

Модальный жидкокристаллический корректор волнового фронта на керамической подложке. Одноконтактное приближение

Н.А.Климов, С.П.Котова, С.А.Самагин, М.Ю.Квашнин, Г.В.Вдовин, М.Ю.Локтев

Теоретически и экспериментально подтверждена возможность создания многоканального модального жидкокристаллического корректора нового типа на керамической подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Предложена математическая модель корректора с одним электродом, на основе которой исследованы зависимости профиля напряжения и фазы от конструктивных особенностей устройства. Разработана технология изготовления керамической подложки со встроенными электродами. Экспериментально продемонстрирована работоспособность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, пространственные модуляторы света, адаптивная оптика.

1. Введение

Жидкокристаллические (ЖК) оптические адаптивные устройства характеризуются малыми управляющими напряжениями, технологичностью, относительно низкой стоимостью и представляют значительный интерес для использования в недорогих системах адаптивной оптики, применяемых в астрономии, медицине и промышленности. Среди ЖК корректоров волнового фронта можно выделить модальные и зональные модуляторы.

В типичных электрически управляемых зональных многоэлементных ЖК модуляторах [1–3] электроды находятся в прямом контакте с ЖК слоем. Это приводит к тому, что если размеры электродов больше толщины ЖК слоя, электрический потенциал в области контакта является постоянным. Однако в промежутках между контактными электродами имеется большой градиент потенциала, что оказывает негативное влияние на фазовый отклик корректора, приводя к потерям при дифракции излучения на межконтактных областях и к формированию ступенчатого профиля фазовой задержки.

Модальные ЖК корректоры позволяют формировать плавные фазовые профили и требуют меньшего числа контактных электродов для компенсации аберраций низкого порядка. Нами были разработаны корректоры данного типа [4–6]. Однако в их конструкции также имелись небольшие области соприкосновения электродов со слоем ЖК, что приводило к некоторому ухудшению формируемых фронтов.

В настоящей работе представлен альтернативный подход к созданию модальных ЖК корректоров. Его основная идея заключается в использовании полей, формируемых электродами, не имеющими прямого контакта с ЖК слоем.

Это позволяет получать плавные фазовые поверхности без неоднородностей. Была исследована возможность создания модального ЖК корректора на основе толстого слоя диэлектрика с целью формирования модального отклика от отдельного электрода. В качестве диэлектрика использовалась керамика с высокой диэлектрической проницаемостью (около 10000). Первые результаты проверки предлагаемого подхода представлены в [7, 8]. В настоящей работе предложены конструкция корректоров, основанных на данном принципе, а также способ изготовления керамической подложки со встроенными цилиндрическими электродами. Построена математическая модель корректора в одноконтактном приближении, проведено численное моделирование распределения напряжения, прикладываемого к ЖК слою, и фазового профиля отраженной волны в зависимости от геометрических параметров модели корректора; экспериментально изучена оптическая функция его отклика.

2. Схема ЖК корректора на керамической подложке и принцип его работы

Принципиальная схема ЖК корректора на основе керамической подложки показана на рис.1,а. Корректор представляет собой многослойную структуру. Слой ЖК находится между двумя подложками цилиндрической формы, одна из которых изготовлена из стекла, другая – из керамики. На верхней подложке расположено зеркало, на нижнюю нанесён прозрачный проводящий слой. Этот слой является низкоомным, так что потенциал во всех его точках одинаков. Металлические электроды имеют форму цилиндрических стержней и располагаются в подложке на некоторой глубине.

Работа такого фазового корректора основана на применении электрооптического ориентационного S-эффекта в нематических жидких кристаллах (НЖК). Сущность данного эффекта заключается в следующем. Если к слою НЖК приложить электрическое напряжение, то под действием внешнего электрического поля в нем произойдёт

Н.А.Климов. ООО «Константа», Россия, 443056 Самара, ул. Подшипниковая, 3

С.П.Котова, С.А.Самагин, М.Ю.Квашнин. Самарский филиал Физического института им.П.Н. Лебедева РАН, Россия, 443056 Самара, ул. Подшипниковая, 3; e-mail: kotova@fian.smr.ru

G.V.Vdovin, M.Yu.Loktev. OKO Technologies, Rontgenweg 1, 2624 BD, Delft, Netherland

Поступила в редакцию 22 декабря 2006 г.

