

Перестраиваемая жидкокристаллическая астигматическая пластинка

С.П. Котова¹, А.М. Майорова¹, Д.В. Прокопова^{1,2}, С.А. Самагин¹

¹Самарский филиал ФИАН, Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Предложена компактная перестраиваемая жидкокристаллическая астигматическая пластина. По сути устройство является пространственным модулятором модального типа со специальной конфигурацией электродов. Преимуществами устройства по сравнению с многопиксельными пространственными модуляторами являются относительная дешевизна и возможность реализовать компактные и технологически простые схемы. Результаты численного моделирования работы устройства демонстрируют, что при определенных напряжениях, прикладываемых к контактным электродам, формируемые распределения напряжения и фазовой задержки имеют вид цилиндрических поверхностей, и ЖК устройство действует как астигматическая пластина. Рассматриваются различные режимы работы устройства. Показана возможность работы в качестве усеченного аксикона.

1. Введение

Особенностью жидкокристаллических устройств модального типа является наличие в их конструкции однородного высокоомного прозрачного слоя – управляющего электрода, что позволяет использовать малое количество электродов и низкие управляющие напряжения. К устройствам такого типа относятся адаптивные линзы различных конфигураций, корректоры волнового фронта с перестраиваемой функцией отклика, адаптивные линзы с оптически управляемым фокусным расстоянием [1, 2-5], двумерные матрицы управляемых аксиконов [6-8], ЖК спиральные пластинки для реализации оптических вихрей с высокой энергетической эффективностью [9-12], ЖК фокусаторы [13-17]. Фокусирующими свойствами линз, параметрами формируемых оптических полей можно управлять за счет изменения амплитуд и частот прикладываемых напряжений, а изменение режимов управления позволяет формировать с помощью модальных ЖК линз [18] наклонные и астигматические волновые фронты, реализовать микроаксиконы. Несмотря на то, что с точки зрения функциональных возможностей ЖК устройства модального типа не могут сравниться с многопиксельными ЖК модуляторами, они представляют интерес в качестве относительно недорогих технологически простых адаптивных устройств для различных практических применений при решении задач в биомедицине, астрономии, промышленности.

В настоящей статье предлагается конфигурация ЖК модулятора модального типа, которая в зависимости от прикладываемых напряжений может использоваться в качестве управляемой астигматической пластины либо усеченного аксикона. Особенностью ЖК астигматической пластинки является возможность формировать фазовую задержку с цилиндрическим профилем

и управлять величиной астигматизма, вносимого в волновой фронт проходящего светового пучка за счет изменения амплитуды прикладываемых к контактам напряжений.

2. Принцип действия ЖК астигматической пластины

ЖК астигматическая пластина состоит из двух стеклянных подложек с нанесенным ориентирующим покрытием, между которыми находится слой нематического ЖК. На одну из подложек, например, верхнюю, наносят прозрачное высокоомное покрытие, формируя управляющий электрод. Геометрия контактных электродов на этой подложке изображена на рисунке 1. Контактные электроды (изображены черным цветом) нанесены на линейные участки границы вдоль краёв управляющего электрода (изображён серым цветом). На других участках границы, имеющих вид прямых отрезков, никаких покрытий не нанесено (свободный край). На другую подложку (в рассматриваемом случае – нижнюю) наносится прозрачное низкоомное однородное проводящее покрытие (например, ИТО).



Рисунок 1. Геометрия управляющего электрода. Серый цвет – управляющий электрод, черный цвет – контактные электроды.

Принцип действия устройства основан на формировании особого распределения электрического напряжения по апертуре за счет формы электропроводящего слоя и специального расположения электродов. Под действием напряжения в ЖК слое происходит переориентация молекул, что приводит к изменению показателя преломления среды и, соответственно, пространственного распределения фазовой задержки, вносимой ЖК слоем в проходящую световую волну.

