

Использование четырехканального ЖК фокусатора для формирования контурных оптических ловушек

А. В. Коробцов,^{*} С. П. Котова,[†] Н. Н. Лосевский,[‡] А. М. Майорова,[§] С. А. Самагин[¶]
*Самарский филиал Физического института имени П. Н. Лебедева РАН,
 Россия, 443011, Самара, Ново-Садовая, д. 221*

Представлены результаты экспериментов по использованию жидкокристаллического перестраиваемого фокусатора для формирования и динамического управления, так называемыми, контурными световыми ловушками, а также для манипулирования с их помощью микрообъектами различной природы.

PACS: 42.79.Kg, 42.79.Nr, 06.60.Sx.

УДК: 535.3, 535.212, 535.214.

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

Интерес к оптическим ловушкам в виде световых контуров с выраженным минимумом интенсивности в центре связан с возможностью захвата непрозрачных объектов, либо объектов с показателем преломления меньше, чем у окружающей среды, а также задачей минимизации воздействия излучения на захватываемые прозрачные объекты. Эти особенности интересны для биомедицинских исследований, в задачах микрокромеханики и микроинженерии. С точки зрения применения рассматриваемых ловушек в указанных областях представляется актуальным создание компактных и недорогих систем оптической манипуляции, в которых динамическое управление пространственной структурой ловушек осуществляется технологически простыми способами. Такую возможность предоставляет предложенный и разработанный в Самарском филиале ФИАН четырехканальный перестраиваемый ЖК фокусатор света [1, 2]. У данного ЖК модулятора меньше управляющих контактов (всего 4) по сравнению с коммерческими пространственно-временными ЖК модуляторами, что снижает его возможности по формированию световых полей. Однако он обладает достаточными функциональными возможностями, хорошей энергетической эффективностью и более широким рабочим спектральным диапазоном, имеет существенно более простую конструкцию, систему управления и, соответственно, становится значительно дешевле.

Используемый жидкокристаллический фокусатор представляет собой устройство, реализованное на основе скрещенных подложек цилиндрических модалных ЖК линз, объединённых в одну конструкцию (см. рис. 1).

Слой нематического ЖК заключён между двумя стеклянными подложками, на которые нанесены про-

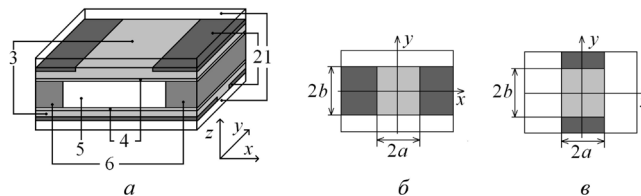


Рис. 1: Схема ЖК фокусатора (а): 1 — стеклянные подложки, 2 — контактные электроды, 3 — высокоомный проводящий слой, 4 — ориентирующее покрытие, 5 — слой ЖК, 6 — прокладка. Геометрия контактов для верхней (б) и нижней (в) подложек

зрачные высокоомные покрытия (поверхностное сопротивление может быть от 100 кОм/квadrat и до единиц МОм/квadrat) и низкоомные непрозрачные полосковые контакты. Подложки располагаются таким образом, чтобы их контактные электроды были перпендикулярны друг другу. Полученное устройство имеет прямоугольную апертуру. Толщина слоя ЖК задаётся прокладками, а первоначальная планарная ориентация — нанесёнными на подложки ориентирующими покрытиями. Подробно принцип действия устройства, его математическая модель и основные режимы работы описаны в [1, 3]. В частности, было показано, что в режиме работы с малым модалным параметром 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 типа. Распределения напряжения с линиями в виде эллипсов, окружностей и параллельных прямых формируют фазовые профили в виде эллиптического, кругового конусов и поверхности цилиндрической линзы. Изменяя амплитуду и/или фазу приложенных к контактам потенциалов, можно управлять положением центров основания кругового и эллиптического конусов, а также ориентацией осей эллиптического конуса и его эксцентриситетом. Такие фазовые задержки позволяют реализовать

^{*}E-mail: korobtsov82@gmail.com

[†]E-mail: kotova@fian.smr.ru

[‡]E-mail: losevsky@fian.smr.ru

[§]E-mail: mayorovaal@gmail.com

[¶]E-mail: samagin@fian.smr.ru

точечные оптические ловушки с контролируемым положением в плоскости манипуляции [4], ловушки в виде отрезка с заданной ориентацией [4], а также ловушки в форме кольца.

