем не менее, с точки зрения применения таких ловушек для биомедицинских и микромеханических приложений, представляется актуальным создание компактных и недорогих систем оптической манипуляции. Отсюда и возникает задача исследования возможности формирования подобных световых ловушек и управления ими перестраиваемым ЖК фокусатором.

А.В.Коробцов, Н.Н.Лосевский, С.А.Самагин. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: korobtsov82@gmail.com

С.П.Котова, А.М.Майорова. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П.Королева (национальный исследовательский университет), Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; e-mail: kotova@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 25 июня 2014 г., после доработки – 3 сентября 2014 г.

2. Принцип действия ЖК фокусатора

Принцип действия ЖК фокусатора описывался нами ранее в [7–10]. Устройство представляет собой конструкцию из двух скрещенных подложек цилиндрических модальных ЖК линз (рис.1,а). На подложки наносятся прозрачные высокоомные покрытия (поверхностное сопротивление от 100 кОм/□ до единиц МОм/□) и низкоомные непрозрачные полосковые контакты. Подложки располагаются таким образом, чтобы их контактные электроды были перпендикулярны друг другу. Геометрия расположения контактов для верхнего и нижнего слоев с обозначением соответствующих амплитуд и фаз приложенных потенциалов представлена на рис.1,б. Между подложками находится слой нематического ЖК, толщина которого задается прокладками, а первоначальная планарная ориентация – нанесенными на подложки ориентирующими покрытиями. Как было показано в [7–9], практически значимые распределения фазовой задержки могут быть получены в режиме работы с малым модальным параметром, при котором влияние частоты на распределение напряжения становится пренебрежимо малым, и управление распределением напряжения осуществляется посредством амплитуды и фазы потенциалов. При этом эквипотенциальные линии распределения напряжения могут быть только эллиптического и параболического типов. Распределения напряжения с линиями в виде эллипсов, окружностей и параллельных прямых формируют фазовые профили в виде эллиптического и кругового конусов, а также поверхности цилиндрической линзы. Изменяя амплитуду и/или фазу приложенных к контактам потенциалов, можно управлять положением центров основания кругового и эллиптического конусов, ориентацией осей эллиптического конуса и его эксцентриситетом. Такие фазовые задержки позволяют реализовать точечные оптические ловушки с контролируемым положением в плоскости манипуляции [10], ловушки в виде отрезка с заданной ориентацией [10], а также так называемые контурные световые ловушки в виде колец и эллипсов, особенности формирования которых рассмотрены ниже.

Для экспериментального формирования световых полей использовались образцы перестраиваемого ЖК фокусатора с квадратными апертурами со сторонами 1 мм. Высокоомные покрытия на обеих подложках имели поверхностные сопротивления по 100 кОм/□. Планарная ориентация слоя ЖК (BL037, Merck) создавалась с помощью ориентирующих покрытий, толщина ЖК слоя задавалась фторопластовыми прокладками и составляла 10 мкм. Тип используемого ЖК определяет спектральный диапазон, в котором может происходить модуляция света. В нашем случае – это видимый и ближний ИК диапазоны.

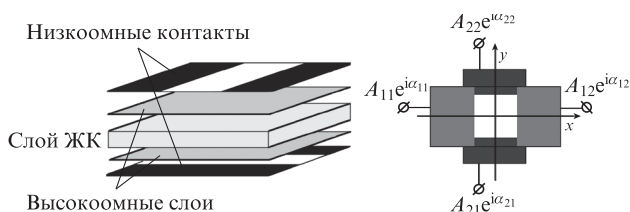


Рис.1. Структурная схема ЖК фокусатора (а) и геометрия расположения контактных электродов (б); A_{11} , A_{12} , α_{11} , α_{12} и A_{21} , A_{22} , α_{21} , α_{22} – амплитуды и фазы напряжений, прикладываемых к контактным электродам верхнего и нижнего слоев соответственно.

Управление ЖК фокусатором осуществлялось специализированным четырехканальным генератором синусоидальных колебаний, управляемым компьютером [8]. Частота управляющих потенциалов составляла 500 Гц.

3. Формирование контурных ловушек

3.1. Формирование ловушек в виде колец

Ранее [7, 9] нами были рассмотрены различные режимы работы ЖК фокусатора. Для формирования контурных ловушек подходящим является случай, когда профиль фазовой задержки перестраиваемого ЖК фокусатора имеет вид конической поверхности. Для реализации такого фазового пропускания будем рассматривать наиболее простой с практической точки зрения режим управления со стационарным сдвигом фаз потенциалов. При данном способе управления на контакты нужно подать потенциалы φ с разностью фаз π на каждой из подложек, при этом фазы потенциалов на разных подложках должны различаться на $\pi/2$: $\varphi_{11} = A_{11}e^0 = A_{11}$, $\varphi_{12} = A_{12}e^{i\pi} = -A_{12}$, $\varphi_{21} = A_{21}e^{i(3\pi/2)} = -iA_{21}$, $\varphi_{22} = A_{22}e^{i(\pi/2)} = iA_{22}$.

При этом амплитуды потенциалов связаны определенными соотношениями и фактически являются функциями амплитуды потенциала на одном из контактов (например, A_{11}), координат центра (x_0, y_0) системы колец или эллипсов и отношения длин осей (γ). Вид распределения напряжения и соответственно форма профиля фазовой задержки будут определяться амплитудами потенциалов. Для частного случая квадратной апертуры и $\gamma = 1$ при равенстве амплитуд всех потенциалов формируется распределение напряжения с эквипотенциальными линиями в виде концентрических окружностей с центром в точке с координатами $(0, 0)$. Значения потенциалов для формирования кольцевой ловушки представлены в табл.1. Из-за порогового характера вольт-фазной характеристики (ВФХ) ЖК профиль фазовой задержки имеет вид усеченного конуса. Это наглядно иллюстрируется на рис.2, где представлены распределения напряжения и фазовой задержки по апертуре фокусатора при потенциалах, указанных в табл.1. Визуализация фазовой задержки в эксперименте проводилась стандартным для ЖК элементов методом с помощью схемы со скрещенными поляроидами (поляризационный интерферометр). Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных поляризационных интерферограмм.