пространственная переориентация молекул, что вызовет изменение показателя преломления. Управляя величиной и пространственным распределением электрического поля в ЖК слое (рис.1), можно управлять профилем фазы отражённой волны.

В рассматриваемой модели корректора впервые предлагается использовать неоднородное пространственное распределение поля, создаваемого каждым электродом, находящимся внутри керамической подложки. Из-за большой диэлектрической проницаемости керамической подложки ($\sim 10^4$) величина поля (или градиент потенциала) внутри неё мала. Это приводит к тому, что прикладываемое напряжение падает, в основном, на ЖК слое (высокий коэффициент передачи) и распределение потенциала вдоль границы между подложкой и ЖК слоем имеет плавную форму, а его ширина значительно превышает диаметр контактного электрода.

С точки зрения теории цепей данная система представляет собой распределённый ёмкостной делитель напряжения (рис.1,б). Напряжение, прикладываемое между контактным и заземлённым электродами, делится между ёмкостями керамического и ЖК слоёв. Следует отметить, что при удалении от оси контактного электрода ёмкость керамического слоя уменьшается из-за увеличения расстояния между краем электрода и границей ЖК слоя ($C_1 > C_2 > C_3 > \dots$). Уменьшение ёмкости приводит к росту реактивного сопротивления слоя, следствием чего является уменьшение падения напряжения на ЖК слое. Таким образом, вдоль границы между керамической подложкой и ЖК слоем распределение потенциала должно иметь спадающий характер с максимумом на оси контакта. Этот вариант корректора позволяет избавиться от ступенчатого распределения напряжения, которое наблюдается у зональных корректоров [1–3]. Следует

отметить, что из-за отсутствия прямого контакта между электродами и ЖК слоем распределение потенциала должно получаться более плавным, чем у разработанных ранее модальных многоканальных ЖК корректоров [4–6].

Другой вариант предлагаемого корректора представлен на рис.1,б, где электроды располагаются не внутри керамической подложки, а формируются на ее поверхности. Электроды могут быть сформированы либо структурированием внешнего металлического слоя печатной платы, контактирующей с керамической подложкой (как описывается в статье [7]), либо травлением проводящего слоя, нанесённого на подложку. Каждая из представленных на рис.1,а, б схем имеет свои преимущества.

Расположение электродов внутри подложки позволяет использовать толстые подложки, обеспечивая тем самым их хорошую прочность и лучшую плоскостность, и не влияет на диапазон управляющих напряжений. Для корректоров второго типа увеличение толщины подложки приводит к сильному росту управляющего напряжения, которое может достигать сотен вольт. С другой стороны, формирование контактов на поверхности уменьшает ёмкостное влияние электродов друг на друга и позволяет увеличивать плотность их расположения без дополнительных затрат. Кроме того, использование прозрачных диэлектрических подложек и электродов из ИТО (оксидов индия и олова) в перспективе делает возможным получение не имеющих аналогов прозрачных модальных корректоров волнового фронта.

3. Математическая модель

Модель корректора на основе керамической подложки представлена на рис.2.