В экспериментах по формированию световых полей использовались образцы перестраиваемого ЖК фокусатора с квадратными апертурами со сторонами 1, 2 и 5 мм. Спектральный диапазон, в котором может происходить модуляция света, определяется типом используемого ЖК и, в нашем случае, включает в себя видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Эксперименты проводились на различных длинах волн He-Ne (633 нм), твердотельного (532 нм) и полупроводниковых лазеров (650 и 870 нм). На рисунках 2 и 3 показаны картины световых полей в виде кольца, полученные при использовании в качестве источника излучения полупроводниковых лазеров. Диапазон амплитуд управляющих напряжений составляет от 0 до 12,5 В, частота 500 Гц. Продемонстрирована возможность управления положением светового кольца в пределах апертуры и его размерами посредством изменения соответствующим образом потенциалов на контактах ЖК фокусатора (см. рис. 2), а также возможность управления формой ловушки за счет изменения параметров управляющего напряжения. Так, на рис. 3 демонстрируется преобразование кольцевой ловушки в эллиптическую, а затем в с-образную ловушку. Такое управление формой ловушки может быть полезным для захвата поглощающих микрообъектов.

Для проведения экспериментов по манипуляции ЖК фокусатор встраивался в схему оптического пинцета. Для формирования ловушек использовался твердотельный лазер с диодной накачкой с длиной волны излучения 0,53 мкм. Лазерный пучок направлялся через согласующий коллиматор на ЖК-фокусатор, который формировал в заданной плоскости требуемое распределение светового поля. Далее пучок заводился в 100х объектив модернизированного биологического микроскопа XSP-104, в результате в плоскости манипуляции воспроизводилось уменьшенное распределение интенсивности. Под кюветой с микрообъектами был расположен осветитель, необходимый для визуализации эксперимента. Запись и отображение эксперимента происходило на ПЗС-камеру (ДСМ-130), подключенную к компьютеру. Управление фокусатором осуществлялось через графический интерфейс пользователя, позволяющего задавать амплитуду и фазу управляющего напряжения на каждом из контактов. Эксперименты по манипуляции взвешенными в воде сферами латекса с характерными диаметрами 1,2 и 3,2 мкм посредством точечной оптической ловушки и ловушки в виде светового отрезка, сформированными ЖК фокусатором, были описаны нами ранее [4]. С помощью световых ловушек в форме колец, сформированных 4-х канальным 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. Удержание микрочастиц осуществлялось при перемещении подложки, при этом захваченная частица оставалась внутри светового кольца (см. рис. 4).

Проведены эксперименты по одновременному захвату непрозрачной частицы в центре кольца (минимумом интенсивности) и прозрачной частицы световым контуром (максимумом интенсивности).

Таким образом, продемонстрированы возможности использования 4-х канального ЖК модулятора для оптического захвата и динамического манипулирования непрозрачными частицами, что актуально в биомедицинских задачах и задачах микромеханики, а также для формирования универсальных ловушек для одновременного захвата прозрачных и непрозрачных частиц.

Отметим особенности предлагаемого устройства для формирования оптических ловушек. Модулятор работает в режиме пропускания (хотя при необходимости может быть реализован и режим отражения), что позволяет конструктивно упростить схему встраивания его в манипулятор. Эксперименты проводились при плотностях мощности излучения, падающей на фокусатор, до 30 Вт/см². Это значительно превышает предельную допустимую мощность для многоэлементных ЖК ПВМС, например, для HOLO EYE 1080 (паспортное значение 2 Вт/см²). Диапазон световых волн, на которых может происходить модуляция света, определяется типом используемого ЖК и, в нашем случае, включает в себя видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра.

Важной особенностью ЖК фокусатора является то, что распределение напряжения в области апертуры формируется посредством сплошного электрода, в отличие от многоэлементных ЖК ПВМС, где используется дискретный набор управляющих электродов. В результате изменение потенциалов на контактных электродах приводит к плавному изменению распределения напряжения на апертуре фокусатора, благодаря чему, как отмечалось выше, шаг перемещения и угол поворота распределений теоретически могут быть бесконечно малыми. На практике эти значения ограничиваются дискретностью управляющих напряжений, подаваемых с блока управления, и могут быть улучшены за счет уменьшения степени дискретности. С другой стороны, благодаря использованию сплошного электрода ЖК фокусатором формируется гладкий непрерывный профиль фазовой задержки. Это также отличает рассматриваемое устройство от многопиксельных ЖК ПВМС, где используется дифракционный метод формирования волнового фронта. Дифракционные методы являются существенно более чувствительными к точности задания фазового распределения на определенной длине волн.