Оптический транспарант с таким фазовым пропусканием действует на плоскую однородную световую волну следующим образом. В дальней зоне формируется поле, у которого распределение интенсивности в плоскости xoy (перпендикулярной распространению света) имеет центральный максимум и побочные максимумы в виде системы концентрических колец [8]. В области дифракции Френеля на небольшом расстоянии от ЖК фокусатора распределение интенсивности светового поля принимает форму яркого кольца, т.е. точки с максимальной интенсивностью расположены на кривой, повторяющей форму

Табл.1. Амплитуды и фазы потенциалов для формирования кольцеобразной световой ловушки.

A_{11} (В)	α_{11} (град)	A_{12} (В)	α_{12} (град)	A_{21} (В)	α_{21} (град)	A_{22} (В)	α_{22} (град)
2	0	2	180	2	90	2	270

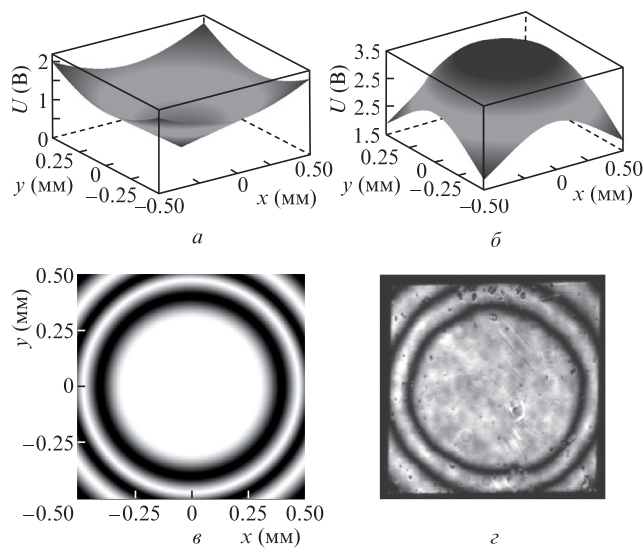


Рис.2. Распределения напряжения (а) и фазовой задержки (б) по апертуре фокусатора при потенциалах, указанных в табл.1, а также расчетная (в) и экспериментальная (з) поляризационные интерферограммы для данного случая.

эквипотенциальных линий профиля напряжения. Данное обстоятельство было нами использовано для формирования контурных ловушек различной формы. На рис.3 (верхняя строка) представлены распределения интенсивности света в различных плоскостях, рассчитанные в приближении Френеля с использованием быстрого преобразования Фурье. При моделировании во всех расчетах апертура считалась квадратной с размером стороны 1 мм. Результаты измерений распределения интенсивности света приведены в нижней строке рис. 3.

Приведенные распределения интенсивности наглядно демонстрируют, что, подавая на контакты ЖК фокусатора потенциалы, амплитуды и фазы которых связаны определенными соотношениями, можно создавать распределения фазовой задержки устройства в виде усеченного конуса и, таким образом, формировать в различных плоскостях световые кольца. Размеры кольца уменьшаются с увеличением расстояния от фокусатора, и в некоторой плоскости распределение интенсивности фокусируется в точечное пятно. При этом как размеры сформированного светового кольца, так и диапазон расстояний от фокусатора до плоскости формирования кольцевой ло-

вушки определяются размерами и формой конической поверхности фазовой задержки. Чем меньше угол раствора конуса, тем ближе к фокусатору формируется кольцо и тем меньше его радиус, а переход от кольца к точке происходит быстрее. Управлять размерами конической фазовой задержки можно, изменяя потенциалы на контактах.

3.2. Формирование ловушек в виде эллипсов

Рассмотренным выше способом можно получить и контурные световые ловушки в виде эллипсов. Для формирования такой ловушки профиль фазовой задержки должен иметь вид эллиптического усеченного конуса. Этого можно добиться, если в области апертуры фокусатора создать эквипотенциальные линии напряжения в виде эллипсов и соответственно получить фазовую задержку в виде эллиптического конуса. В рассматриваемом режиме управления со стационарным сдвигом фаз амплитуды потенциалов, приложенных к разным подложкам, не должны совпадать ($A_{11} \neq A_{21}$), при этом на каждой из подложек они должны оставаться равными ($A_{11} = A_{12}, A_{21} = A_{22}$). Требования к разности фаз те же, что и в случае кольцевой ловушки: на каждой из подложек разность фаз должна быть равна π , и при этом фазы потенциалов на разных подложках должны различаться на $\pi/2$ (см. табл.2 и соответствующие расчетные и экспериментальные интерферограммы на рис.4).

Как и в случае кольцевой ловушки, размеры эллипса будут меняться в зависимости от расстояния до фокусатора. Однако поскольку кривизна волнового фронта волны, прошедшей через ЖК фокусатор вдоль осей $0x$ и $0y$, различна, то и скорость изменения распределения интенсивности будет выше, чем для окружности.

3.3. Формирование С-образных ловушек

В работе [23] показано, что ловушки в виде полумесяца весьма эффективны для захвата биообъектов и имеют ряд преимуществ по сравнению с точечными ловушками. ЖК фокусатор обеспечивает возможность формирова-

Табл.2. Амплитуды и фазы потенциалов для формирования эллипсообразной световой ловушки.