Будем полагать, что керамика и ЖК являются ди-

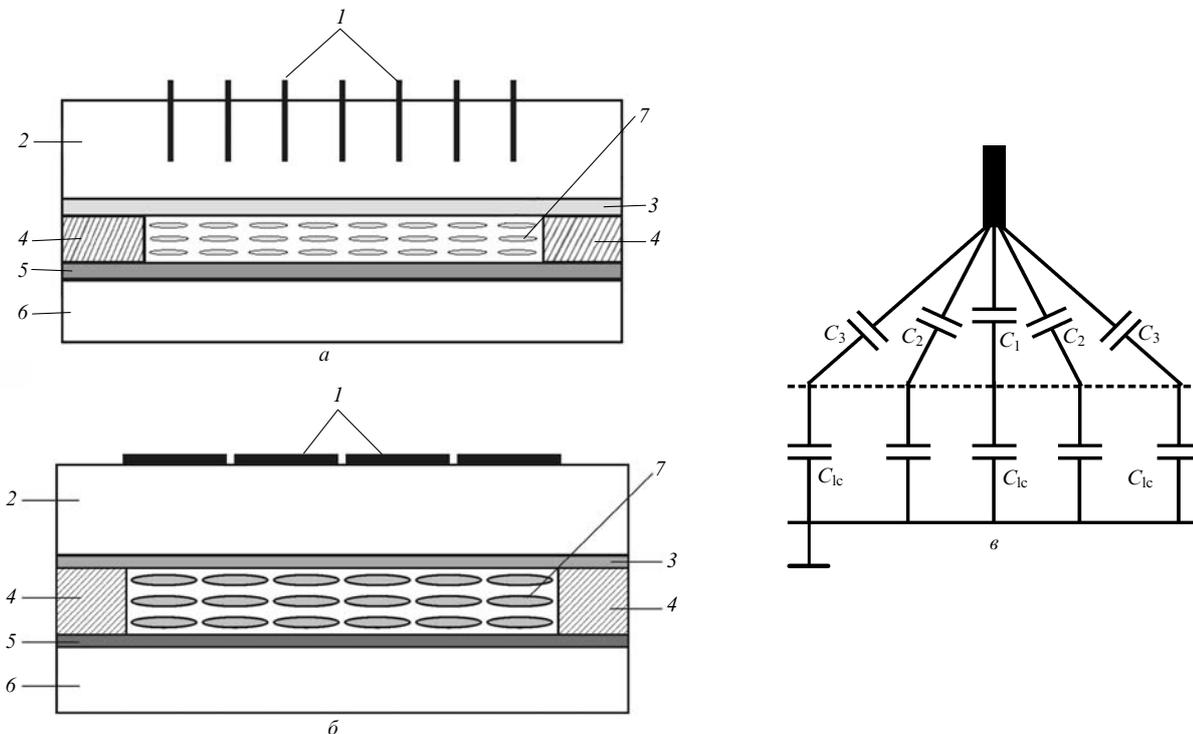


Рис.1. Схемы модального ЖК корректора на основе керамической подложки со встроенными электродами (а), с электродами, расположенными на поверхности (б), и эквивалентная электрическая схема для одного электрода (в): 1 – металлические электроды; 2 – керамическая подложка; 3 – зеркало; 4 – прокладки; 5 – низкоомный электрод; 6 – стеклянная подложка; 7 – слой ЖК.

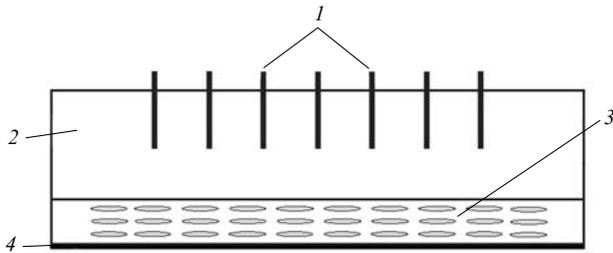


Рис.2. Модель ЖК корректора на основе керамической подложки: 1 – электроды; 2 – керамическая подложка, 3 – слой НЖК, 4 – низкоомный электрод.

электриками с постоянными диэлектрическими проницаемостями. Поскольку управление корректорами на основе НЖК осуществляется с помощью переменного напряжения, то пространственное распределение потенциала в каждой среде будет определяться следующим волновым уравнением:

$$\Delta\varphi - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0, \tag{1}$$

где Δ – оператор Лапласа; ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; c – скорость света в вакууме; t – время.

Однако для рабочих частот напряжения (1 – 100 кГц) длина волны оказывается значительно больше характерных размеров рассматриваемой системы. Диэлектрические проницаемости сред в этом диапазоне частот являются постоянными, поэтому можно использовать приближение квазистационарности поля [9]. Тогда распределение потенциала является функцией, не зависящей от частоты, и будет определяться уравнением Лапласа

$$\Delta\varphi = 0. \tag{2}$$

Для выявления основных закономерностей поведения распределения напряжения на ЖК слое рассмотрим случай, когда в керамической подложке напряжение подводится только к центральному электроду. Выберем такую систему координат, чтобы ось z проходила через ось симметрии, а плоскость xu совпадала с плоскостью низкоомного электрода. Тогда из-за осевой симметрии задачи уравнение (2) в цилиндрической системе координат будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0, \tag{3}$$

где r и z – цилиндрические координаты.

