



ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ФОКУСАТОР

С.П. Котова^{1,2*}, к.ф.-м.н., А.В. Коробцов¹, к.ф.-м.н.,
Н.Н. Лосевский¹, А.М. Майорова^{1,2}, к.ф.-м.н.,
С.А. Самагин¹, к.ф.-м.н., Самарский филиал
ФГБУН Физический институт им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук (СФ ФИАН),
Самарский национальный исследовательский уни-
верситет имени академика С.П. Королева;
**kotova@fian.smr.ru*

Создание сложных световых полей для реализации разнообразных оптических ловушек и их массивов, для управления фокусным расстоянием изображающих систем необходимо в биомедицине, астрономии, наноиндустрии.
Уникальные возможности многоэлементных пространственных модуляторов света – формировать динамически управляемые световые поля с разнообразной структурой – находят широкое применение в схемах оптических пинцетов. Представлен бюджетный и технологически простой жидкокристаллический модулятор света (жидкокристаллический фокусатор) с модальным принципом управления, разработанный в СФ ФИАН.

МОДАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ И ЖК УСТРОЙСТВА НА ЕГО ОСНОВЕ

Модальный принцип управления жидкокристаллическими (ЖК) пространственными модуляторами был предложен более четверти века назад и впервые описан в работах [1, 2]. Авторы работ рассматривали принципиально новый подход формирования непрерывного профиля фазового пропускания слоя нематического ЖК с большой апертурой. В конструкцию модулятора на низкоомное покрытие с отверстием, играющим роль апертуры, вносится дополнительный однородный высокоомный прозрачный слой – управляющий электрод. Это позволяет реализовать адаптивные линзы различных конфигураций, управлять фокусирующими свойствами которых можно за счет изменения амплитуды и частоты напряжения. Возможность использования для управления параметрами ЖК-линзы частоты управляющего напряжения, а не только амплитуды, принципиально отличает рассматриваемый подход от подхода, описанного в [3, 4], где профиль фазовой задержки формируется за счет

LIQUID CRYSTAL FOCUSING DEVICE

S.P. Kotova^{1,2,*}, Ph.D. (Phys. and Math.),
A.V. Korobtsov¹, Ph.D. (Phys. and Math.),
N.N. Losevsky¹, A.M. Mayorova^{1,2}, Ph.D. (Phys. and
Math.), S.A. Samagin¹, Ph.D. (Phys. and Math.),
¹Lebedev Physical Institute, Samara, Russian
Academy of Sciences (SB PIAS);
²Samara National Research University named after
Academician S.P. Korolev; **kotova@fian.smr.ru*

Multi-pixel spatial light modulators provide unique capabilities for generation of dynamically controlled light fields with various structures, and therefore find wide application for schemes of optical tweezers to form different optical traps and their arrays, for problems of control of focal distance of image systems and others. For practical application in biomedicine, astronomy and industry it is relevant to form complicated light fields using inexpensive and technologically simple controlled devices. The developed at the Samara Branch of Lebedev Physical Institute four-channel liquid crystal light modulator (liquid crystal focusing device) with the modal control principle is such a device.

MODAL CONTROL PRINCIPLE AND LC DEVICES BASED ON IT

Modal control principle of liquid crystal (LC) spatial modulators was suggested more than quarter of a century ago, and it was described for the first time in the papers [1, 2]. Fundamentally new approach to the generation of continuous profile of phase transmission of nematic LC layer with large aperture is considered in these papers. The additional homogeneous high-resistance transparent layer – controlling electrode is introduced into the construction of modulator on low-resistance coating with the hole, which plays the role of aperture. It allows implementing the adaptive lenses with different configurations, which focusing properties can be controlled by means of variation of voltage amplitude and frequency. Capability to use the frequency of control voltage and not only amplitude for the control of LC lens parameters gives principle difference to the considered approach in comparison with the approach described in the papers [3, 4] where the profile of phase delay is formed by means of boundary field. Besides, the aperture of implemented lenses, which are described in the papers [3, 4], is



краевого поля. Кроме того, апертура реализованных линз, описанных в [3, 4] ограничена несколькими сотнями микрометров, а за счет использования управляющего электрода эти ограничения были сняты. На основе рассматриваемого подхода был разработан ряд модальных ЖК устройств: сферические и цилиндрические адаптивные линзы с размером апертуры более 1 мм с управляющими напряжениями не более 10 В, корректоры волнового фронта с перестраиваемой функцией отклика, адаптивные линзы с оптически управляемым фокусным расстоянием [2, 5–8].

Поскольку в ЖК-устройствах с модальным принципом управления используются всего несколько электродов и низкие управляющие напряжения, такие устройства характеризуются технологичностью изготовления, простотой управления и относительно невысокой стоимостью. Поэтому задача создания компактных и недорогих систем с использованием модальных ЖК-устройств по-прежнему является актуальной и активно исследуется в последнее десятилетие. Результатами этих исследований стало расширение возможностей рассматриваемых устройств и создание новых. Так, было показано [9], что изменяя режимы управления, модальные ЖК-линзы можно использовать для формирования наклонных и астигматических волновых фронтов, а также для реализации управляемых аксионов. За счет использования нового резистивного покрытия и изменения геометрии удалось добиться уменьшения фокусного расстояния жидкокристаллических линз [10]. Использование двух высокорезистивных слоев и шести контактных электродов позволило авторам [11, 12] реализовать двумерную матрицу модальных ЖК линз – микроаксиконов, параметрами которых можно управлять в зависимости от прикладываемого напряжения. В [13] показано, что структура на основе ЖК и высокоомного слоя может использоваться в качестве спиральной фазовой пластики для формирования вихревых световых полей. Нами был предложен ЖК модулятор с четырьмя контактными электродами (ЖК фокусатор) [14–16], принцип действия и функциональные возможности которого описаны ниже.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЖК ФОКУСАТОРА

Жидкокристаллический фокусатор представляет собой устройство, реализованное на основе скрещенных подложек цилиндрических модальных ЖК линз, объединенных в одну конструкцию (см. рис.1). На стеклянные подложки

restricted by several hundreds of micrometers, and due to use of control electrode these restrictions were removed. On the basis of considered approach a number of modal LC devices was developed: spherical and cylindrical adaptive lenses with the size of aperture of more than 1 mm and control voltages of not more than 10 V, wavefront correctors with adjustable response function, adaptive lenses with optically-controlled focal distance [2, 5–8].

Since in LC devices with modal control principle only few electrodes and low control voltages are used, such devices are characterized by the manufacturability, simplicity of operation and relatively low cost. Therefore, the task of creation of compact and inexpensive systems using the modal LC devices is still relevant and it has been actively studied for the last decade. Results of these studies include the enhancement of capabilities of considered devices and creation of new ones. Thus, it was shown [9] that by changing control modes the modal LC lenses can be used for generation of inclined and astigmatic wavefronts and for implementation of controlled axicons. Due to the use of new resistive coating and alteration of geometry the decrease of focal distance of liquid crystal lenses was achieved [10]. Use of two high-resistive layers and six contact electrodes allows implementing two-dimensional array of modal LC lenses – micro-axicons, parameters of which can be controlled on the basis of applied voltage, to the authors [11, 12]. In the paper [13] it is shown that the structure based on LC and high-resistance layer can be used as the spiral phase plate for generation of vortex light fields. We suggested the LC modulator with four contact electrodes (LC focusing device) [14–16], the operation principle and functional capabilities of which are described below.