A_{11} (В)	α_{11} (град)	A_{12} (В)	α_{12} (град)	A_{21} (В)	α_{21} (град)	A_{22} (В)	α_{22} (град)
2	0	2	180	3	90	3	270

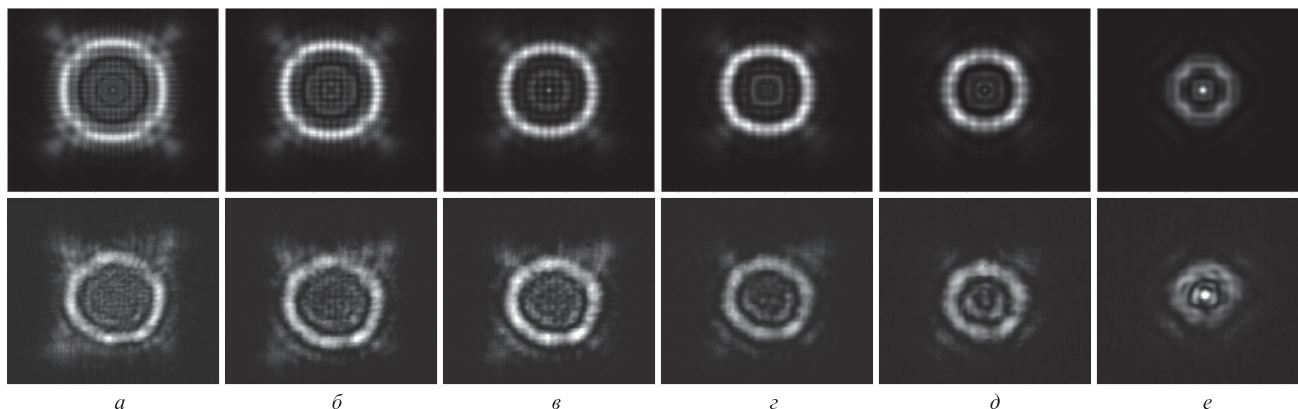


Рис.3. Результаты расчетов (верхний ряд) и измерений (нижний ряд) распределения интенсивности света при амплитудах потенциалов 2 В на расстояниях 2.5 (а), 3.0 (б), 3.5 (в), 4 (г), 5 (д) и 7 см (е).

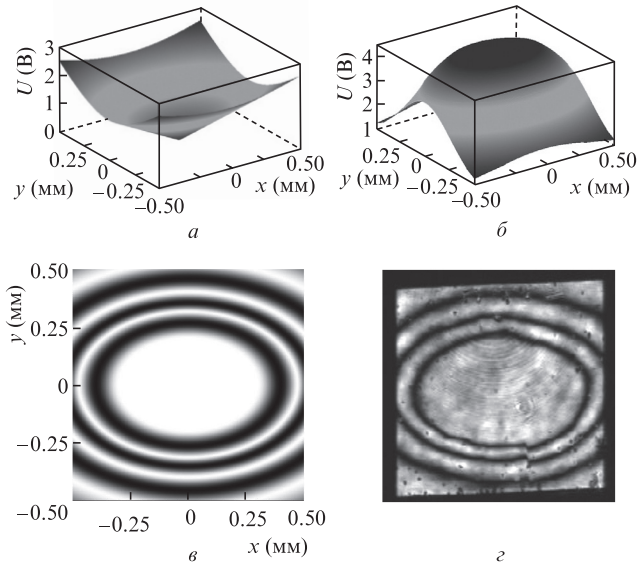


Рис.4. Распределения напряжения (*a*) и фазовой задержки (*b*) по апертуре фокусатора при потенциалах, указанных в табл.2, а также расчетная (*c*) и экспериментальная (*d*) поляризационные интерферограммы для данного случая.

ния подобных ловушек и управления ими, открывая тем самым новые возможности для оптического манипулирования.

Для формирования ловушки в виде дуги окружности или эллипса необходимо, чтобы линии постоянной фазы распределения фазовой задержки не были замкнуты в пределах апертуры (т.е. имели вид дуги окружности либо эллипса). Тогда в ближней от фокусатора зоне будет

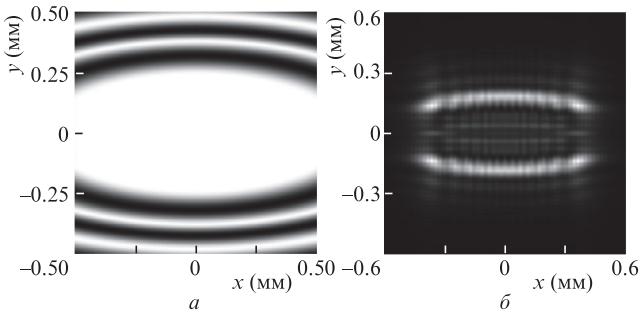


Рис.5. Поляризационная интерферограмма (*a*) и распределение интенсивности на расстоянии 3 см от ЖК фокусатора (*b*); амплитуды потенциалов на контактах: $A_{11} = A_{12} = 1$ В, $A_{21} = A_{22} = 2.5$ В.

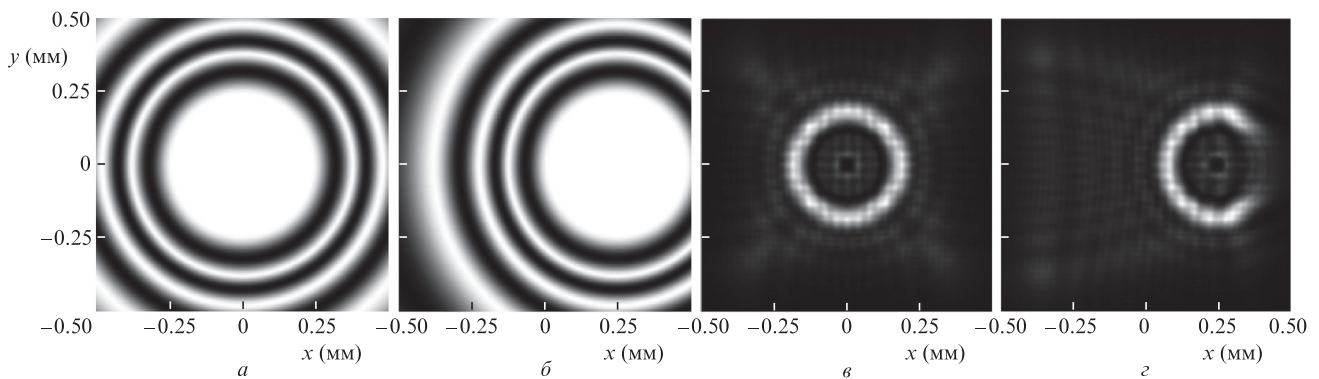


Рис.6. Поляризационные интерферограммы (*a*, *b*) и распределения интенсивности на расстоянии 3 см от ЖК фокусатора (*c*, *d*). Смещения распределений: $x_0 = y_0 = 0$ (*a*, *c*) и $x_0 = 0.25$ мм, $y_0 = 0$ (*b*, *d*).

