

Перестраиваемый жидкокристаллический фокусатор.

2. Эксперимент

С.П.Котова, В.В.Патлань, С.А.Самагин

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик модального жидкокристаллического фокусатора при различных режимах управления. Получены распределения фазовой задержки в виде кругового усеченного конуса с контролируемым положением центра основания. Реализована фокусировка в круглое пятно с контролируемым положением точки фокусировки в области апертуры при работе фокусатора в режиме малого модального параметра.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, пространственные модуляторы света.

1. Введение

Теоретическое моделирование работы жидкокристаллического (ЖК) фокусатора на основе скрещенных подложек с резистивным покрытием и полосковыми контактами, выполненное в [1], показало возможность реализации ряда интересных для практики фазовых распределений. Действие двумерного ЖК дефлектора, который является аналогом исследуемого нами устройства, работающего в режиме малого модального параметра, было рассмотрено в работах [2, 3]. Авторам удалось реализовать набор оптических элементов со сложным профилем распределения фазовой задержки [3], однако не было дано подробного теоретического описания режимов управления и не исследовался вопрос фокусировки излучения. В связи с этим полученные нами в [1] режимы управления являются новыми. В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования устройства, реализованы новые режимы его работы и рассмотрено их применение для управляемой фокусировки излучения.

2. Экспериментальные образцы фокусаторов

Были изготовлены образцы перестраиваемого ЖК фокусатора с квадратными апертурами трех размеров; длины сторон апертур составляли 1, 2 и 5 мм. Конструкция фокусатора схематически представлена на рис.1. Высокоомные покрытия на обеих подложках каждого фокусатора имели равное поверхностное сопротивление, которое для различных образцов составляло 100 кОм/□ и 5 МОм/□. Толщина ЖК слоя была равна 10 или 12.5 мкм и задавалась фторопластовыми прокладками. В фокусаторах использовался нематический жидкий кристалл марки BL037 (Merck). Планарная ориентация ЖК слоя создавалась с помощью ориентирующих покрытий.

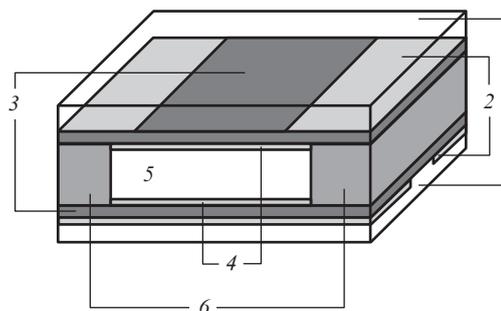


Рис.1. Схема ЖК фокусатора:

1 – стеклянные подложки; 2 – низкоомные электроды; 3 – высокоомный проводящий слой; 4 – ориентирующее покрытие; 5 – ЖК слой; 6 – прокладки.

Для исследования характеристик модального фокусатора был сконструирован и изготовлен специализированный четырехканальный генератор синусоидальных колебаний, управляемый от компьютера. Основу устройства составляют интегральные микросхемы двенадцатиразрядного цифроаналогового преобразователя (ЦАП) DAC7615P и микроконтроллера PIC18F252. Для реализации принципа прямого цифрового синтеза используется хранящая в постоянной памяти микроконтроллера таблица значений функции \sin . Значения из таблицы выбираются с помощью микропрограммы через равные промежутки времени в соответствии с текущим значением счетчика фазы, масштабируются для получения нужной амплитуды с использованием аппаратно-реализованной функции умножения и побитового сдвига, а затем загружаются в ЦАП по последовательному интерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface). Получающийся синусоидальный сигнал с амплитудой до 2.5 В, смещенный относительно нуля (что диктуется конструктивными особенностями ЦАП), приводится усилителем на основе операционного усилителя (ОУ) TL074 к симметричному относительно нуля сигналу с амплитудой до 12.5 В. Производительность микроконтроллера, работающего на тактовой частоте 50 МГц, позволяет обеспечить до 64 отсчетов на период для частоты изменения напряжения 500 Гц,

С.П.Котова, В.В.Патлань, С.А.Самагин. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: kotova@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 28 июля 2010 г., после доработки – 1 ноября 2010 г.