OPERATION PRINCIPLE OF LC FOCUSING DEVICE

Liquid-crystal focusing device is represented by the device made on the basis of crossed substrates of cylindrical modal LC lenses, which are integrated into one construction (see Fig. 1). Transparent high-resistance coatings (surface resistance from 100 kOhm/square and to units of MOhm/square) and low-resistance non-transparent stripe contacts are applied on glass substrates. Substrates are located in such a way that their contact electrodes are perpendicular to each other. The layer of nematic LC is located between the substrates; the thickness of this layer is set by spacers, and initial planar orientation is determined by orienting coatings applied on substrates. LC of BL037 brand produced by Merck with the thickness of 10 μm was used in our experiments; aperture of the device was

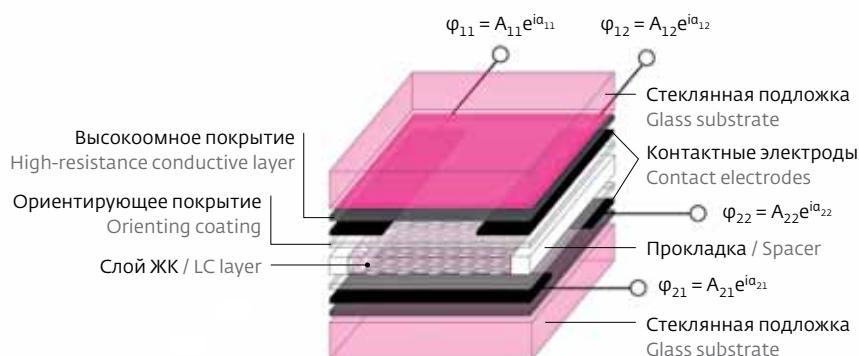


Рис.1. Вид ЖК фокусатора и его структурная схема: $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ – амплитуды, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – фазы напряжений, прикладываемых к контактным электродам верхнего и нижнего слоя

Fig. 1. Photo of LC focusing device and its constructive scheme: $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ – amplitudes, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – phases of voltage applied to the contacts of the upper and the lower layer

наносятся прозрачные высокоомные покрытия (поверхностное сопротивление от 100 кОм/квадрат и до единиц МОм/квадрат) и низкоомные непрозрачные полосковые контакты. Подложки располагаются так, чтобы их контактные электроды были перпендикулярны друг другу. Между подложками заключается слой нематического ЖК, толщина которого задается прокладками, а первоначальная планарная ориентация – нанесенными на подложки ориентирующими покрытиями. В наших экспериментах использовался ЖК марки BL037 фирмы Merck, толщиной 10 мкм, апертура устройства составляла 1x1 мм. Тип используемого ЖК определяет спектральный диапазон, в котором может происходить модуляция света. В нашем случае – это видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Если к контактам устройства приложены переменные электрические потенциалы с заданной амплитудой и фазой, то в области апертуры устройства формируется пространственное распределение действующего значения напряжения, приводящее к переориентации молекул жидкого кристалла (S-эффект). Это приводит к изменению пространственного распределения фазовой задержки, вносимой ЖК слоем в проходящую световую волну.

Подробно принцип действия устройства, его математическая модель и основные режимы работы описаны в [14–16]. В частности, было показано, что практически значимые распределения фазовой задержки могут быть получены в режиме работы с малым модальным параметром, для реализации которого нужно уменьшить определенным образом частоту и/или сопротивление

1x1 mm. The type of used LC determines the spectral range, in which the light modulation can take place. In our case – it is visible and near infrared spectral ranges. When alternating electric potentials with a given amplitude and phase are applied to the contacts, the voltage spatial distribution is formed in the aperture zone inducing the reorientation of molecules in the LC layer (S-effect). It results in the change of spatial distribution of phase delay introduced by LC layer into the propagating light wave.

The operation principle of device, its mathematical model and basic operation modes are described in the papers [14–16]. In particular, it was shown that practically significant distributions of phase delay can be obtained under the operation mode with low modal parameter, for the realization of which it is required to decrease the frequency and/or resistance of high-resistance coatings in certain manner. In this mode the influence of frequency on voltage distribution becomes negligibly low, and its type (and respectively shape of profile of phase delay) is determined by the amplitudes and relative phases of potentials.

Equipotential lines of potentials in the operating space of device can be one of two types: elliptical (in the form of ellipses and circles) and parabolic (in particular case, in the form of parallel straight lines). These distributions of potentials are transformed into the relevant phase profiles in the form of elliptical and circular truncated cones or cylindrical surface (examples of the relevant phase profiles are given in Fig. 2).

LIGHT FIELDS GENERATED BY LC FOCUSING DEVICE

4-channel LC modulator allows focusing the light field into the point and generate fields with transverse

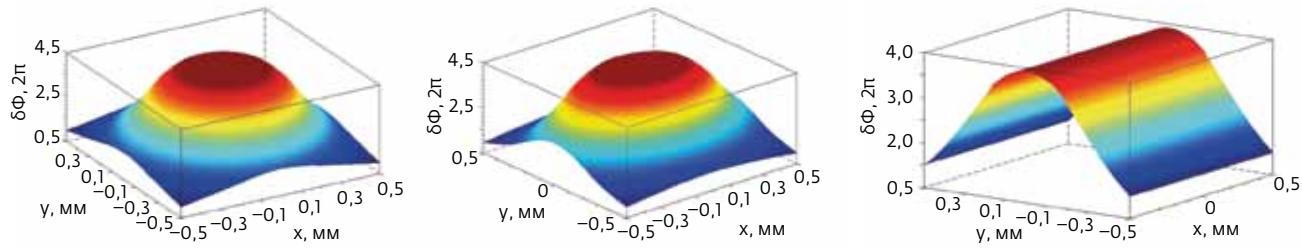


Рис.2. Фазовые профили в виде кругового и эллиптического усеченных конусов, а также в виде цилиндрической поверхности

Fig. 2. Phase profiles in the shape of circular and elliptic truncated cones and cylindrical surface

высокоомных покрытий. В этом режиме влияние частоты на распределение напряжения становится пренебрежимо малым, и его вид (и соответственно форма профиля фазовой задержки) определяются амплитудами и относительными фазами потенциалов.

Эквипотенциальные линии потенциалов в рабочей области устройства могут быть двух типов: эллиптического (в виде эллипсов и окружностей) и параболического (в частном случае, в виде параллельных прямых линий). Эти распределения потенциалов преобразуются в соответствующие фазовые профили в виде эллиптического и кругового усеченных конусов либо цилиндрической поверхности (примеры соответствующих фазовых профилей приведены на рис.2).

СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ ЖК ФОКУСАТОРОМ

Четырех канальный ЖК модулятор позволяет фокусировать световое поле в точку и формировать поля с поперечным распределением интенсивности в виде отрезка, а также так называемые контурные световые поля (с поперечным распределением интенсивности в виде колец, эллипсов) (рис.3).

distribution of intensity in the form of segment and so-called contour light fields (with transverse distribution of intensity in form of rings, ellipses) (Fig. 3).