формироваться распределение светового поля, в котором точки с максимальной интенсивностью расположены по контуру аналогичной кривой, т.е. в виде дуги окружности или эллипса. Такие ловушки будем называть С-образными световыми ловушками. Достичь незамкнутости линий постоянной фазы можно, например, за счет формирования фазового профиля в виде эллиптического конуса, размеры основания которого будут несколько больше размеров апертуры. Пример формирования такой ловушки приведен на рис.5. Подобная ловушка позволяет захватывать и удерживать объекты, минимизируя воздействие на них лазерного излучения.

Другим способом формирования незамкнутых линий постоянной фазы является смещение положения центра кругового либо эллиптического конуса. Если смещение распределения напряжения приводит к тому, что линии постоянной фазы профиля фазовой задержки оказываются незамкнутыми в пределах апертуры, будет формироваться С-образная ловушка (рис.6).

Такие ловушки могут быть полезны, в частности, для захвата непрозрачных микрообъектов внутрь кольца, позволяя частице войти в темную область и закрывая позади нее ловушку. Подобные эксперименты были реализованы нами и описаны в разд.5.

4. Динамическое управление контурными ловушками

4.1. Управление размерами ловушки

Очевидно, что размеры формируемой кольцевой ловушки будут зависеть от формы фазовой задержки, имеющей вид усеченного конуса, а именно от его ширины и глубины фазового прогиба, которой можно управлять, изменяя потенциалы на контактах ЖК фокусатора. ВФХ слоя нематического ЖК имеет нелинейный характер (рис. 7).

При увеличении амплитуды потенциалов на контактах перепад напряжения и соответственно фазовый прогиб будут возрастать, а угол раствора конуса – уменьшаться, при этом основание конуса останется неизменным. Это приведет к тому, что световое поле будет собираться в более узкое кольцо на том же расстоянии от фокусатора. При попадании амплитуд потенциалов на участок насыщения ВФХ основание конуса начнет уменьшаться, а значит уменьшатся расстояния, на которых будет формироваться распределение интенсивности в виде кольцевой ловушки.

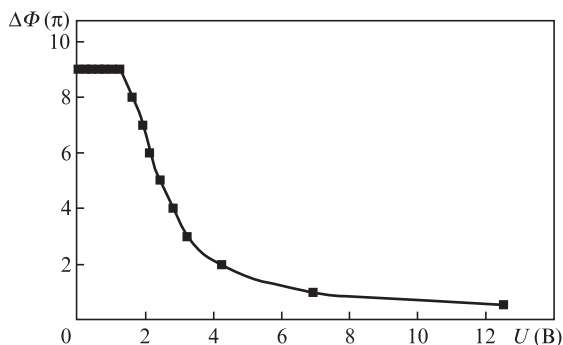


Рис.7. Зависимость фазовой задержки слоя ЖК от амплитуды напряжения для экспериментального образца ЖК фокусатора.

На рис.8 приведены результаты расчетов распределения интенсивности света на расстоянии 4 см от фокусатора при одновременном изменении амплитуд потенциалов на всех четырех контактах, которые демонстрируют возможность управления размерами кольца в заданной плоскости за счет соответствующего изменения потенциалов на контактах ЖК фокусатора. Видно, что увеличение амплитуды потенциалов приводит к уменьшению радиуса кольца. Соответствующие зависимости радиуса от напряжения для разных расстояний от фокусатора до плоскости наблюдения приведены на рис.9.

Заметим, что размеры кольца можно менять очень плавно (теоретически – непрерывно), что связано с такой важной особенностью ЖК фокусатора как использование сплошного электрода для формирования распределения напряжений в области апертуры. Это позволяет формировать гладкий непрерывный профиль фазовой задержки и плавно менять распределение напряжения на апертуре фокусатора (и, следовательно, размеры кольца) путем изменения потенциалов на контактных электродах. На практике возможность плавного управления размерами кольца ограничивается дискретностью управляющих напряжений.

С точки зрения оптического захвата возможность управления размерами кольца может быть весьма полезной. Например, авторами [21] демонстрируется возможность стабильного захвата в темную область светового кольца, сформированного ДОО, прозрачной (непоглощающей) частицы. При этом размеры частицы должны несколько превышать радиус кольца. Поскольку, например, для биообъектов характерны вариации размеров объектов внутри образца, то изменение параметров (размеров) ловушки позволило бы оптимизировать захват. Причем это актуально как для прозрачных, так и для непрозрачных (поглощающих) объектов, захватываемых в минимум интенсивности.

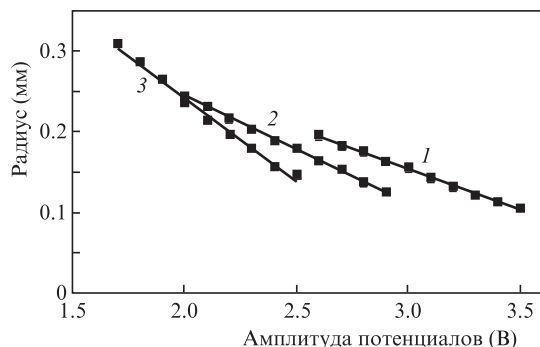


Рис.9. Расчетные зависимости радиуса кольцевой ловушки от напряжения на контактах при расстояниях от плоскостей наблюдения до фокусатора 2 (1) 3 (2) и 4 см (3).

4.2. Управление формой ловушки

Меняя параметры управляющего напряжения, можно изменять форму ловушки от кольцевой до эллиптической и наоборот. Например, если требуется преобразовать распределение напряжения так, чтобы эквипотенциальные линии в виде окружностей перешли в эллиптические без смещения центра, то нужно одинаково изменить амплитуды потенциалов на одной из подложек (рис.10).