Данное уравнение необходимо дополнить следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \varphi|_{\Omega} &= \varphi_0, \\ \varphi(r, z = 0) &= 0, \\ \frac{\partial\varphi(r = 0, z)}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь через Ω обозначена поверхность контактного электрода. На границах раздела сред должны выполняться стандартные условия непрерывности нормальных со-

ставляющих вектора индукции электрического поля. Полагаем, что на большом расстоянии от корректора потенциал равен нулю.

Для практических задач наибольший интерес представляют распределение потенциала на границе раздела керамика – ЖК и его зависимости от конструктивных особенностей корректора, таких как диаметр электрода и глубина его погружения. Результаты моделирования приведены в следующем разделе.

4. Результаты моделирования

Рассматриваемая система представляет собой многослойную структуру со сложной границей. Поэтому решение уравнения (3) с соответствующими граничными условиями проводилось численными методами. При моделировании использовался ЖК корректор со следующими геометрическими и электрофизическими параметрами: толщина керамической подложки 5 мм, толщина ЖК слоя 12.5 мкм, радиус керамической подложки 20 мм, диэлектрическая проницаемость керамики 10^4 и диэлектрическая проницаемость ЖК слоя 13.5. В расчётах предполагалось, что диэлектрическая проницаемость ЖК слоя постоянна и равна среднему значению для используемого ЖК VL037 (Merk, Германия). Результаты численного моделирования для корректора на керамической подложке и сравнение их с расчётами, сделанными для аналогичного по функциональным и конструктивным особенностям корректора на основе стеклянной подложки с высокоомным слоем [4], представлены на рис. 3 – 6.

Из рис.3,а хорошо видно, что радиальное распределение напряжения на ЖК слое для корректора на керамической подложке вблизи контакта спадает менее круто, чем для аналогичного модального корректора на основе стеклянной подложки со встроенными контактами. Следовательно, и величина фазовой задержки будет изменяться при удалении от оси контакта медленнее (рис.3,б). В предлагаемой конструкции корректора отсутствует область непосредственного контакта электрода и ЖК слоя, поэтому участки с постоянными напряжением и фазой не наблюдаются. Это, в свою очередь, приводит к устранению локальных приконтактных скачков градиента фазы, которые имеют место в модальных корректорах на основе стеклянной подложки. В расчётах радиус стержневого электрода для корректора на керамической подложке был принят равным 0,75 мм. Расстояние от конца стержня до ЖК слоя составляло 1 мм. Геометрические параметры (расстояние между электродами и их расположение, толщина слоя) модального корректора на основе стеклянной подложки с высокоомным слоем и электрофизические характеристики ЖК слоя аналогичны случаю керамического корректора. Радиус электрода равен 0.25 мм и соответствует реальному образцу.

В рассматриваемом корректоре существуют несколько возможностей влиять на профиль напряжения, прикладываемого к ЖК слою. Распределение потенциала должно зависеть от радиуса электрода и глубины его погружения. Как показало моделирование, с увеличением радиуса растёт максимальное значение потенциала на ЖК слое, что обусловлено увеличением площади заряженной поверхности (рис.4,а). Стоит отметить, что при этом не происходит заметного изменения самого распределения потенциала (рис.4,б). Например, его полуширина L возрастает не более чем на 15 %, в то время как