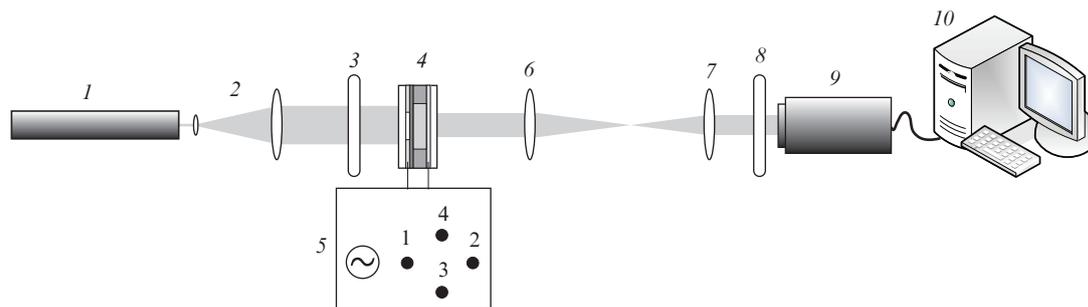


Рис.2. Схема поляризационного интерферометра для визуализации фазовой задержки ЖК фокусатора: 1 – He-Ne-лазер, 2 – коллиматор; 3 – поляризатор; 4 – ЖК фокусатор; 5 – блок управления; 6 и 7 – линзы; 8 – поляризатор; 9 – ПЗС-камера; 10 – компьютер.

что достаточно для проведения планировавшихся экспериментов. Данные от компьютера передаются по стандартному последовательному интерфейсу RS-232C, при этом амплитуда и фазовый сдвиг электрического сигнала задаются независимо для каждого из четырех каналов только при изменении этих параметров. Управляющее программное обеспечение со стороны персонального компьютера имеет простой и удобный графический интерфейс, имитирующий приборную панель виртуального прибора.

Исследование профиля фазовой задержки ЖК фокусатора проводилось по стандартным методикам в схеме со скрещенными поляризаторами (рис.2). Образцы помещались между скрещенными поляризаторами так, чтобы направление исходной ориентации оптической оси ЖК слоя составляло угол 45° с осями поляризаторов. ЖК фокусатор освещался однородным по интенсивности линейно поляризованным светом He-Ne-лазера с плоским волновым фронтом и длиной волны 633 нм. На контактные электроды подавались потенциалы, рассчитанные с помощью полученных соотношений для различных режимов работы устройства.

3. Действие ЖК фокусатора при различных значениях модального параметра

Как было отмечено в [1], модальный режим управления реализуется при модальном параметре $|\chi| \sim 1/l$, где l – размер апертуры. Величиной модального параметра можно управлять, изменяя в процессе работы частоту прикладываемого напряжения. Электрофизические характеристики элементов устройства, в частности поверхностное сопротивление высокоомных покрытий, были подобраны такими, чтобы частоты напряжения лежали в рабочем диапазоне используемого жидкого кристалла.

На контакты одной из подложек подавались одинаковые синфазные потенциалы φ_1 и φ_2 . Контакты на другой подложке были заземлены. Интерферограммы, полученные в таком режиме управления устройством, представлены на рис.3. Хорошо видно, что с ростом частоты напряжения увеличивается глубина профиля фазовой задержки и усиливается влияние геометрии контактных электродов, образующих апертуру. Очевидно, что этот режим работы для фокусировки не является оптимальным. Более предпочтительно работать в таком диапазоне частот потенциалов, который обеспечивает выполнение условия малости модального параметра.

В рамках представленной математической модели устройства [1] были получены решения для малого модального параметра, т.е. для случая, когда выполняется условие $|\chi\lambda| \ll 1$. Данному условию удовлетворяли экспериментальные образцы фокусаторов с апертурами 1×1 мм и 2×2 мм. Результаты их работы были схожими, поэтому далее для иллюстрации приведены экспериментальные данные для фокусатора с апертурой 1×1 мм.

Представленные на рис.4 экспериментальные результаты подтверждают справедливость полученных в [1] соотношений для расчета управляющих потенциалов в случае, когда первоначально заданы два из них: $\varphi_{11} = 4.24$ В и $\varphi_{12} = (-2.5 - 4.33i)$ В. Значения других потенциалов рассчитывались с помощью соотношений (12) [1].

Наиболее простым в смысле технической реализации и определения управляющих сигналов является решение с фиксированными фазами потенциалов (выражение (14) [1]), поскольку изменениям подвергаются только амплитуды потенциалов, при этом три из них однозначно зависят от четвертой. Рассмотрим экспериментальную реализацию данного подхода. Характерные интерферограммы, полученные в ходе исследования, показаны на рис.5. Потенциалы рассчитывались по формулам (14) и (18) [1]. При