Возможность плавного управления формой контурных ловушек и их размерами может быть полезна для захвата объектов биологического происхождения различной формы. В частности, эллипсообразные ловушки позволяют оптимизировать захват эритроцитов, форма которых, как известно, может изменяться от дисковидной до сфероидной либо гантелеобразной.

4.3. Перемещение контурных ловушек

В работах [7, 8] нами было показано, что, изменяя амплитуду и/или фазу приложенных к контактам потенциалов, можно управлять положением центра основания кругового конуса, а следовательно, контролировать положение точечной или контурной ловушки. Результаты численного моделирования и экспериментов, демонстрирующие возможность перемещения кольца, приведены на рис.11.

Аналогично можно перемещать эллипсообразные ловушки. Кроме того, перемещая эллипсообразные либо кольцевидные ловушки, можно формировать С-образную ловушку и управлять ее формой (рис.12).

5. Эксперименты по манипуляции

Для проведения экспериментов по манипуляции использовалась схема оптического пинцета с ЖК фокуса-

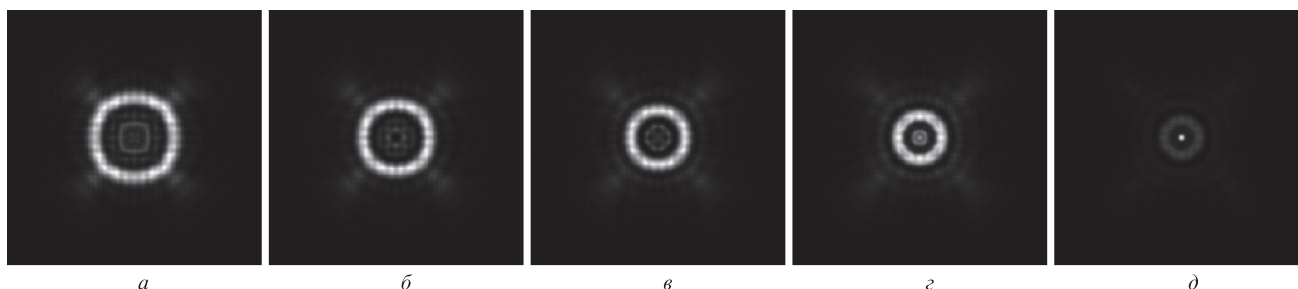


Рис.8. Результаты расчетов распределения интенсивности света на расстоянии 4 см от фокусатора при амплитудах потенциалов на контактах 2 (а), 2.2 (б), 2.4 (в), 2.6 (г) и 2.8 В (д).

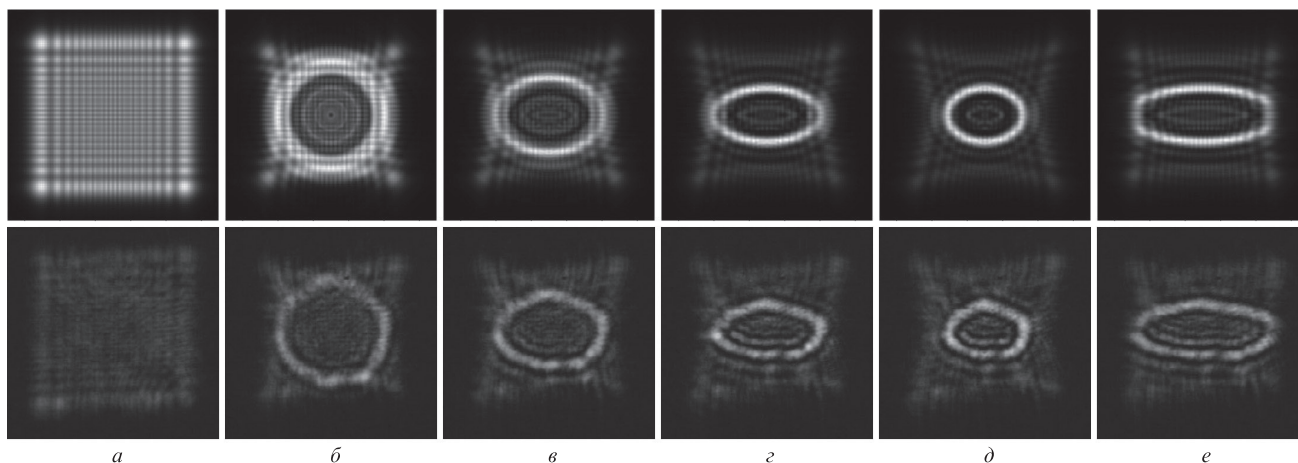


Рис.10. Результаты расчетов (верхний ряд) и измерений (нижний ряд) распределения интенсивности света на расстоянии 2 см от фокусатора при амплитудах потенциалов на контактах $A_{11} = A_{12} = A_{21} = A_{22} = 0$ (a); $A_{11} = A_{12} = 2$ В, $A_{21} = A_{22} = 2$ В (б); $A_{11} = A_{12} = 2$ В, $A_{21} = A_{22} = 2.5$ В (в); $A_{11} = A_{12} = 2$ В, $A_{21} = A_{22} = 3$ В (г); $A_{11} = A_{12} = 2.5$ В, $A_{21} = A_{22} = 3$ В (д); $A_{11} = A_{12} = 1.5$ В, $A_{21} = A_{22} = 3$ В (e).