In order to obtain the contour light fields or in order to focus field into the point, it is necessary to form the phase profile with the shape of truncated circular cone. When the plane homogeneous light wave propagates through the optical transparency with such phase transmission in the area of Fresnel diffraction, at small distance from LC focusing device, in transverse plane the points with maximum intensity will be located at the contour of the curve repeating the form of equipotential lines of voltage profile. Thus, against the general background quite bright light ring will be formed, for which the ratio between intensity of light contour and intensity of surrounding dark area is 5 ÷ 15 depending on the device aperture and thickness of LC layer. Ring size decreases with the increase of the distance from focusing device, and in some plane the intensity distribution is focused into the point-type spot (Fig. 4). It should be noted that due to the fact that rings and then spots are formed in some range of distances along the axis of radiation propagation we can speak about the formation of hollow light tube and longitudinal light segment in far area by LC focusing device [17].

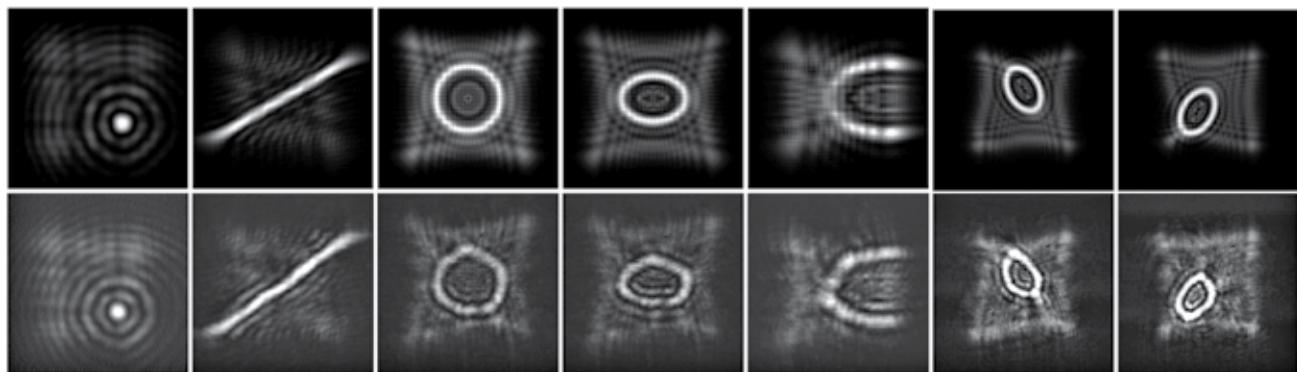


Рис.3. Рассчитанные и экспериментально полученные распределения интенсивности света, реализуемые с помощью четырехканального ЖК модулятора

Fig. 3. Simulated and experimentally obtained light intensity distributions generated with 4-channel LC modulator

Для получения контурных световых полей либо фокусировки поля в точку необходимо сформировать фазовый профиль в виде усеченного кругового конуса. При прохождении плоской однородной световой волны через оптический транспарант с таким фазовым пропусканием в области дифракции Френеля, на небольшом расстоянии от ЖК фокусатора, в поперечной плоскости точки с максимальной интенсивностью будут располагаться на контуре кривой, повторяющей форму эквипотенциальных линий профиля напряжения. Таким образом, на общем фоне будет формироваться довольно яркое световое

Similarly to the fields with transverse distribution of intensity in the form of ring, it is possible to obtain the light fields with transverse distribution in the form of ellipse, for this purpose it is required to generate the phase profile of LC focusing device in the form of elliptical cone. At the same time, it is possible to implement the voltage distributions with elliptical equipotential lines and random orientation of main axes relative to aperture boundaries. In this case the voltages supplied to contacts will depend in certain way on the amplitude at one of the contacts, coordinates of elliptical cone center, ratio between its axes and rotation angle of main axes of ellipse relative to the aperture

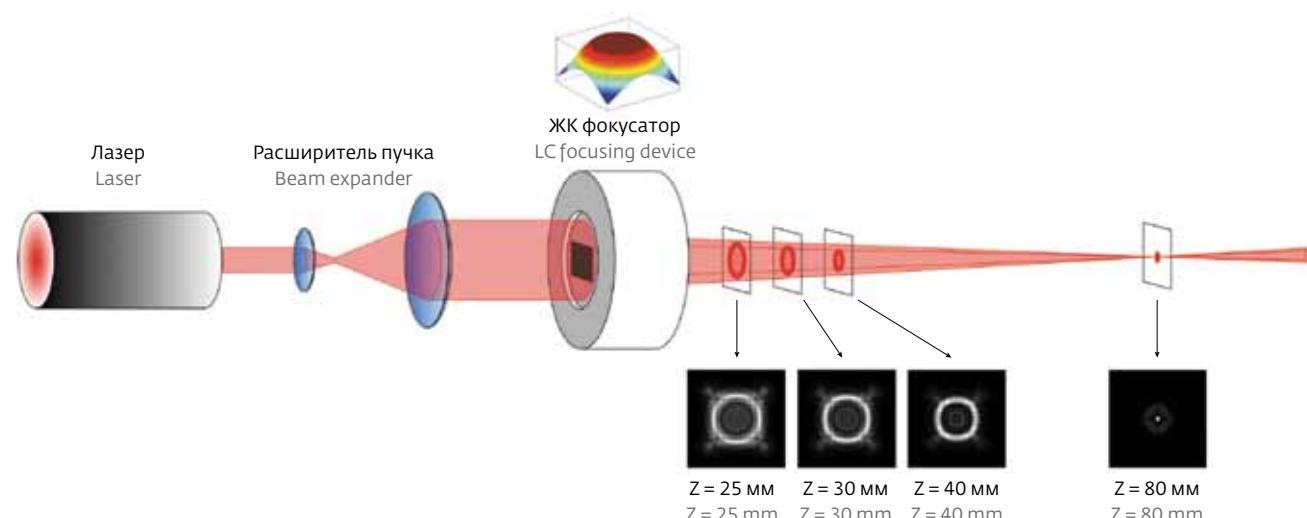


Рис.4. Схема формирования световых колец и фокусировки поля в точку: в верхней части рисунка представлено распределение профиля фазовой задержки; в нижней – рассчитанные распределения интенсивности света при амплитудах потенциалов на контактах фокусатора 2 В на разных расстояниях

Fig. 4. Scheme of generation of light rings and field focusing into the point. The distribution of phase delay profile is shown at the top. Simulated distributions of light intensity are given at the bottom with the amplitudes of potentials at contacts of focusing device 2 V at different distances



кольцо, для которого соотношение интенсивности светового контура к интенсивности окружающей темной области составляет 5-15 в зависимости от апертуры устройства и толщины ЖК слоя. Размеры кольца уменьшаются с ростом расстояния от фокусатора, и в некоторой плоскости распределение интенсивности фокусируется в точечное пятно (рис.4). Заметим, что поскольку кольца, а затем и пятна формируются в некотором диапазоне расстояний вдоль оси распространения излучения, то можно говорить о формировании ЖК фокусатором полой световой трубки, а в дальней зоне – продольного светового отрезка [17].