Распределение потенциала на верхней подложке (с нанесенным высокоомным покрытием) будет определяться уравнением Лапласа:

$$\Delta_s \varphi_1 = 0. \quad (1)$$

Распределение потенциала на нижней подложке (с низкоомным покрытием) считается постоянным и его можно положить равным нулю ($\varphi_2 = 0$). Напряжение (U), приложенное к слою ЖК имеет вид:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

Граничные условия для контактных электродов верхней подложки будут следующие. На контактных электродах заданы потенциалы: φ_{11} (правый), φ_{12} (верхний), φ_{13} (левый), φ_{14} (нижний). На остальных участках границы нормальная производная потенциала равна нулю. При этом

$$\varphi_{1j} = A_{1j} \exp(i\alpha_{1j}), \quad (3)$$

где A_{1j} и α_{1j} – амплитуды и фазы соответствующих потенциалов, i – мнимая единица, $j = 1, 2, 3, 4$.

Решая рассматриваемую краевую задачу, получим соответствующие распределения напряжения по апертуре устройства и фазовой задержки, вносимой ЖК слоем в световую волну.

3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование проводилось для следующих параметров ЖК устройства: апертура предполагалась квадратной с длиной стороны 3 мм, длины контактов - 2 мм, толщина слоя ЖК - 25 мкм. Распределение напряжения зависит от прикладываемых потенциалов. Для расчёта

фазовой задержки использовалась экспериментальная вольт-фазная характеристика, которая была получена для ЖК фокусатора с апертурой 1x1 мм, нормированная на толщину слоя.

На рисунке 2 представлены распределения напряжения (а), фазовой задержки (б) и поляризация интерферограмма для значений потенциалов, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Примеры значений амплитуд и фаз потенциалов.

A_{11} , В	α_{11} , град	A_{12} , В	α_{12} , град	A_{13} , В	α_{13} , град	A_{14} , В	α_{14} , град
3	0	2	0	3	0	2	0

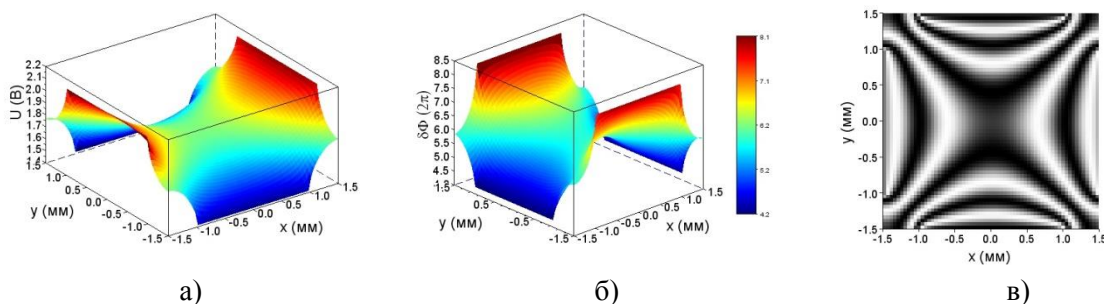


Рисунок 2. а) распределение напряжения по апертуре, б) профиль фазовой задержки, в) поляризация интерферограмма для значений потенциалов, представленных в таблице 1.

Как видно из рисунка, в случае равенства амплитуд потенциалов на противоположных контактах (при этом амплитуды на соседних контактах между собой не равны) распределения имеют вид цилиндрических поверхностей, и ЖК устройство действует как астигматическая пластина. На рисунке 3 представлены примеры распределения интенсивности и фазы при освещении ЖК устройства плоской однородной волной. Плоскость наблюдения находится на расстоянии 100 см от ЖК модулятора.