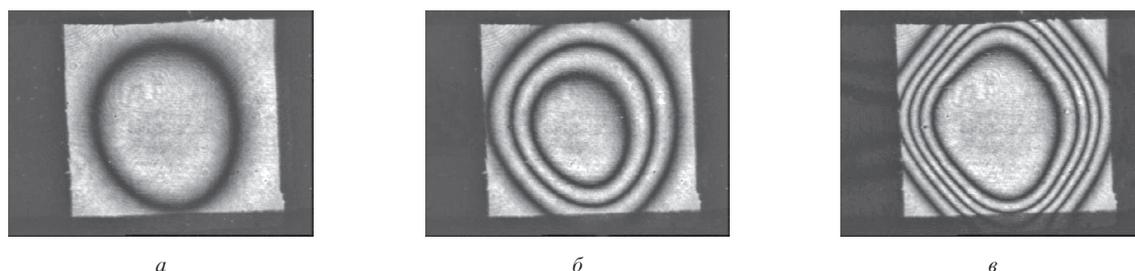


Рис.3. Интерферограммы, полученные в схеме со скрещенными поляризаторами, для фокусатора с апертурой 5×5 мм при амплитуде напряжения 10 В и частоте напряжения 0.4 (а), 0.7 (б) и 1.5 кГц (в).

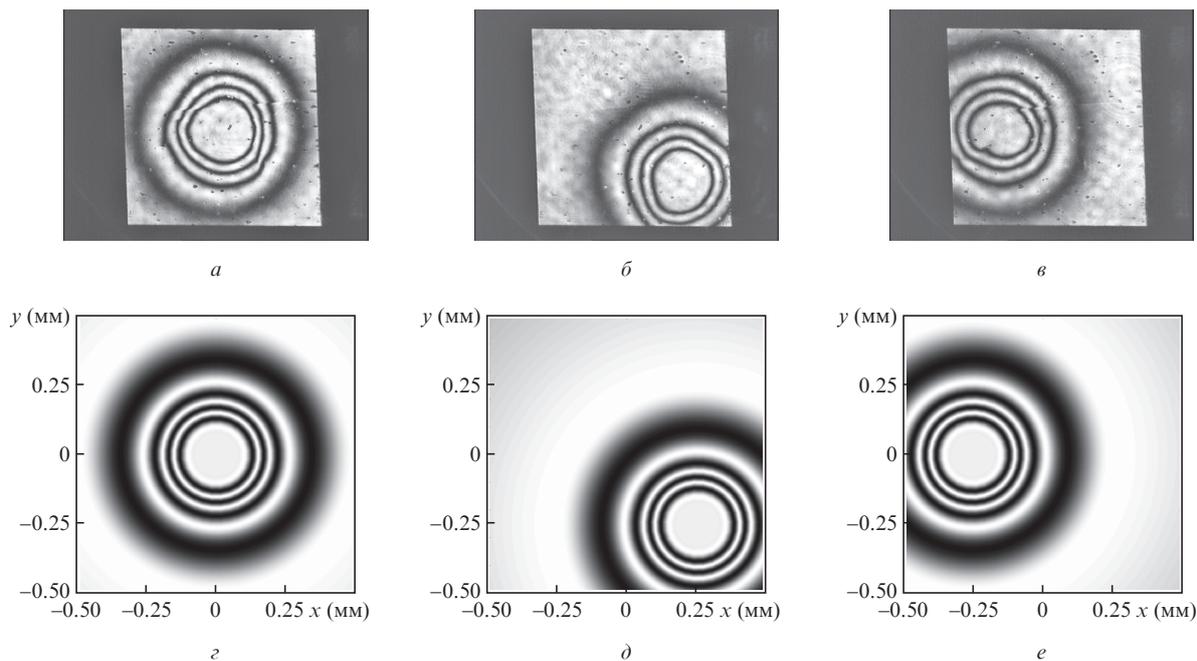


Рис.4. Экспериментальные (*a–в*) и расчетные (*z–e*) интерферограммы для ЖК фокусатора, работающего в режиме малого модального параметра. Координаты центра: $x_0/a = y_0/b = 0$ (*a, z*), $x_0/a = 0.5, y_0/b = -0.5$ (*б, д*) и $x_0/a = 0.5, y_0/b = 0$ (*в, e*).