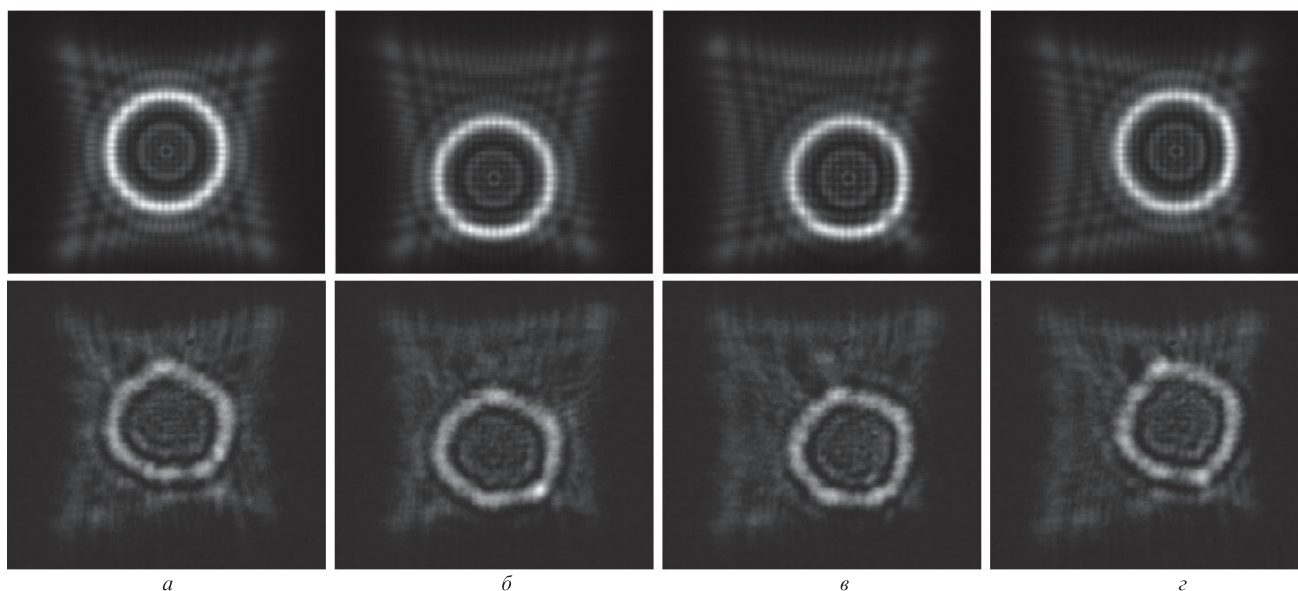


Рис.11. Результаты расчетов (верхняя строка) и измерений (нижняя строка) распределения интенсивности света на расстоянии 2 см от фокусатора при амплитудах потенциалов на контактах $A_{11} = A_{12} = A_{21} = A_{22} = 2.5$ В (a); $A_{11} = A_{12} = 2.5$ В, $A_{21} = 2$ В, $A_{22} = 3$ В (б); $A_{11} = 3$ В, $A_{12} = 2$ В, $A_{21} = 2$ В, $A_{22} = 3$ В (в); $A_{11} = 3$ В, $A_{12} = 2$ В, $A_{21} = A_{22} = 2.5$ В (z).

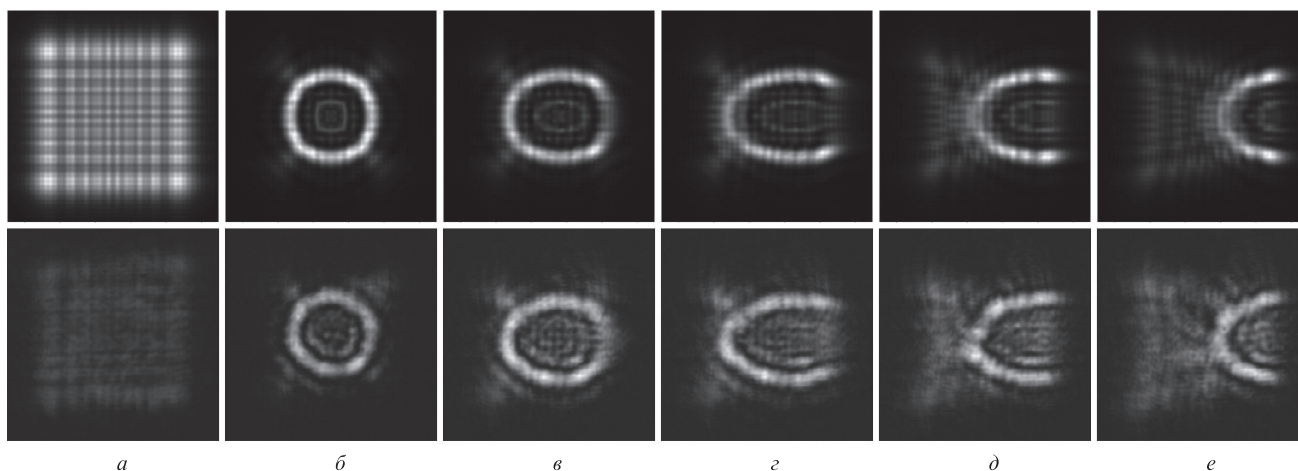


Рис.12. Результаты численного моделирования (верхний ряд) и измерений (нижний ряд) распределения интенсивности света на расстоянии 4 см от фокусатора при амплитудах потенциалов на контактах $A_{11} = A_{12} = A_{21} = A_{22} = 0$ (a); $A_{11} = A_{12} = A_{21} = A_{22} = 2$ В (б); $A_{11} = 2$ В, $A_{12} = 1.5$ В, $A_{21} = A_{22} = 2$ В (в); $A_{11} = 2$ В, $A_{12} = 1$ В, $A_{21} = A_{22} = 2$ В (z); $A_{11} = 2.5$ В, $A_{12} = 0.5$ В, $A_{21} = A_{22} = 2$ В (д); $A_{11} = 3$ В, $A_{12} = 0$, $A_{21} = A_{22} = 2$ В (e).

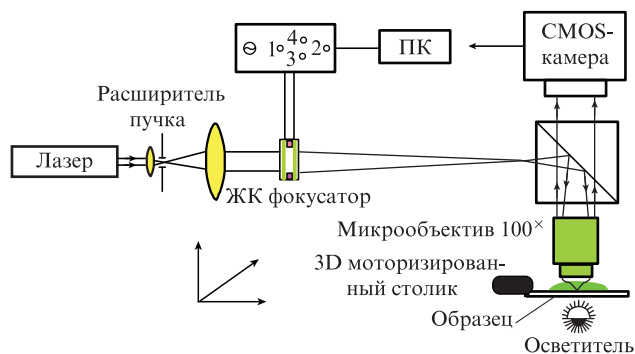


Рис.13. Схема экспериментальной установки лазерного пинцета на основе ЖК фокусатора.