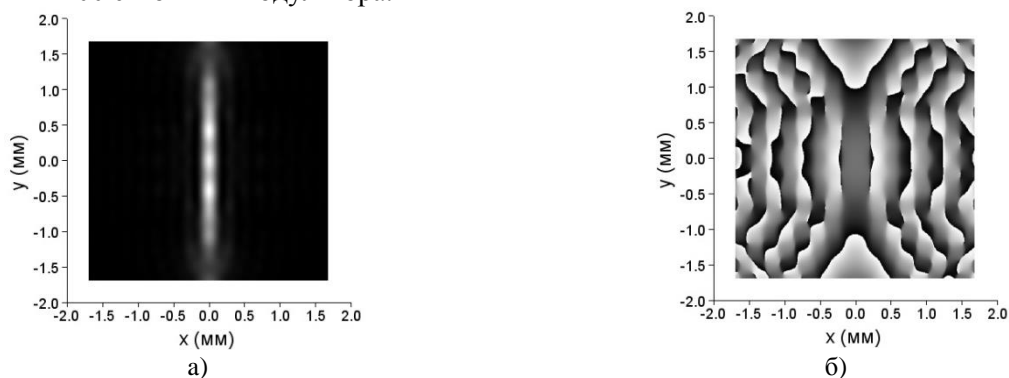


Рисунок 3. Световое поле на расстоянии 100 см от устройства: а) распределение интенсивности, б) распределение фазы поля.

Однако формирование светового отрезка не является целью настоящей работы. Поскольку возможность формирования управляемого светового отрезка с помощью ЖК устройства модального типа была продемонстрирована нами ранее в работах [15, 16]. Для этой цели использовался 4-х канальный ЖК модулятор (ЖК фокусатор) – устройство, в котором высокоомное покрытие наносится на обе подложки, также как и контактные электроды, которые наносят по два на каждую из подложек, формируя квадратную апертуру.

Важной особенностью конфигурации ЖК устройства, предлагаемого в данной работе, является то, что оно работает как астигматическая пластина. Используя сферическую линзу, на некотором расстоянии z от плоскости формирования вертикального отрезка, можно сформировать горизонтальный отрезок. Расстоянием z можно управлять, меняя амплитуду напряжения на электродах. Соответственно с использованием предлагаемого устройства за счет изменения напряжения устройство можно корректировать астигматизм оптических систем.

Как уже отмечалось, астигматический волновой фронт был реализован в работе [18]. Основными отличиями предлагаемой нами астигматической пластины является то, что высокоомное покрытие и контактные электроды наносятся лишь на одну из подложек. Кроме того, в [18] используется двухчастотный режим управления. Наше устройство позволяет работать на одной частоте.

4. Режим работы усеченного аксикона

Предлагаемое устройство может работать как усеченный круглый аксикон. Для этого нужно аналогично случаю формирования кругового конуса в ЖК фокусаторе [13, 15] подать на контакты потенциалы одинаковые по амплитуде и со сдвигом фаз $\pi/2$. Примеры таких потенциалов представлены в таблице 2, а соответствующие распределения интенсивности (а), фазы (б) и поляризационные интерферограммы (в) – на рисунке 4.

Таблица 2. Примеры значений амплитуд и фаз потенциалов для реализации аксикона.

A_{11} , В	α_{11} , град	A_{12} , В	α_{12} , град	A_{13} , В	α_{13} , град	A_{14} , В	α_{14} , град
10	0	10	90	10	180	10	270

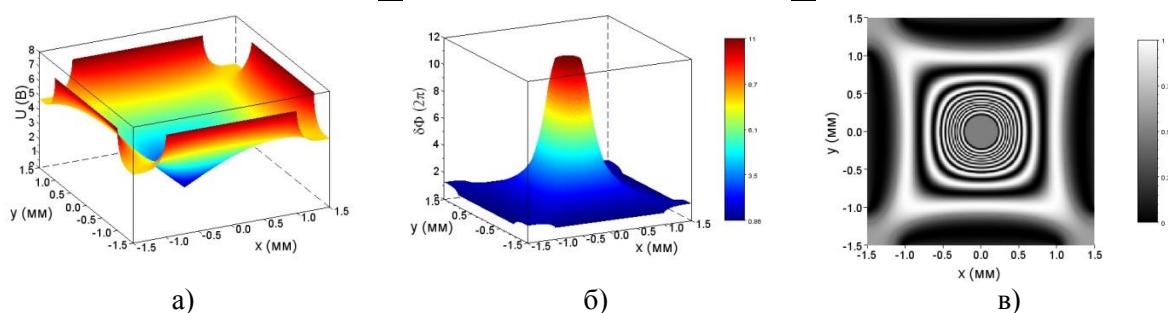


Рисунок 3. а) распределение напряжения по апертуре, б) профиль фазовой задержки, в) поляризационная интерферограмма для значений потенциалов, представленных в таблице 2.