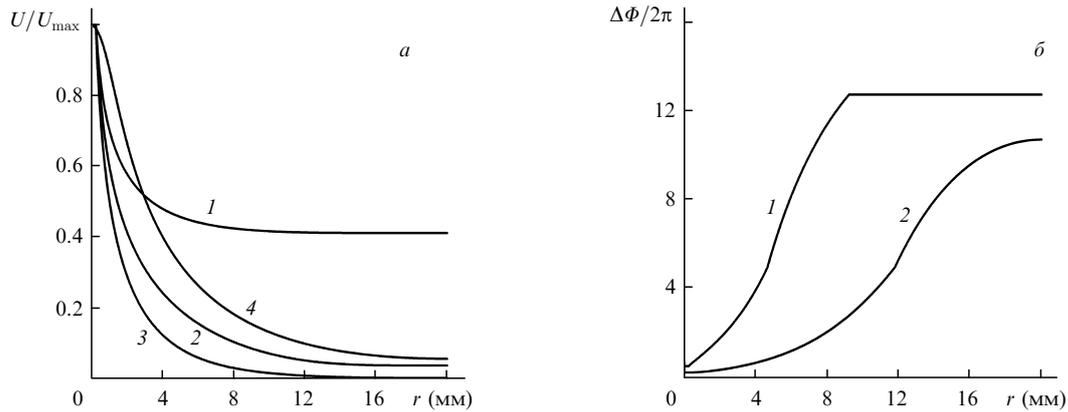


Рис.3. Радиальные распределения напряжения, нормированного на его максимальное значение, для корректора на основе стеклянной подложки со встроенными электродами (1, 2, 3 – напряжения с частотами 1, 10, 50 кГц соответственно) и распределение для корректора на основе керамической подложки со встроенными электродами при частоте напряжения 10 кГц (4) (а), а также распределение фазовой задержки для модального корректора на основе стеклянной подложки со встроенными электродами (1) и для корректора на основе керамической подложки со встроенными электродами (2) с частотой напряжения 10 кГц (б).

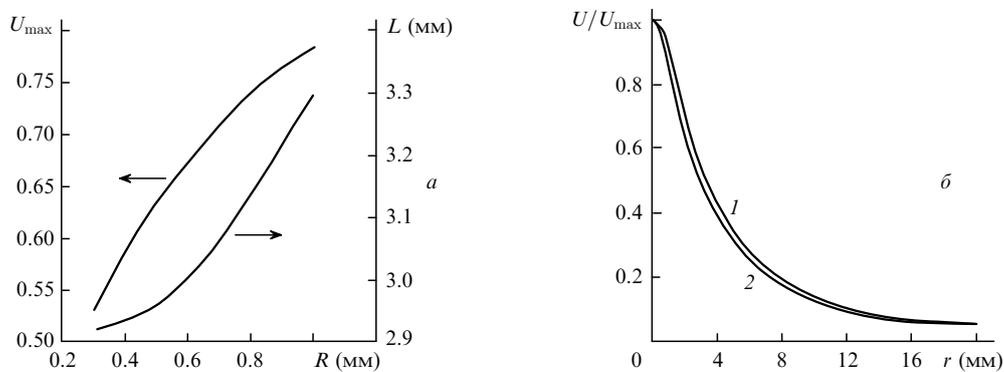


Рис.4. Зависимости максимального напряжения (нормировано на напряжение на электроде) от радиуса электрода R и полуширины распределения L (а) и радиальное распределение напряжения для электродов диаметром 1.0 (1) и 2 мм (2) (б). Расстояние от конца электрода до ЖК слоя составляет 1 мм.

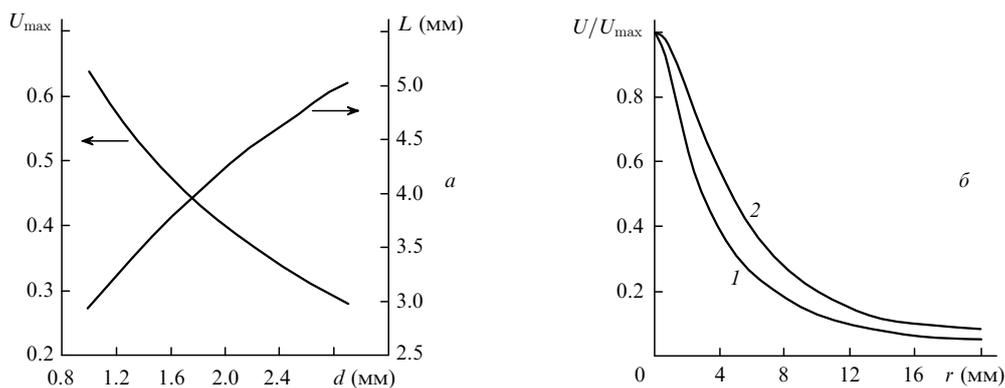


Рис.5. Зависимости максимального напряжения (нормировано на напряжение на электроде) от расстояния d от электрода до ЖК слоя и полуширины распределения L (а) и распределение напряжения при $d = 1.0$ (1) и 2.5 мм (2) (б); диаметр электрода 1.0 мм.