тором (рис.13). Формирование ловушек осуществлялось твердотельным лазером (0.53 мкм) с диодной накачкой. Лазерный пучок направлялся через согласующий коллиматор на ЖК фокусатор, который формировал в заданной плоскости требуемое распределение светового поля. Далее пучок заводился в объектив 100 \times модернизированного биологического микроскопа XSP-104, и в плоскости манипуляции воспроизводилось уменьшенное распределение интенсивности. Под кюветой с микрообъектами для визуализации рабочей области микроскопа был расположен осветитель. Запись изображения, формируемого микроскопом, осуществлялась окулярной цифровой видеокамерой DCM-130, подключенной к компьютеру. Управление фокусатором реализовывалось графическим интерфейсом пользователя, позволяющим задавать амплитуду и фазу управляющего напряжения на каждом из контактов. С помощью кольцевых световых ловушек, сформированных четырехканальным перестраиваемым ЖК фокусатором, были проведены эксперименты по захвату и удержанию поглощающих микрообъектов, в качестве которых использовались взвешенные в воде частицы оксида алюминия Al_2O_3 субмикронных размеров, а также их конгломераты. Мощность излучения в ловушках составляла около 10 мВт.

Для захвата поглощающий микрообъект подводился к световой ловушке. Затем излучение перекрывалось с помощью затвора, и объект подводился к маркеру – виртуальной отметке на экране, обозначающей положение центра светового кольца. После этого затвор открывался, и поглощающая частица оказывалась внутри ловушки. Эксперимент по удержанию микрочастицы Al_2O_3 при перемещении подложки иллюстрирует рис.14. Вертикальная стрелка указывает направление движения подложки. Частицы вне оптической ловушки (маркированы гори-

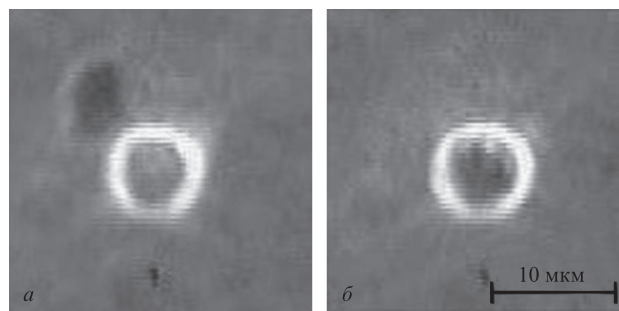


Рис.15. Процесс захвата кольцевой ловушкой конгломерата частиц Al_2O_3 размером 5–6 мкм: микрообъект находится рядом с ловушкой (а) и микрообъект удерживается ловушкой (б).

зонтальной стрелкой) перемещаются, при этом захваченная частица остается внутри светового кольца.

Описанные эксперименты были выполнены как для отдельных частиц, размеры которых составляли 0.5–1.5 мкм, что существенно меньше темной области кольца, так и для конгломератов частиц с размерами, сопоставимыми с размерами области минимума (рис.15).

Оценивались максимальные скорости перемещения подложки, при которых захваченная частица удерживается оптической ловушкой. Для поглощающей частицы Al_2O_3 размером 1.5 мкм она составила 2.5 мкм/с при захвате оптической ловушкой в виде кольца с внешним диаметром 8 мкм и толщиной линии 0.9 мкм при мощности излучения 10 мВт. Для сравнения: при захвате такой оптической ловушкой прозрачной частицы латекса диаметром 2.9 мкм и манипуляции с ней скорость перемещения составляла 17 мкм/с.

«Выключение» кольцевой ловушки при захвате микрообъектов требует дополнительных манипуляций с излучением лазера и формирования виртуального маркера, обозначающего центр ловушки. Более удобным и наглядным является захват частиц С-образной ловушкой, преобразующейся затем в кольцо. На рис.16 приведены кадры, иллюстрирующие эксперимент по захвату и удержанию микрочастиц таким способом. В качестве микрообъекта используется поглощающая частица Al_2O_3 размером около 1.5 мкм. Микрообъекты подводятся к сформированной фокусатором С-образной ловушке (1). Ловушка перестраивается в кольцо, частицы оказываются внутри кольца (2) и остаются внутри него при перемещении подложки в направлении, указанном вертикальной стрелкой (3, 4).

В проведенных экспериментах наглядно демонстрируются принципиальные возможности использования ло-

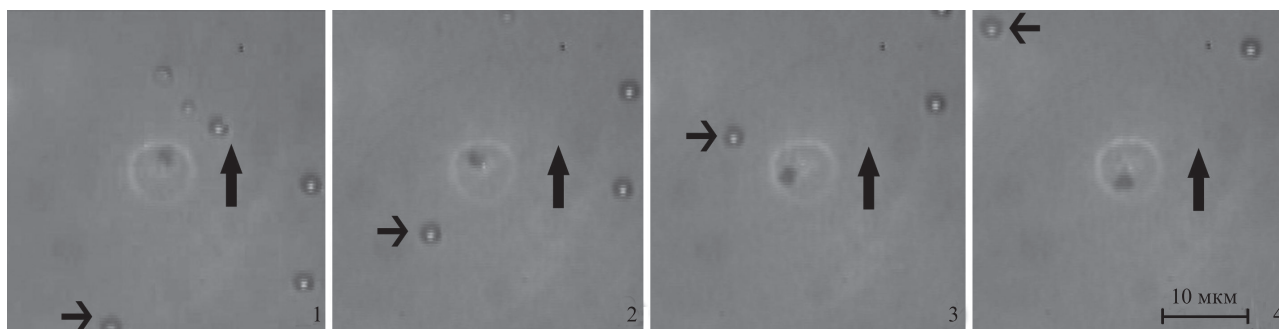


Рис.14. Удержание кольцевой ловушкой поглощающей микрочастицы Al_2O_3 размером 1.5 мкм.