Распределение фазовой задержки получается в виде усечённой четырёхугольной пирамиды, но вершина близка к круглому конусу. Если апертуру ограничить только центральной частью, то ЖК устройство будет работать как усечённый круглый аксикон: в дальней зоне дифракции фокусируя проходящее через такой транспарант плоское однородное излучение в точку, а в ближней зоне дифракции, формируя световые кольца (поскольку в ближней зоне дифракции в поперечной плоскости точки с максимальной интенсивностью располагаются на контуре кривой, повторяющей форму эквипотенциальных линий профиля напряжения).

5. Заключение

Предложенная схема модального ЖК модулятора в зависимости от прикладываемых напряжений позволяет реализовать перестраиваемую ЖК астигматическую пластину, а также усеченный аксикон. Преимуществами устройства являются возможность очень плавного управления распределениями фазовой задержки, возможность реализации компактных оптических схем на его основе.

6. Литература

- [1] Naumov, A.F. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control / A.F. Naumov, M.Y. Loktev, I.R. Guralnik, G. Vdovin // *Optic Letters*. – 1998. – Vol. 23. – P. 992-994. DOI: 10.1364/OL.23.000992.
- [2] Vdovin, G. Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. I. Theory/ G. Vdovin, I.R. Guralnik, S.P. Kotova, M.Y. Loktev, A.F. Naumov // *Quantum Electron*. – 1999. – Vol. 29. – P. 256-260.