Аналогично полям с поперечным распределением интенсивности в виде кольца можно получать световые поля с поперечным распределением в виде эллипса. Для этого нужно формировать фазовый профиль ЖК фокусатора в форме эллиптического конуса. Одновременно можно реализовать распределения напряжения с эллиптическими эквипотенциальными линиями с произвольной ориентацией главных осей относительно границ апертуры. В таком случае напряжения, подаваемые на контакты, будут определенным образом зависеть от амплитуды на одном из контактов, координат центра эллиптического конуса, отношения его осей и угла поворота главных осей эллипса относительно границ апертуры ЖК фокусатора. Понятно, что эти зависимости более сложные, чем в случае ориентации главных осей эллипса параллельно границам амплитуды. Формируя эллиптический профиль фазовой задержки с произвольной ориентацией главных осей эллипса, можно получать соответствующие распределения интенсивности света.

Если сформировать распределения напряжения в виде эллипса, размеры которого будут несколько больше размеров апертуры, то линии с постоянной фазой профиля фазовой задержки будут не замкнуты в пределах апертуры, то есть

boundaries of LC focusing device. Understandably, these dependences are more complex than in case with orientation of ellipse main axes in parallel with amplitude boundaries. By forming the elliptical profile of phase delay with random orientation of ellipse main axes we can obtain the relevant distributions of light intensity.

If you generate the voltage distributions in the form of ellipse, size of which will be slightly larger than the size of aperture, the lines with constant phase of phase delay profile will be not closed within the limits of aperture, in other words, they will have appearance of arcs of circles or ellipses. It will allow obtaining the distribution of light field, in which the points with maximum intensity are located along the contour of analogous curve or in the form of arc of circle or ellipse, in the near area from focusing device.

In order to focus the light into transverse segment, it is necessary to generate the profile of phase delay in the form of surface of cylindrical lens. For this purpose it is necessary to set the voltage distributions with equipotential lines in the form of parallel straight lines. The optical transparency with such phase transmission will focus the plane homogeneous light wave into the light segment, position and orientation of which can be controlled by means of variation of amplitude and/or phase of potentials applied to contacts (Fig. 5).

CONTROL OF LIGHT FIELDS GENERATED BY LC FOCUSING DEVICE

Control of size of transverse intensity distributions

In order to generate the light ring, the profile of phase delay in the form of truncated cone is used. The size of ring will depend on the width and depth of phase deflection of phase profile. The depth of phase deflection and therefore the size of light ring in the set plane can be controlled by changing the potentials at the contacts of LC focusing device. The higher the amplitude of potentials supplied to the contacts of LC focusing device

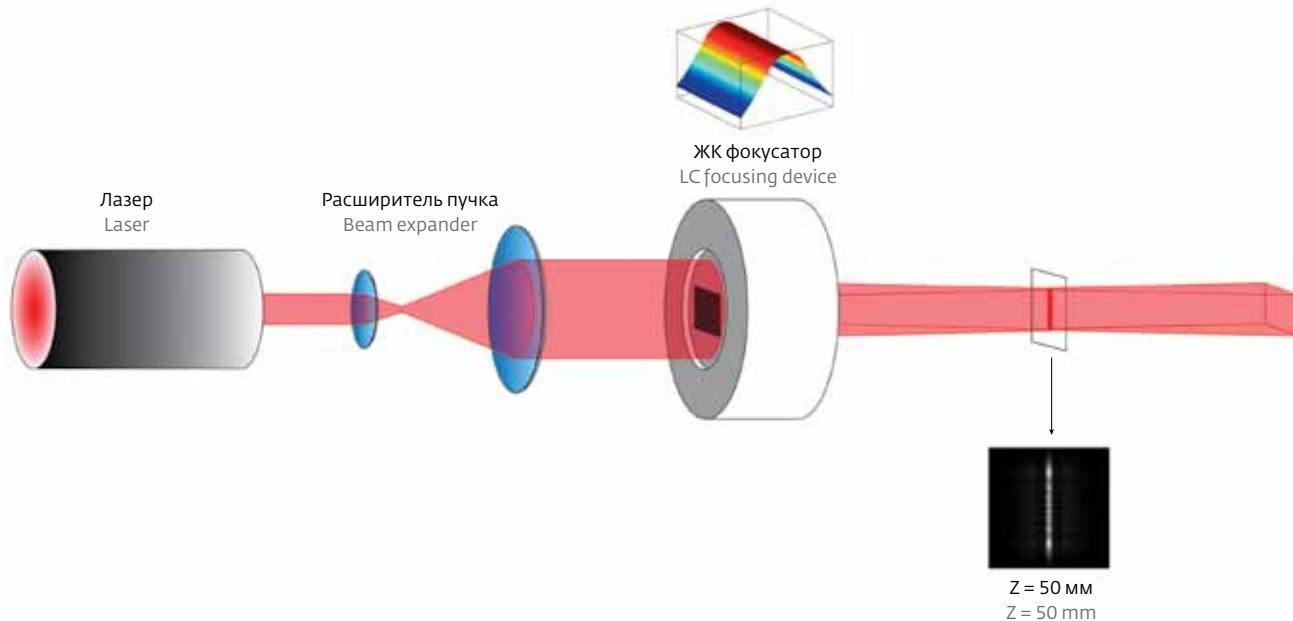


Рис.5. Схема фокусировки поля в поперечный отрезок: в верхней части рисунка представлено распределение профиля фазовой задержки; в нижней – рассчитанное распределение интенсивности света
Fig. 5. Scheme of light field focusing into transverse segment. The distribution of phase delay profile is shown at the top. Simulated distribution of light intensity is given at the bottom

иметь вид дуг окружностей или эллипсов. Это позволит получить в ближней зоне от фокусатора распределение светового поля, в котором точки с максимальной интенсивностью расположены по контуру аналогичной кривой, т.е. в виде дуги окружности или эллипса.

Для фокусировки света в поперечный отрезок нужно сформировать профиль фазовой задержки в виде поверхности цилиндрической линзы. Для этого необходимо задать распределения напряжения с эквипотенциальными линиями в виде параллельных прямых. Оптический транс-

is, the lower the ring radius will be (Fig. 6). Similarly, the size of light fields with transverse distribution of intensity in the form of ellipse can be altered.