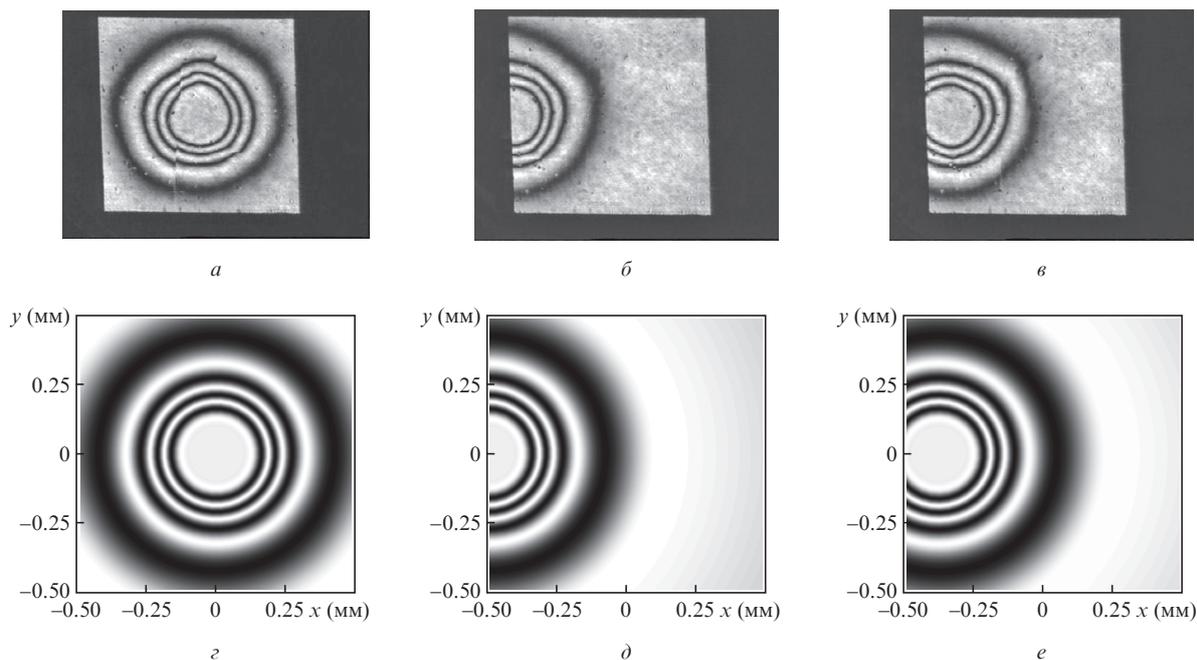


Рис.5. Поляризационные экспериментальные (*a–в*) и расчетные (*z–e*) интерферограммы, полученные для фокусатора с апертурой 1×1 мм при частоте напряжения 500 Гц и действующих значениях потенциалов на контактах $A_{11} = 4$ В, $A_{12} = 4$ В (*a, z*), $A_{11} = 0, A_{12} = 8$ В (*б, д*) и $A_{11} = 1$ В, $A_{12} = 7$ В (*в, e*); $A_{21} = A_{22} = 4$ В во всех случаях.

вычислениях использовались значения параметров и экспериментальная вольт-фазная зависимость для конкретного образца. Наблюдалось хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных. Отметим, что при формировании распределения волнового фронта с эллиптическими эквифазными линиями в профиле фазовой задержки возникает астигматизм, которого нет в представленных на рис.5 картинах.

Поскольку напряжение в центре картины падает до нуля, то в этой области наблюдается участок с постоянной фазовой задержкой. Это подтверждается результата-

ми измерений с помощью датчика Гартмана волнового фронта, прошедшего через фокусатор света (рис.6). Экспериментальная установка аналогична установке для получения поляризационных интерферограмм (рис.2), но в ней отсутствует второй поляризатор (δ на рис.2), а камера θ заменена датчиком Гартмана. Первый поляризатор ориентирован так, чтобы его ось пропускания совпадала с оптической осью жидкого кристалла при нулевом напряжении. Решетка маски Гартмана имела гексагональную структуру, поэтому измерения были проведены не для всей апертуры, а только для ее центральной части.

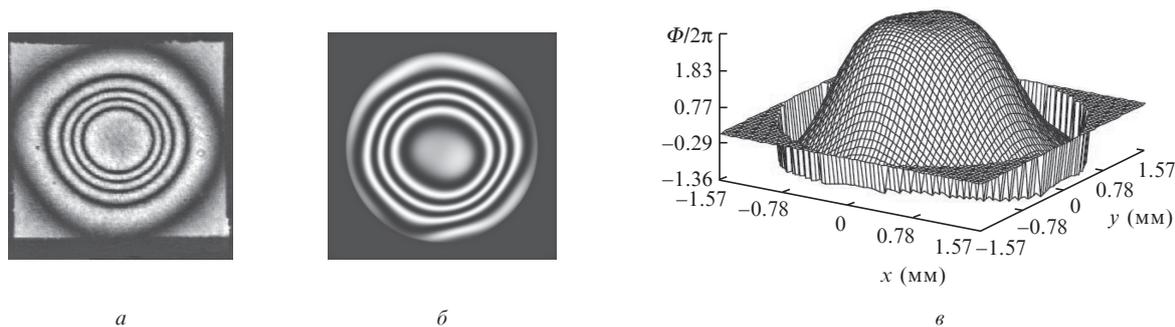


Рис.6. Экспериментальная интерферограмма, полученная в схеме со скрещенными поляроидами (а), интерферограмма, рассчитанная по результатам измерений датчиком волнового фронта (б), и волновой фронт (в) для фокусатора с апертурой 5×5 мм при частоте напряжения 100 Гц и амплитуде напряжения 4.0 В. Режим управления соответствует решению при постоянных фазах.