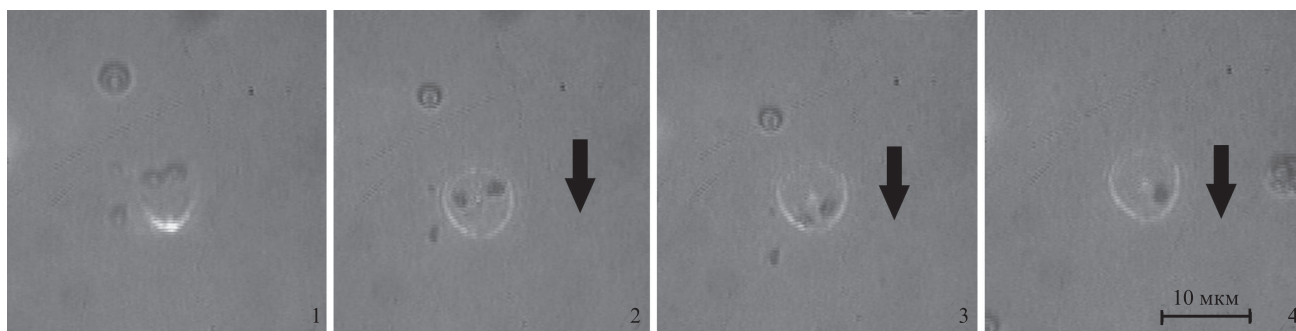


Рис.16. Захват и удержание микрочастиц оксида алюминия размером 1.5 мкм С-образной ловушкой, перестраиваемой в кольцо.

вушек, сформированных ЖК фокусатором, для оптического захвата и удержания непрозрачных частиц, а также для формирования универсальных ловушек с целью одновременного захвата прозрачных и непрозрачных частиц. Для оценки эффективности захвата и выбора оптимальных параметров ловушек требуется проведение дальнейших исследований. Тем не менее исследованные особенности формирования контурных световых полей и управления ими с помощью ЖК фокусатора, описанные здесь, позволяют, на наш взгляд, говорить о перспективности рассматриваемых ловушек для задач микроманипулирования.

6. Заключение

Продемонстрированы возможности использования четырехканального ЖК фокусатора для формирования контурных оптических ловушек (в форме кольца, эллипса, С-образной) и управления ими. Рассматриваемый фокусатор работает в режиме пропускания, что конструктивно упрощает его встраивание в оптический пинцет и позволяет обеспечить компактность схемы пинцета. Эксперименты проводились при плотностях мощности излучения, падающего на фокусатор, до 30 Вт/см². Использование сплошного электрода для формирования распределения напряжений в области апертуры позволяет формировать гладкий непрерывный профиль фазовой задержки и плавно изменять распределение напряжения на апертуре фокусатора за счет изменения потенциалов на контактных электродах. Это дает возможность плавно изменять как размеры ловушки, так и ее форму, что и было продемонстрировано экспериментально.

Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования ЖК фокусатора в системах оптического манипулирования, например для биомедицинских приложений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-31376мол_а).

1. Bowman R., Gibson G., Padgett M. *Opt. Express*, **18**, 11785 (2010).
2. Jesacher A., Maurer C., Bernet S., Schwaighofer A., Ritsch-Marte M. *Opt. Express*, **16**, 4479 (2008).
3. Chapin C., Germain V., Dufresne E. *Opt. Express*, **14**, 13095 (2006).
4. Dholakia K., Čižmár T. *Nature Photon.*, **5**, 335 (2011).
5. Padgett M., Bowman R. *Nature Photon.*, **5**, 343 (2011).
6. Afanasiev K., Korobtsov A., Kotova S., Losevsky N., Mayorova A., Patlan V., Volostnikov V. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **414**, 012017 (2013).
7. Котова С.П., Патлань В.В., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **41** (1), 58 (2011).
8. Котова С.П., Патлань В.В., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **41** (1), 64 (2011).
9. Kotova S., Patlan V., Samagin S. *J. Optics*, **15** (3), 035706 (2013).
10. Korobtsov A., Kotova S., Losevsky N., Mayorova A., Patlan V., Samagin S. *J. Optics*, **16**, 035704 (2014).
11. Padgett M., Allen L. *Contemporary Phys.*, **41** (5), 275 (2000).
12. Dasgupta R., Ahlawat S., Verma R.S., Gupta P.K. *Opt. Express*, **19** (8), 7680 (2011).
13. Daria V.R., Go M.A., Bachor H.-A. *J. Optics*, **13** (4), 044004 (2011).
14. Arlt J., Garces-Chavez V., Sibbett W., Dholakia K. *Opt. Commun.*, **197**, 239 (2001).
15. Arlt J., Dholakia K., Soneson J., Wright E. *Phys. Rev. A*, **63**, 063602 (2001).
16. Garces-Chavez V., McGloin D., Melville H., Sibbett W., Dholakia K. *Nature*, **419**, 145 (2002).
17. McGloin D., Garces-Chavez V., Dholakia K. *Opt. Lett.*, **28**, 657 (2003).
18. Baumgartl J., Mazilu M., Dholakia K. *Nature Photon.*, **2**, 675 (2008).
19. Baumgartl J., Hannappel G.M., Stevenson D.J., Day D., Gu M., Dholakia K. *Lab. Chip.*, **9**, 1334 (2009).
20. Siviloglou G., Broky J., Dogariu A., Christodoulides D. *Opt. Photon. News*, **19**, 21, (2008).
21. Porfirev A.P., Skidanov R.V. *Appl. Opt.*, **52**, 6230 (2013).
22. Siler M., Jakl P., Brzobohaty O., Zemanek P. *Opt. Express*, **20**, 24304 (2012).
23. Rykov M.A., Skidanov R.V. *Appl. Opt.*, **53**, 156 (2014).