Control of Light Field Shape

The shape of transverse distribution of intensity can be controlled from ring to ellipse and vice versa by changing the parameters of control voltage. For example, if it is required to transform the voltage distribution in such a way so that equipotential lines in the form of circles would turn into the elliptical lines without center

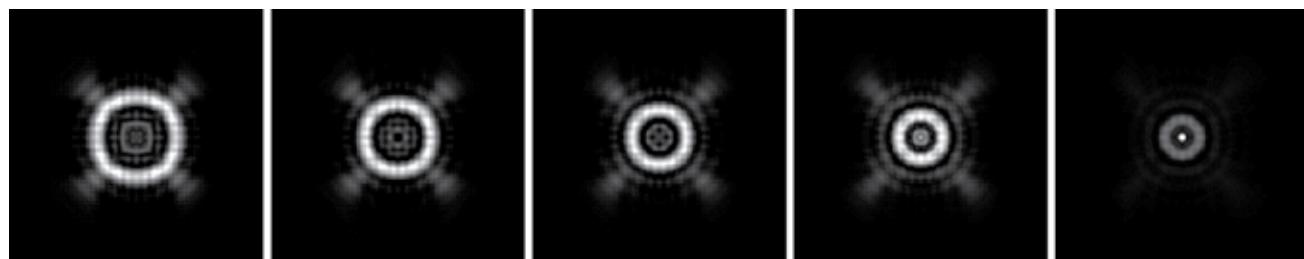


Рис.6. Управление размерами ловушки (расстояние от фокусатора до плоскости наблюдения 4 см; амплитуды потенциалов на всех контактах равны; увеличение амплитуды приводит к уменьшению радиуса кольца)
Fig. 6. Control of trap size. The distance from LC focusing device to the observation plane is 4 cm. The amplitudes of the potentials at all contacts are equal. The amplitude increase results in a decrease of the radius of light rings

параметр с таким фазовым пропусканием будет фокусировать плоскую однородную световую волну в световой отрезок, положением и ориентацией которого можно управлять за счет изменения амплитуды и/или фазы приложенных к контактам потенциалов (рис.5).

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМИ ПОЛЯМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ ЖК ФОКУСАТОРОМ

Управление размерами поперечных распределений интенсивности

Для формирования светового кольца используется профиль фазовой задержки в виде усеченного конуса. Размеры кольца будут зависеть от ширины и глубины фазового прогиба фазового профиля. Изменяя потенциалы на контактах ЖК фокусатора, можно управлять глубиной фазового прогиба и, следовательно, размерами светового кольца в заданной плоскости. Чем больше амплитуда потенциалов, подаваемых на контакты ЖК фокусатора, тем меньше радиус кольца (рис.6). Аналогично можно менять размеры световых полей с поперечным распределением интенсивности в виде эллипса.

Управление формой световых полей

Меняя параметры управляющего напряжения, можно менять форму поперечного распределения интенсивности от кольца к эллипсу и наоборот. Например, если требуется преобразовать распределение напряжения так, чтобы эквипотенциальные линии в виде окружностей перешли в эллиптические без смещения центра, то нужно

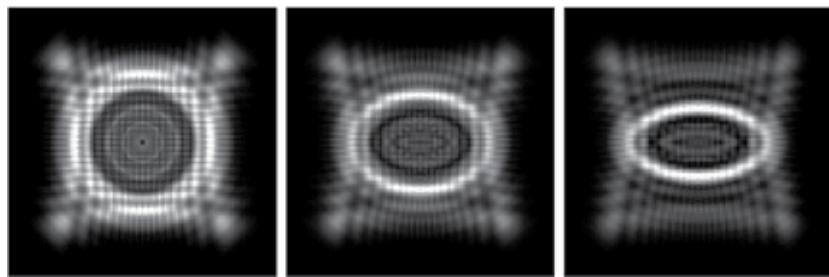


Рис.7. Управление формой распределения интенсивности света от кольца к эллипсу (расстояние от фокусатора до плоскости наблюдения 2 см; амplitуды потенциалов для первой подложки для всех случаев равны, а на второй подложке меняются)

Fig. 7. The control of intensity distributions' shape: from ring to ellipse. The distance from LC focusing device to the observation plane is 2 cm. The amplitudes of the potentials at contacts of upper layer are equal for all cases and the amplitudes of the potentials at contacts of lower layer are changed

displacement, then the potential amplitudes on one of the substrates should be altered by the same value (Fig. 7).

Control of Position of Light Rings and Focused Spots

It is possible to control the position of circular cone base center by changing the amplitude and/or phase of potentials applied to contacts. Respectively, it is possible to control the position of generated point-like light spot or ring and move these distributions in the set plane within the boundaries of the area of focusing device aperture display.

Capability of movement of light rings or ellipses allows fulfilling one more methods of generation of C-shaped distributions. Nonclosure of the lines of constant phase of phase delay profile will be provided by the displacement of the centers of elliptical or circular cone to the aperture boundaries.

амплитуды потенциалов на одной из подложек изменить на одну и ту же величину (рис.7).

Управление положением световых колец и сфокусированных пятен

Изменяя амплитуду и/или фазу приложенных к контактам потенциалов, можно управлять положением центра основания кругового конуса. Соответственно, можно контролировать положение сформированного светового точечного пятна или кольца и перемещать эти распределения в заданной плоскости в пределах области отображения апертуры фокусатора.

Возможность перемещения световых колец либо эллипсов позволяет реализовать еще один способ формирования С-образных распределений. Незамкнутость линий постоянной фазы профиля фазовой задержки будет обеспечиваться смещением центров эллиптического либо кругового конуса к границам апертуры.

Управление ориентацией и положением световых отрезков и эллипсов

Распределения в виде отрезков либо эллипсов можно поворачивать (менять их ориентацию относительно границ апертуры), а также перемещать. При этом задача перемещения формируемых ЖК фокусатором полей в виде эллипсов произвольной ориентации либо распределений в виде световых отрезков существенно усложняется по сравнению с задачей перемещения распределения интенсивности в виде концентрических колец либо сфокусированных пятен. Однако и для этих случаев соотношения между параметрами фокусатора для реализации перемещений эллипсов и отрезков произвольной ориентации (в том числе с их одновременным поворотом) были получены [18], и соответствующие перемещения световых полей реализованы экспериментально. Так, два последних столбца на рис.3 иллюстрируют перемещение и поворот светового поля в виде эллипса.

Важно отметить, что управлять световыми полями – их формой и размерами – можно очень плавно (теоретически непрерывно). Такая возможность обеспечивается использованием в ЖК фокусаторе сплошного управляющего электрода для формирования распределения напряже-

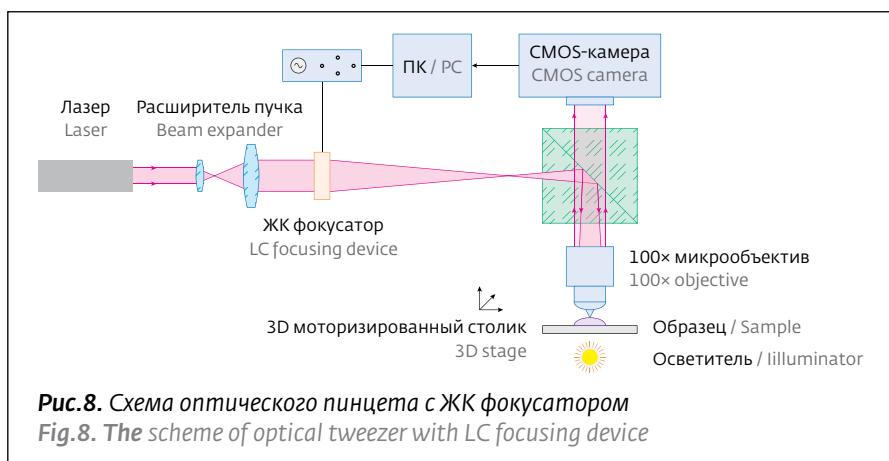


Рис.8. Схема оптического пинцета с ЖК фокусатором
Fig.8. The scheme of optical tweezer with LC focusing device

Control of Orientation and Position of Light Segments and Ellipses

Distributions in the form of segments or ellipses can be turned (their orientation can be changed relative to aperture boundaries) and moved as well. The task of movement of the fields generated by LC focusing device in the form of ellipses with random orientation or distributions in the form of light segments is significantly complicated in comparison with the task of movement of intensity distribution in the form of concentric rings or focused spots. However, the ratios between focusing device parameters for the movement of ellipses and segments with random orientation (also with their simultaneous turn) were obtained even for these cases [18], and the relevant movements of light fields were performed experimentally. Thus, two last columns in Figure 3 illustrate the movement and turn of light field in the form of ellipse.