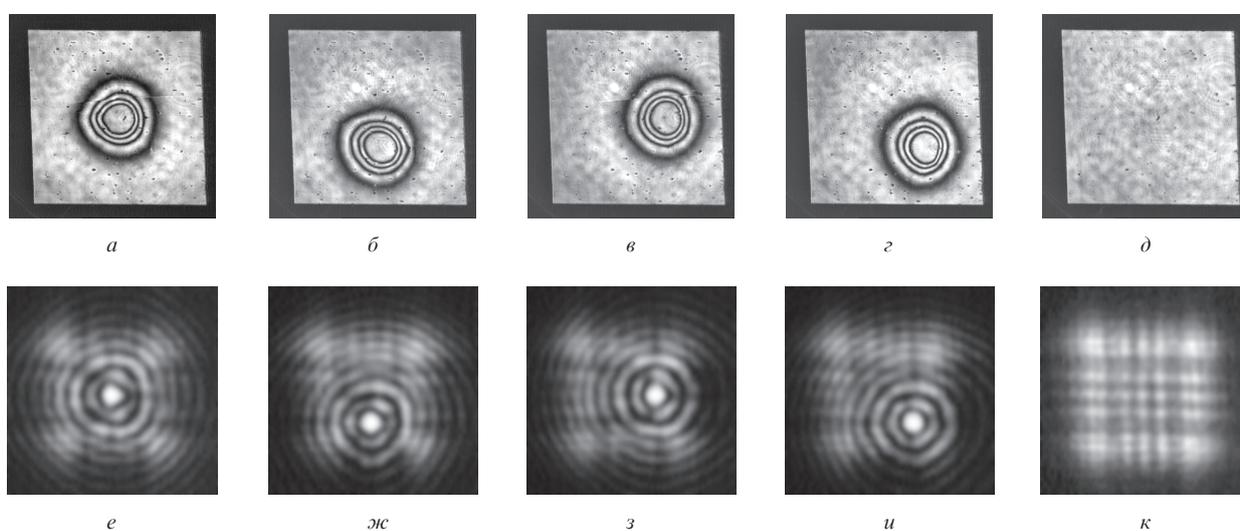


Рис.7. Поляризационные экспериментальные интерферограммы (а-д) и распределения интенсивности на расстоянии 9 см от фокусатора (е-к), полученные для фокусатора с апертурой 1×1 мм при частоте напряжения 500 Гц и амплитудах потенциалов на контактах $A_{11} = 9$ В, $A_{22} = 9$ В, $A_{12} = 9$ В, $A_{21} = 9$ В (а,е), $A_{11} = 9$ В, $A_{22} = 12$ В, $A_{12} = 9$ В, $A_{21} = 6$ В (б,ж), $A_{11} = 12$ В, $A_{22} = 9$ В, $A_{12} = 6$ В, $A_{21} = 9$ В (в,з), $A_{11} = 12$ В, $A_{22} = 12$ В, $A_{12} = 6$ В, $A_{21} = 6$ В (г,и); д,к – фокусатор выключен.