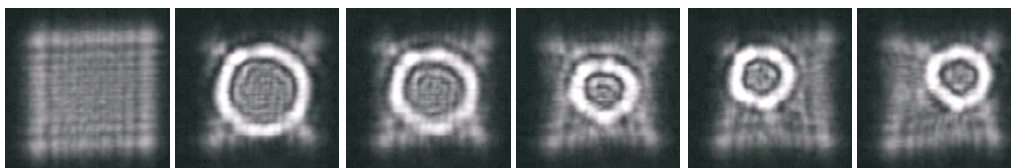


Рис. 2: Управляемая оптическая ловушка в форме кольца. Длина волны 870 нм

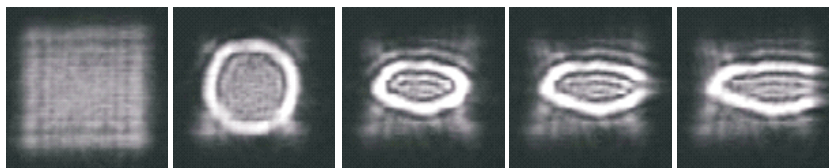


Рис. 3: Перестраиваемая ловушка. Длина волны 650 нм. При изменении параметров управляющих сигналов кольцевая ловушка трансформируется в эллиптическую, а затем в с-образную ловушку

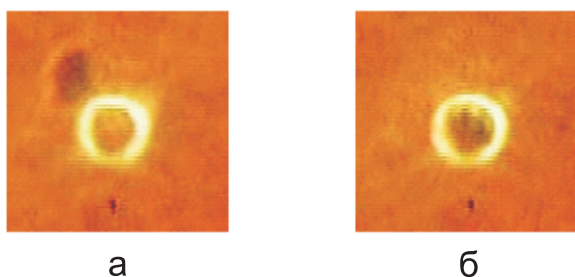


Рис. 4: Захват кольцевой ловушкой частицы Al_2O_3 : а — частица рядом с ловушкой, б — частица удерживается ловушкой

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Фундаментальные аспекты физики и технологии полупроводниковых лазеров, как основных элементов фотоники и квантовой электроники» и РФФИ (проект № 14-02-31376 мол_а).

- [1] Котова С.П., Патлань В.В., Самагин С.А. Квантовая электроника. **41**, № 1. С. 58. (2011).
 [2] Котова С.П., Патлань В.В., Самагин С.А. Квантовая электроника. **41**, № 1. С. 64. (2011).
 [3] Kotova S., Patlan V., Samagin S. Journal of Optics. **15**,

- №. 3. P.035706. (2013).
 [4] Korobtsov A. et al. Journal of Optics. **16**. No. 3. P.035704. (2014).

Contour optical traps formation with a four-channel liquid crystal light modulator

A. V. Korobtsov^a, S. P. Kotova^b, N. N. Losevsky^c, A. M. Mayorova^d, S. A. Samagin^e

¹Samara Branch of the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.
 Samara 443011, Russia

E-mail: ^akorobtsov82@gmail.com, ^bkotova@fian.smr.ru, ^closevsky@fian.smr.ru, ^dmayorovaal@gmail.com,
^esamagin@fian.smr.ru

The results of experiments on the use of a liquid crystal tunable focusator, for the formation and dynamic control of so-called contour optical traps, are presented. The generated traps were further used for the manipulation of various micro-objects.

PACS: 42.79.Kr, 42.79.Hp, 06.60.Sx.

Keywords: optical traps, microobjects, dynamic manipulation, liquid crystals spatial light modulators.

Сведения об авторах

1. Коробцов Александр Викторович — канд. физ.-мат. наук, инженер; тел.: (846) 335-57-31, e-mail: korobtsov82@gmail.com.
2. Котова Светлана Павловна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией; тел.: (846) 335-57-31, e-mail: kotova@fian.smr.ru.
3. Лосевский Николай Николаевич — научный сотрудник; тел.: (846) 335-57-31, e-mail: losevsky@fian.smr.ru.
4. Майорова Александра Михайловна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (846) 335-57-31, e-mail: mayorovaal@gmail.com.
5. Самагин Сергей Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (846) 335-57-31, e-mail: samagin@fian.smr.ru.