It is important to note that control of light fields (their shape and size) can be performed very gradually (theoretically, continuously). Such capability is provided by the use of solid control electrode in LC focusing device for the formation of voltage distribution in the aperture area. It allows obtaining the smooth continuous profile of phase delay and gradually changing the voltage distribution on focusing device aperture by means of variation of potentials in contact electrodes. Practically, the capability of smooth control is restricted by the discreteness of control voltages supplied from control unit and it can be enhanced at the expense of reduction of discreteness degree.

EXPERIMENTS IN MANIPULATION

One of the possible applications of LC focusing device consists in its use in the structure of optical tweezers. For the first time, the experiments in optical micro-manipulation with the use of LC devices with modal

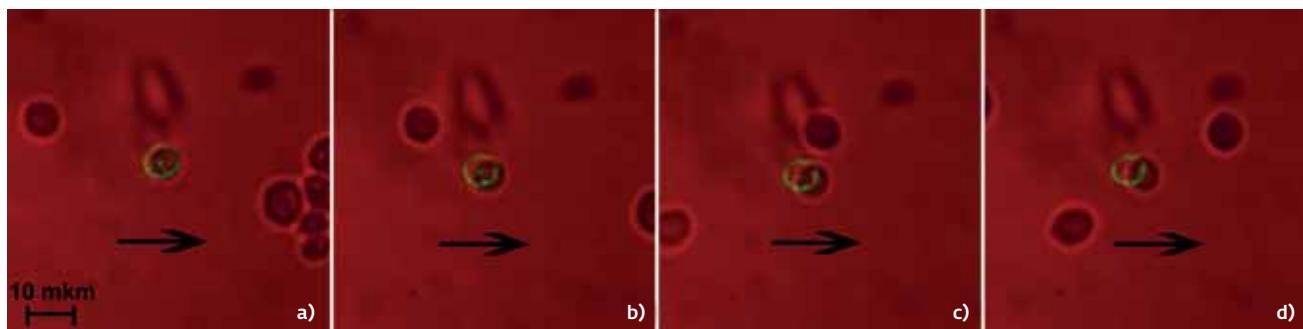


Рис.9. Захват и удержание одиночной клетки *Saccharomyces cerevisiae* оптической ловушкой в форме эллипса (кадры видеосъемки, стрелка показывает направление перемещения столика микроскопа)

Fig. 9. The capture and confinement of a single *Saccharomyces cerevisiae* cell with optical trap in the shape of ellipse (frames of video recording). The arrow shows the direction of the microscope stage movement

ний в области апертуры. Это позволяет получить гладкий непрерывный профиль фазовой задержки и плавно менять распределение напряжения на апертуре фокусатора путем изменения потенциалов на контактных электродах. На практике возможность плавного управления ограничивается дискретностью управляющих напряжений, подаваемых с блока управления, и может быть улучшена за счет уменьшения степени дискретности.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МАНИПУЛЯЦИИ

Одним из возможных применений ЖК фокусатора является его использование в схеме оптического пинцета. Впервые эксперименты по оптической микроманипуляции с использованием ЖК устройств с модальным принципом управления были реализованы авторами работы [19]. ЖК линза выполняла дополнительную фокусировку излучения в точку на требуемом расстоянии. Перемещение микрообъекта осуществлялось с помощью двумерного ЖК дефлектора (призмы), который позволял менять угол наклона света, падающего на линзу. Четырехканальный ЖК модулятор позволил совместить обе эти функции, вместе с тем, наряду с управляемыми точечными ловушками, были реализованы контурные ловушки (в виде колец и эллипсов) [20], С-образные ловушки [20], ловушки в виде световых отрезков [21, 22].

Отличительной особенностью ЖК фокусатора является то, что он работает в режиме пропускания (хотя при необходимости может быть реализован и режим отражения), что позволяет конструктивно упростить схему встраивания его в оптический манипулятор (рис.8). Были реали-

зованы эксперименты по захвату и удержанию одиночной клетки *Saccharomyces cerevisiae* оптической ловушкой в форме эллипса (рис.9). Для этого в оптическом манипуляторе были реализованы ловушки в виде кольца и эллипса [20]. Управление ловушками было осуществлено с помощью двухмерного ЖК дефлектора (призмы), который позволял менять угол наклона света, падающего на линзу. Четырехканальный ЖК модулятор позволял совместить обе эти функции, вместе с тем, наряду с управляемыми точечными ловушками, были реализованы контурные ловушки (в виде колец и эллипсов) [20], С-образные ловушки [20], ловушки в виде световых отрезков [21, 22].

The distinctive feature of LC focusing device consists in the fact that it operates at transmission regime (although, if necessary, the reflection mode can be executed), which allows simplifying constructively the scheme of its incorporation into optical manipulator (Fig. 8). Different experiments in capture and manipulation of single micro-particles and their groups were carried

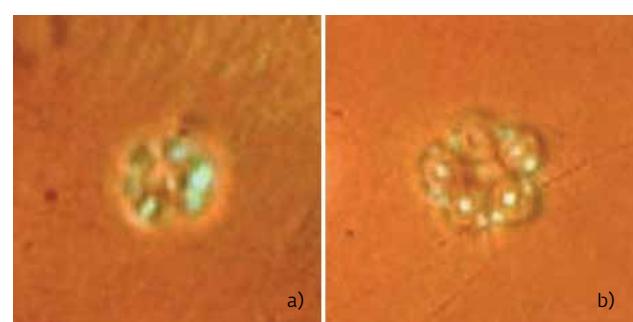


Рис.10. Захват прозрачных микрообъектов с размерами, существенно меньшими, чем диаметр кольцевой ловушки: *e.coli* (0,7–0,9 μm) и сферы латекса (2 μm)

Fig. 10. The capture of transparent objects of a size substantially smaller than the diameter of the ring trap a) *e.coli* (0.7–0.9 μm); b) latex spheres (2 μm)

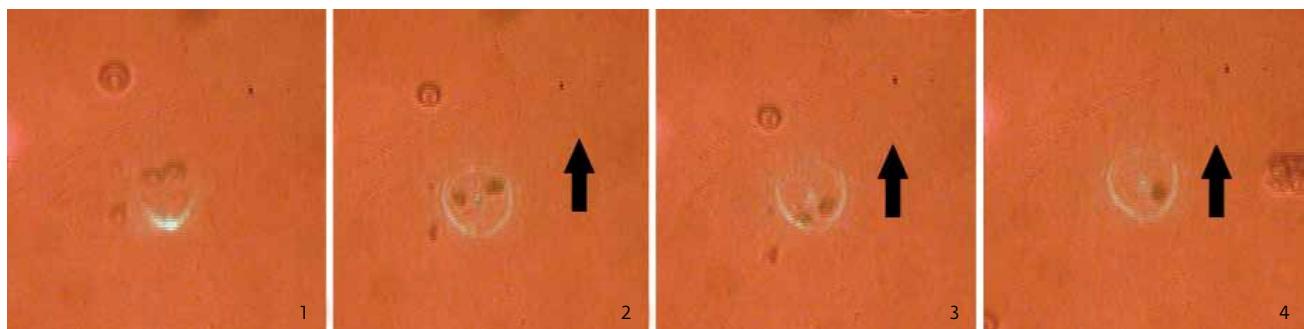


Рис.11. Захват и удержание поглощающих микрочастиц оксида алюминия размером 1,5 мкм С-образной ловушкой, перестраиваемой в кольцо.