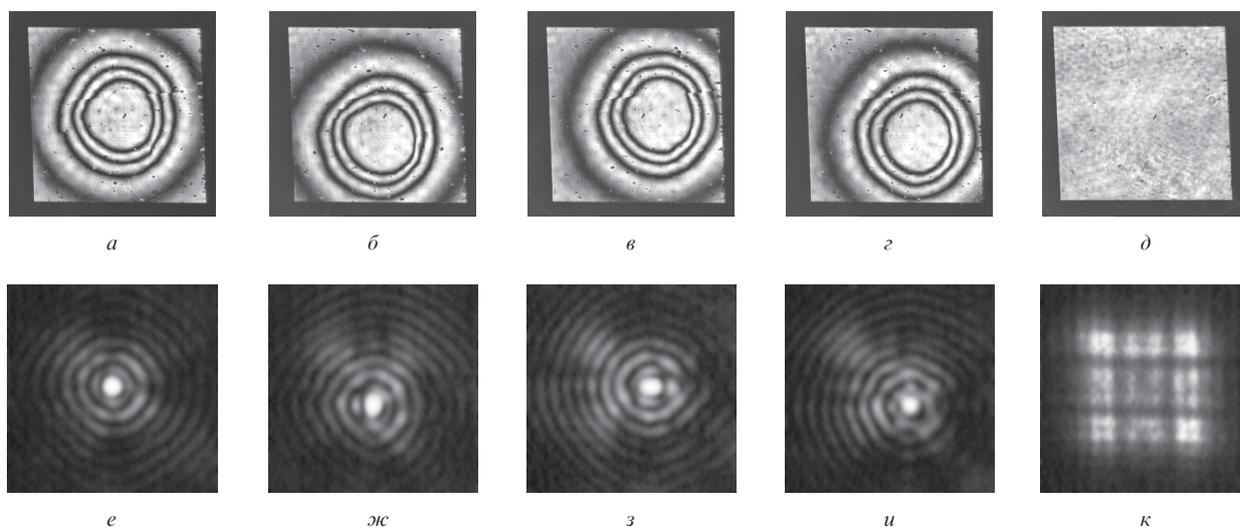


Рис.8. Поляризационные экспериментальные интерферограммы (а-д) и распределения интенсивности (размер изображений 1.3×1.3 мм) на расстоянии 12 см от фокусатора (е-к), полученные для фокусатора с апертурой 1×1 мм при частоте напряжения 500 Гц и амплитудах потенциалов на контактах $A_{11} = 4$ В, $A_{22} = 4$ В, $A_{12} = 4$ В, $A_{21} = 4$ В (а,е), $A_{11} = 4$ В, $A_{22} = 5$ В, $A_{12} = 4$ В, $A_{21} = 3$ В (б,ж), $A_{11} = 5$ В, $A_{22} = 4$ В, $A_{12} = 3$ В, $A_{21} = 4$ В (в,з), $A_{11} = 5$ В, $A_{22} = 5$ В, $A_{12} = 3$ В, $A_{21} = 3$ В (г,и); д,к – фокусатор выключен.

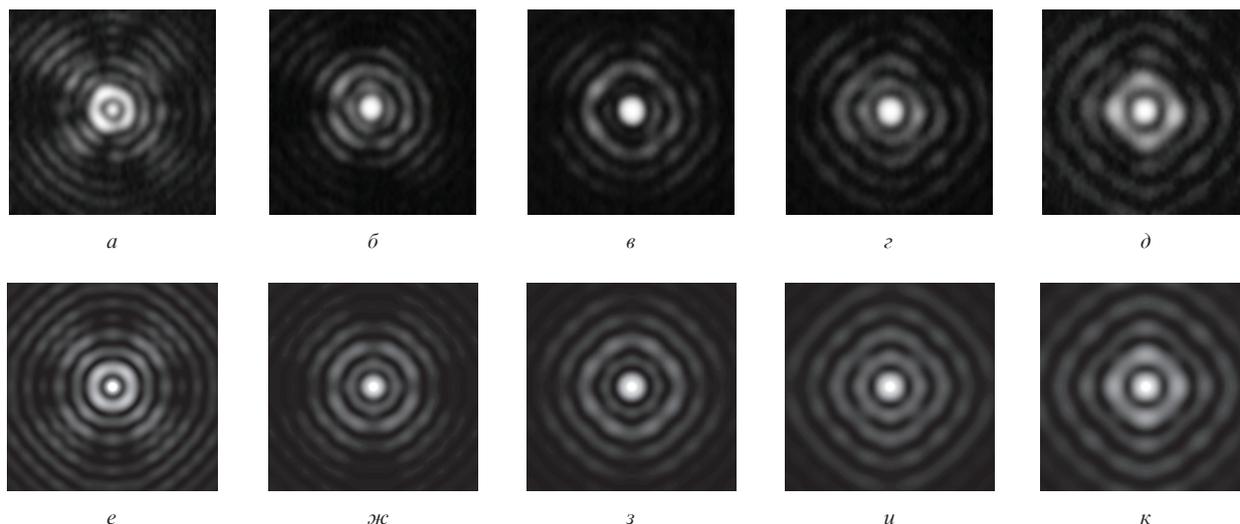


Рис.9. Экспериментальные (а–д) и теоретические (е–к) изображения пятен фокусировки вдоль оси распространения света для фокусатора с апертурой 1×1 мм при амплитуде потенциалов на контактах 4 В, частоте напряжения 500 Гц и фазах $\alpha_{11} - 0^\circ$, $\alpha_{22} - 90^\circ$, $\alpha_{12} - 180^\circ$, $\alpha_{21} - 270^\circ$. Расстояние от фокусатора 10 (а, е), 12 (б, ж), 14 (в, з), 16 (г, и) и 18 см (д, к). Все изображения размером 1×1 мм.