- [3] Vdovin, G. Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. II. Numerical optimisation and experiments / G. Vdovin, I.R. Guralnik, S.P. Kotova, M.Y. Loktev, A.F. Naumov // *Quantum Electron.* – 1999. – Vol. 29. – P. 261-264.
- [4] Kotova, S.P. Technology and electro-optical properties of modal liquid crystal wavefront correctors / S.P. Kotova, P. Clark, I.R. Guralnik, N.A. Klimov, M.Y. Kvashnin, M.Y. Loktev, G.D. Love, A.F. Naumov, M.A. Rakhmatulin, C.D. Saunter, G.V. Vdovin, O.A. Zayakin // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2003. – Vol. 5(5). – P. S231-238. DOI: 10.1088/1464-4258/5/5/371.
- [5] Vdovin, G. Modal liquid crystal wavefront correctors / G. Vdovin, M.Y. Loktev, I.R. Guralnik, O.A. Zayakin, S.P. Kotova, A.F. Naumov, V.V. Patlan, S.A. Samagin, N.A. Klimov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2008. – Vol. 72(1) – P. 71-77.
- [6] Algorri, J.F. Tunable liquid crystal cylindrical micro-optical array for aberration compensation / J.F. Algorri, V. Urruchi, N. Bennis, J.M. Sánchez-Pena, J.M. Otón // *Opt. Express.* – 2015. – Vol. 23. – P. 13899-13915. DOI: 10.1364/OE.23.013899.
- [7] Algorri, J.F. Modal liquid crystal array of optical elements / J.F. Algorri, G.D. Love, V. Urruchi // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21. P. 24809. DOI: 10.1364/OE.21.024809.
- [8] Algorri, J.F. Liquid crystal spherical microlens array with high fill factor and optical power / J.F. Algorri, V. Urruchi, N. Bennis, P. Morawiak, J.M. Sánchez-Pena, J.M. Otón // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25. – P. 605-614. DOI: 10.1364/OE.25.000605.
- [9] Algorri, J.F. Generation of optical vortices by an ideal liquid crystal spiral phase plate / J.F. Algorri, V. Urruchi, B. Garcia-Cámara, J.M. Sánchez-Pena // *Electron Device Letters, IEEE.* – 2014. – Vol. 35(8). – P. 856-858. DOI: 10.1109/LED.2014.2331339.
- [10] Albero, J. Liquid crystal devices for the reconfigurable generation of optical vortices / J. Albero, P. Garcia-Martinez, N. Bennis, E. Oton, B. Cerrolaza, I. Moreno, J.A. Davis // *J. Lightwave Technol.* – 2012. – Vol. 30. – P. 3055-3060.
- [11] Kotova, S.P. Tunable modal liquid crystal spiral phase plate / S.P. Kotova, A.M. Mayorova, K.V. Efimova, S.A. Samagin // *Proceedings - International Conference Laser Optics, ICLO, 2018.* – P.196. DOI: 10.1109/LO.2018.8435893.
- [12] Kotova, S.P. Formation of ring-shaped light fields with orbital angular momentum using a modal type liquid crystal spatial modulator / S.P. Kotova, A.M. Mayorova, S.A. Samagin // *Journal of Optics.* – 2018. – Vol. 20(5) – P. 055604. DOI: 10.1088/2040-8986/aab8b.
- [13] Kotova, S.P. Tunable liquid-crystal focusing device. 1. Theory / S.P. Kotova, V.V. Patlan, S.A. Samagin // *Quantum Electronics.* – 2011. – Vol. 41(1). – P. 58-64. DOI: 10.1070/QE2011v041n01ABEH014406.
- [14] Kotova, S.P. Tunable liquid-crystal focusing device. 2. Experiment / S.P. Kotova, V.V. Patlan, S.A. Samagin // *Quantum Electronics.* – 2011. – Vol. 41(1). – P. 65-70. DOI: 10.1070/QE2011v041n01ABEH014407.
- [15] Kotova, S.P. Focusing light into a line segment of arbitrary orientation using a four-channel liquid crystal light modulator / S.P. Kotova, V.V. Patlan, S.A. Samagin // *Journal of Optics.* – 2013. – Vol. 15(3) – P. 035706. DOI: 10.1088/2040-8978/15/3/035706.
- [16] Kotova, S.P. Tunable 4-channel LC focusing device: summarized results and additional functional capabilities / S.P. Kotova, A.M. Mayorova, S.A. Samagin // *Journal of Optics.* – 2015. – Vol. 17(5) – P. 055602. DOI: 10.1088/2040-8978/17/5/055602.
- [17] Коробцов, А.В. Формирование контурных оптических ловушек с помощью 4-х канального ЖК фокусатора / А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, С.А. Самагин // *Квантовая электроника.* – 2014. – Т. 44. – С. 1157-1164. DOI: 10.1070/QE2014v044n12ABEH015598.
- [18] Kirby, A.K. Liquid crystal multi-mode lenses and axicons based on electronic phase shift control / A.K. Kirby, P.J. Hands, G.D. Love // *Opt. Express.* – 2007. – Vol. 15. – P. 13496-13501. DOI: 10.1364/OE.15.013496.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-42-630773 p_a).

Tunable liquid crystal astigmatic plate

S.P. Kotova¹, A.M. Mayorova¹, D.V. Prokopova^{1,2}, S.A. Samagin¹

¹Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Novo-Sadovaya street 221, Samara, Russia 443011

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. We proposed compact tunable liquid crystal astigmatic plate. The device is a modal spatial light modulator with a specific electrodes configuration. The advantages of the device in comparison with multipixel SLMs are its relatively cheapness and capability to realize compact and technologically simple schemes. The results of simulations of the device operation show that at the certain applied potentials the voltage and phase delay distributions have the shape of cylindrical surfaces and the LC device acts as an astigmatic plate. Various modes of operation of LC device are considered. The capability of operation as a truncated axicon is shown.