Fig. 11. The capture and keeping of absorbing micro-particles of aluminum oxide with the size of 1.5 μm by C-shaped trap, which can be transformed into the ring

зованы разнообразные эксперименты по захвату и манипулированию отдельными микрочастицами, а также их группами. В качестве микрообъектов использовались взвешенные в воде сферы латекса различных диаметров, частицы алюминия, серебра, и их конгломераты, а также микрообъекты биологического происхождения. На рис.9-14 приведены кадры видеосъемки соответствующих экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемый четырехканальный ЖК модулятор позволяет реализовать фазовые задержки в виде усеченных конусов – цилиндрического и эллиптического с произвольной ориентацией, а также в виде квазицилиндрической линзы. Таким образом, используя всего четыре управляющих контакта, можно формировать разнообраз-

out. Latex spheres with various diameters weighed in water, particles of aluminum, silver and their conglomerations, micro-objects with biological origin were used in the capacity of micro-objects. Frames from video with the relevant experiments are given in Figures 9-14.

CONCLUSION

Considered 4-channel LC modulator allows executing the phase delays in the form of truncated cones – cylindrical and elliptical with random orientation and in the form of quasi-cylindrical lens. Thus, using only four control contacts it is possible to generate the various intensity distributions in the form of rings, ellipses and segments with random orientation; also it is possible to control gradually their size, position, shape using the solid electrode at the expense of potential variation. Use of LC focusing device in the

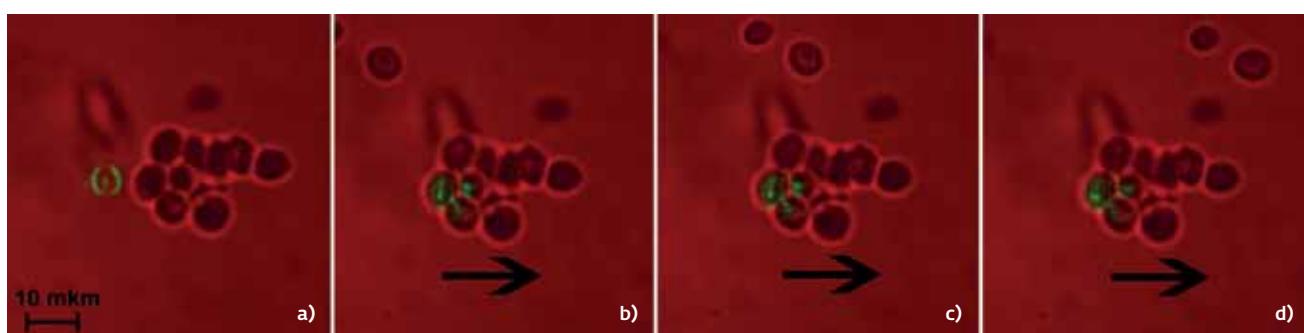


Рис.12. Захват и удержание крупной микрочастицы (агрегированные клетки дрожжей). Возможность захвата и перемещения микрообъектов более 10 мкм контурной ловушкой позволит при захвате ядерных клеток избегать воздействия на ядро

Fig. 12. The capture and confinement of a large microparticle (the yeast cells, aggregated into a single particle). The arrow shows the direction of the microscope stage movement. The ability to manipulate micro-objects larger than 10 μm with contour traps will make it possible to avoid the influence on nucleus during the capture of eukaryotic cells

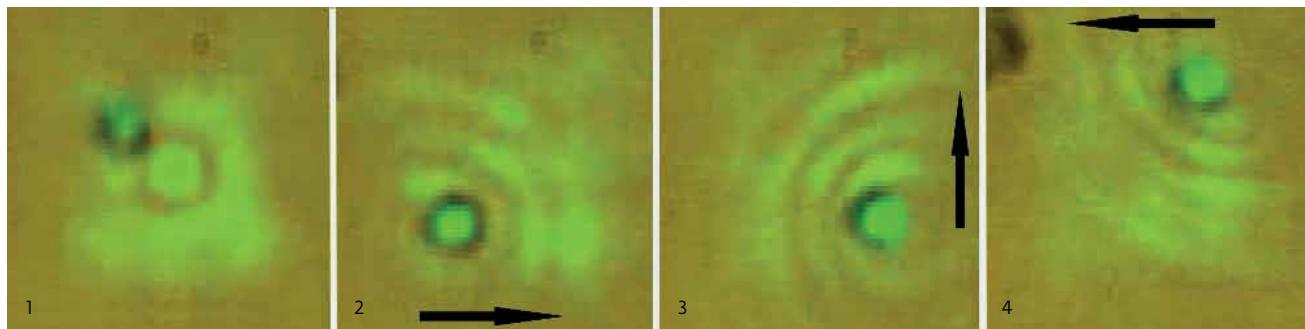


Рис.13. Перемещение сферы латекса диаметром 1,2 мкм точечной оптической ловушкой, сформированной с помощью ЖК фокусатора

Fig. 13. Relocation of a 1.2 μm -diameter latex sphere realized with the point trap formed with the use of LC focusing device

ные распределения интенсивности в виде колец, эллипсов и отрезков произвольной ориентации и за счет использования сплошного электрода очень плавно управлять их размерами, положением, формой за счет изменения потенциалов. Использование ЖК фокусатора в схеме оптического пинцета позволяет реализовать динамически управляемые точечные и контурные оптические ловушки, а также ловушки в виде световых отрезков. При этом за счет того, что рассматриваемый фокусатор работает в режиме пропускания, схема оптического пинцета упрощается, уменьшаются его габариты. Заметим, что ЖК фокусатор может быть выполнен в конструктивном варианте для работы на отражение. В силу рефракционного характера действия четырехканальный ЖК модулятор обладает большей эффективностью по сравнению с многопиксельными модуляторами, которые характеризуются дифракционными потерями. Устройство работает в видимом и ближнем ИК-диапазонах и обладает достаточно высокой лучевой прочностью: эксперименты про-

structure of optical tweezers allows implementing dynamically controlled point and contour optical traps and traps in the form of light segments. At the same time, due to the fact that considered focusing device operates at transmission regime, the scheme of optical tweezers is simplified and their dimensions become smaller. It should be noted that LC focusing device can be constructively implemented in the variant for reflection operation. Due to refraction character of operation, 4-channel LC modulator has greater efficiency in comparison with multi-pixel modulators, which are characterized by diffraction losses. The device operates within visible and near IR ranges and has quite high radiation strength: experiments were carried out at the densities of radiation power supplied to the focusing device up to 30 W/cm^2 .