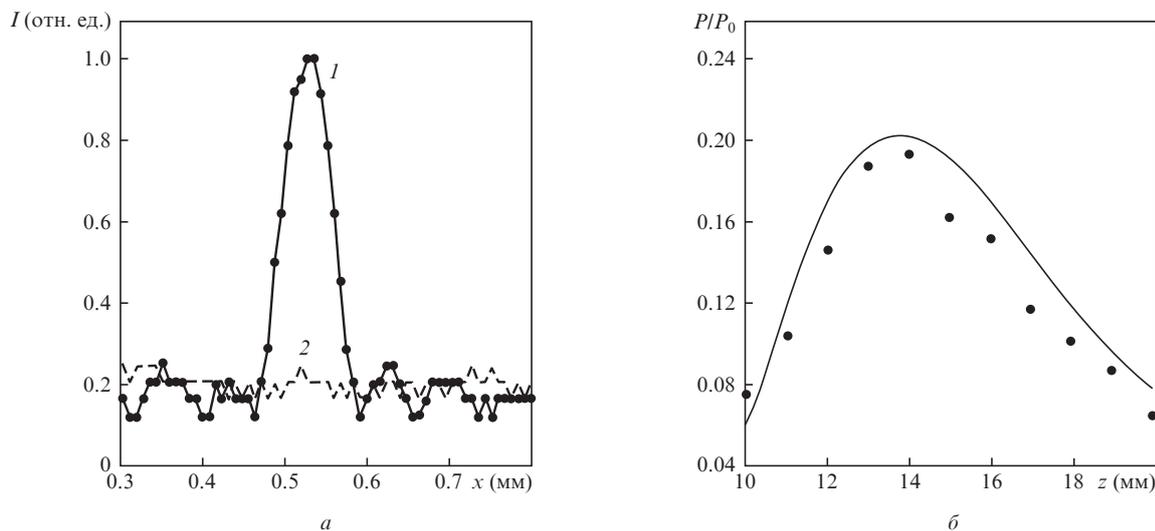


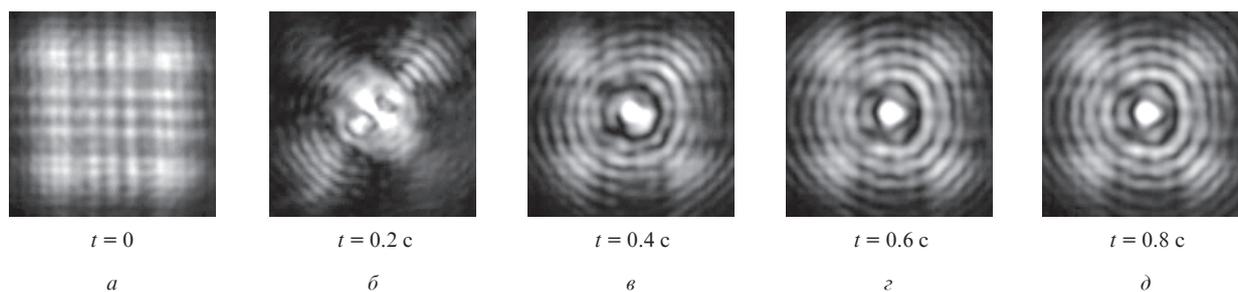
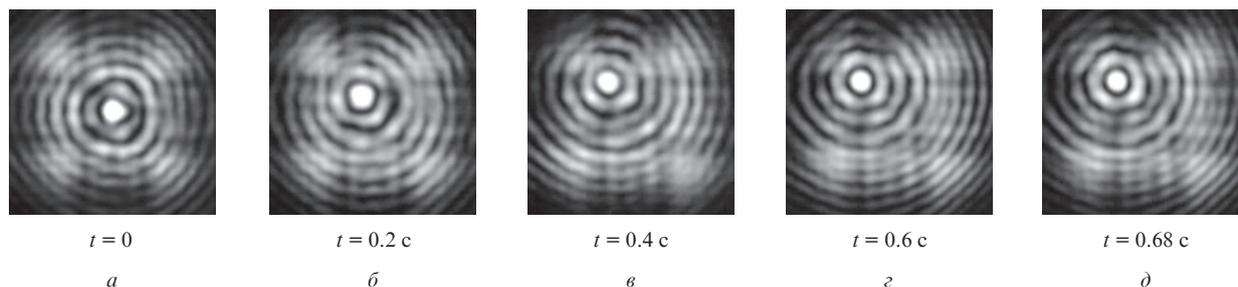
Рис.10. Распределения интенсивности в поперечном сечении для фокусатора с апертурой 1×1 мм при амплитуде потенциалов на контактах 4 В, частоте напряжения 500 Гц и фазах $\alpha_{11} - 0^\circ$, $\alpha_{22} - 90^\circ$, $\alpha_{12} - 180^\circ$, $\alpha_{21} - 270^\circ$ (1) и в случае выключенного фокусатора (2) (расстояние от фокусатора до экрана 14 см) (а), а также зависимость доли мощности излучения в центральном пятне P/P_0 от расстояния; кривая – расчет, точки – эксперимент (б).

Очевидно, что если линии постоянного по величине напряжения имеют форму концентрических окружностей, то проходящий свет будет фокусироваться в круглое пятно, которое будет перемещаться на экране вместе со смещающимся центром распределения фазовой задержки (рис.7, 8). Хорошо видно, что чем выше потенциалы, тем меньше область апертуры, участвующая в фокусировке света, а следовательно, и мощность излучения P , попадающего в пятно фокусировки. Например, при амплитуде потенциалов 9 В (рис.7) доля мощности в пятне составляет 7.5% полной мощности прошедшего света P_0 , а при амплитуде 4 В эта доля возрастает до 19% (рис.8). В то же время при больших напряжениях пятно фокусировки в области апертуры может перемещаться в большей области без потери качества. Это может быть полезно при использовании фокусатора в системах манипуляции микрообъектами.

Поскольку создаваемый волновой фронт не является параболическим, а скорее имеет форму усеченного кону-

са с различным диаметром основания, то фокусировка света в пятно наблюдается на протяженном участке вдоль оси распространения света. Это означает, что на некотором расстоянии от фокусатора формируется распределение интенсивности света в виде отрезка в продольном направлении. Положение начала отрезка зависит от формы конуса сформированного волнового фронта, а длина определяется формой фронта и влиянием дифракции на краях апертуры. Пример такой фокусировки представлен на рис.9. Распределение интенсивности на экране и зависимость доли мощности света, попадающего в центральное пятно, от расстояния изображены на рис.10. При расчете распределения интенсивности использовано преобразование Френеля для распределения фазовой задержки, эквивалентного экспериментальному (см. рис.8,а).

Для практического применения устройств подобного класса важной характеристикой является быстродействие. Как и для всех ЖК элементов, оно определяется в основ-

Рис.11. Распределения интенсивности света на расстоянии 9 см от фокусатора в различные моменты времени t после подачи потенциалов.Рис.12. Распределения интенсивности света на расстоянии 9 см от фокусатора в различные моменты времени t при перемещении пятна фокусировки.

ном скоростью переориентации молекул жидких кристаллов во внешнем поле. Для нематических кристаллов с толщиной слоя 10 мкм характерные времена переключения, как правило, составляют доли секунды. Процесс включения ЖК фокусатора в виде картин интенсивности в плоскости наблюдения в различные моменты времени на расстоянии 9 см от устройства показан на рис.11.

Низкое быстродействие устройств данного класса ограничивает область их применения, однако для некоторых задач (например, для манипулирования микрообъектами) характерные времена процессов перефокусировки порядка секунды являются достаточными. На рис.12 показан пример перемещения пятна фокусировки в плоскости наблюдения. На ЖК фокусатор подавались напряжения только для двух случаев – для фокусировки в центр и в угол. Видно, что благодаря большому времени релаксации жидкого кристалла (несколько секунд) переход из первого состояния во второе происходит непрерывно, почти по прямолинейной траектории и без значительного ухудшения качества фокусировки. Длина перемещения составила 0.35 мм за время 0.68 с, что приемлемо для лазерного манипулирования микрообъектами.

4. Заключение

Разработаны и изготовлены лабораторные образцы ЖК фокусаторов с апертурами 1×1, 2×2, 5×5 мм и сопро-

тивлениями высокоомных покрытий 100 кОм/□ и 5 МОм/□. Проведены экспериментальные исследования различных режимов управления. Режим работы модулятора, соответствующий случаю большого модального параметра (режим модальной линзы), не дает каких-либо практически значимых распределений фазовой задержки, поскольку во всех случаях наблюдается сильная зависимость от геометрии границы апертуры, что приводит к искажениям. В режиме малого модального параметра (низкие частоты и/или малое поверхностное сопротивление проводящих покрытий) были получены распределения фазовой задержки в виде кругового усеченного конуса с контролируемым положением центра основания. Реализована фокусировка в круглое пятно с контролируемым положением точки фокусировки в области апертуры. Наблюдается хорошее согласие с модельными расчетами.

Авторы выражают благодарность В.М.Шошину и Ю.П.Бобылеву за помощь в изготовлении ЖК фокусаторов. Работа поддержана ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № 14.740.11.0063).

1. Котова С.П., Патлянь В.В., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **41**, 58 (2011).
2. Hands Ph.J.W., Tatarkova S.A., Kirby A.K., Love G.D. *Opt. Express*, **14**, 4525 (2006).
3. Kirby A.K., Hands Ph.J.W., Love G.D. *Opt. Express*, **15**, 13496 (2007).