Thus, taking into account the technological peculiarities and relative low cost, the functional capabilities of 4-channel LC modulator make it possible to speak of its application perspectiveness in various applied tasks.

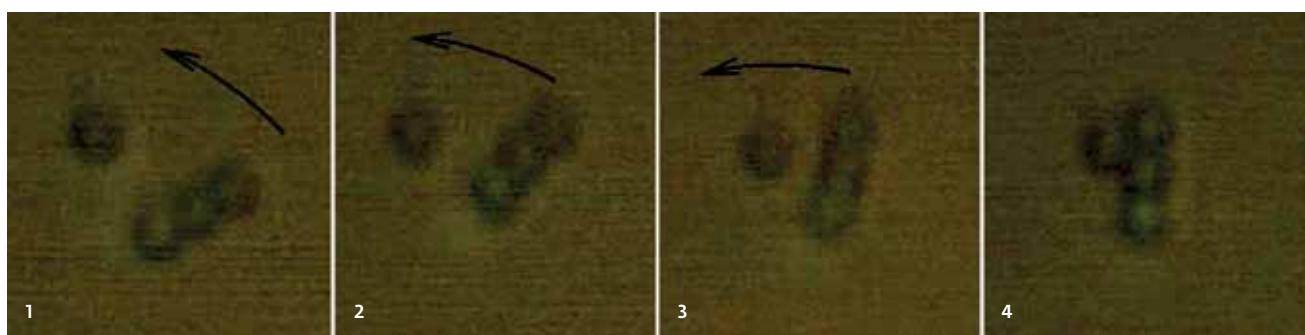


Рис.14. Захват и поворот нескольких частиц латекса (диаметр 1,2 мкм) оптической ловушкой в виде светового отрезка

Fig. 14. The capture and turn of several particles of latex (diameter 1.2 μm) by optical trap in the form of light segment



водились при плотностях мощности излучения, падающей на фокусатор, до 30 Вт/см².

Таким образом, функциональные возможности четырехканального ЖК модулятора с учетом его технологических особенностей и относительно невысокой стоимости позволяют говорить о перспективности его использования в различных прикладных задачах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abramochkin E.G., Vasiliev A.A., Vashurin P.V., Zhmurova L.I., Ignatov V.A., Naumov A.F. Controlled liquid crystal lens. – Prepr. PN Lebedev Phys. Inst., 1988, 194, 18.
2. Naumov A.F., Loktev M.Y., Guralnik I.R., Vdovin G.V. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control. – Opt. Lett., 1998, v. 23 p.992–994.
3. Nose T., Masuda S., Sato S. Optical properties of a hybrid-aligned liquid crystal microlens. – Molecular Crystals and Liquid Crystals, 1991, v.199, p.27–35.
4. Nose T., Masuda S., Sato S. A liquid crystal microlens with hole-patterned electrodes on both substrates. – Jpn. J. Appl. Phys., 1992, v.31, p.1643–1646.
5. Vdovin G.V., Guralnik I.R., Kotova S.P., Loktev M.Y., Naumov A.F. Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. I. Theory. – Quantum Electron., 1999, v.29, p.256–260.
6. Vdovin G.V., Guralnik I.R., Kotova S.P., Loktev M.Y., Naumov A.F. Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. II. Numerical optimisation and experiments. – Quantum Electron., 1999, v.29 p.261–264.
7. Kotova S.P., P. Clark, Guralnik I.R., Klimov N.A., Kvashnin M.Y., Loktev M.Y., Love G.D., Naumov A.F., Rakhmatulin M.A., Saunter C.D., Vdovin G.V., Zayakin O.A. Technology and electro-optical properties of modal liquid crystal wavefront correctors. – J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2003, v. 5, №5, S231–8.
8. Vdovin G.V., Loktev M.Y., Guralnik I.R., Zayakin O.A., Kotova S.P., Naumov A.F., Patlan V.V., Samagin S.A., Klimov N.A. Modal liquid crystal wavefront correctors. – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2008, v. 72, № 1, p.71–77.
9. Kirby A.K., Hands P.J., Love G.D. Liquid crystal multi-mode lenses and axicons based on electronic phase shift control. – Opt. Express, 2007, v.15, p.13496–13501.
10. Fraval N., de Bougrenet de la Tocnaye J.L. Low aberrations symmetrical adaptive modal liquid crystal lens with short focal lengths. – Appl. Opt., 2010, v.49, p.2778–2783.
11. Algorri J.F., Urruchi V., Bennis N., Sánchez-Pena J.M. Modal liquid crystal microaxicon array. – Opt. Lett., 2014, v. 39, p.3476–3479.
12. Algorri J.F., Love G.D., Urruchi V. Modal liquid crystal array of optical elements. – Opt. Express, 2013, v.21, p.24809–24818.
13. Algorri J.F., Urruchi V., García-Cámarra B., Sánchez-Pena J.M. Generation of Optical Vortices by an Ideal Liquid Crystal Spiral Phase Plate. – Electron Device Letters, IEEE, 2014, v. 35, Issue: 8, p.856–858.
14. Kotova S.P., Patlan V.V., Samagin S.A. Tunable liquid-crystal focusing device. 1. Theory. – Quantum Electronics, 2011, v. 41 (1), p.58–64.
15. Kotova S.P., Patlan V.V., Samagin S.A. Tunable liquid-crystal focusing device. 2. Experiment. – Quantum Electronics, 2011, v. 41 (1), p.65–70.
16. Kotova S.P., Patlan V.V., Samagin S.A. Focusing light into a line segment of arbitrary orientation using a four-channel liquid crystal light modulator. – Journal of Optics, 2013, v.15 (3), p.035706.
17. Котова С.П., Майорова А.М., Самагин С.А. Анализ световых полей, формируемых ЖК фокусатором, применительно к задачам трехмерной оптической манипуляции. – Известия высших учебных заведений. Физика, 2015, т. 58, № 10, с.22–28.
18. Kotova S., Mayorova A., Samagin S. Tunable 4-channel LC focusing device: summarized results and additional functional capabilities. – Journal of Optics, 2015, v.17, №5, p.055602.
19. Ph. J. W. Hands, S.A. Tatarkova, A.K. Kirby, G.D. Love. Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells. – Optics express, 2006, v.14, №10, p.4525–4537.
20. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Самагин С.А. Формирование контурных оптических ловушек с помощью 4-х канального ЖК фокусатора. – Квантовая электроника, 2014, т.44, с.1157–1164.
21. Korobtsov A., Kotova S., Losevsky N., Mayorova A., Patlan V., Samagin S. Optical trap formation with a four-channel liquid crystal light modulator. – Journal of Optics, 2014, v.16, p.035704.
22. Korobtsov A., Kotova S., Losevsky N., Mayorova A., Samagin S. Line optical traps formed by LC SLM. – Journal of Biomedical Photonics & Engineering, 2015, v.1, № 1, p.64–69.