максимальное значение увеличивается практически в два раза.

В результате моделирования случаев с различной глубиной погружения электродов были выявлены следующие закономерности. Увеличение расстояния d от контакта до ЖК слоя приводит к уменьшению максимума потенциала в несколько раз, при этом существенно возрастает и полуширина распределения (рис.5). Это объясняется тем, что при увеличении расстояния происходит уменьшение ёмкости слоя керамики (C_1, C_2, C_3 и т. д.,

рис.1,б). Из-за этого увеличивается ёмкостное сопротивление данного слоя и, следовательно, величина падения напряжения на ЖК слое уменьшается. Увеличение полуширины распределения является непосредственным следствием удаления электрода от ЖК слоя.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что корректор данного типа позволяет формировать плавные распределения напряжения, форма которого зависит от конструктивных особенностей корректора. Наиболее существенное влияние оказывает расстоя-

ние, на котором контактный электрод находится по отношению к ЖК слою. С ростом d уменьшается падение напряжения на ЖК слое, но возрастает ширина распределения. Вариации диаметра электрода в основном приводят к изменению максимума распределения, но не его формы.

5. Экспериментальное исследование ЖК корректора на керамической подложке

Нами был изготовлен образец корректора, для чего была разработана технология изготовления керамической подложки со встроенными цилиндрическими электродами. В пластине изготавливаются отверстия двух диаметров: малого – на глубину, меньшую толщины пластины на 1–2 мм, и большого, соосное первому, – на глубину, меньшую толщины пластины на 3–4 мм. Такая конфигурация определяется необходимостью минимизации взаимного ёмкостного влияния электродов и фиксации электрода в теле пластины. Отверстие малого диаметра заполняется легкодеформируемым металлом, например индием, и в него вставляется электрод необходимой длины и диаметра. Отверстия большого диаметра после сборки электродов заливаются полимеризующимся составом, например эпоксидным компаундом или пластиком на акриловой основе. Это позволяет достаточно прочно зафиксировать электрод в пластине.

Нами была изготовлена керамическая подложка диаметром 40 мм и толщиной 5 мм, отполированная с уровнем плоскостности $\lambda/4$ для $\lambda = 633$ нм. В корректоре использовался НЖК марки VL037. Толщина ЖК слоя задавалась калиброванными прокладками и была равна 12.5 мкм, максимальный диапазон изменения фазы со-

ставлял 10λ . Электроды имели различные диаметры и располагались на разных расстояниях от слоя ЖК. Их пространственное расположение представляло собой гексагональную структуру. Отклик корректора исследовался интерферометрическим методом в схеме со скрещенными поляроидами (рис.6). Корректор ориентировался так, чтобы его оптическая ось располагалась под углом 45° к плоскости поляризации падающего лазерного пучка. Источником напряжения служил генератор синусоидального напряжения звуковой частоты.

Было обнаружено, что в диапазоне частот 1–100 кГц отклик ЖК корректора не зависит от частоты напряжения, что обусловлено отсутствием дисперсии диэлектрических проницаемостей ЖК и керамического слоев. Тем самым подтверждается справедливость приближения квазистационарности поля, используемого для объяснения работы корректора. Поэтому в дальнейшем мы проводили исследования лишь на одной частоте напряжения, равной 10 кГц. Результаты представлены на рис.7–12.

Как хорошо видно из рис.7, профиль фазовой задержки корректора для одного электрода имеет вид, близкий к осесимметричному. Ширина фазового распределения в данном случае будет зависеть от разности напряжения в центре картины и порогового напряжения для S-эффекта, ниже которого пространственной переориентации молекул НЖК не происходит. Величина фазовой задержки зависит только от прикладываемого напряжения. С его увеличением перепад фазового распределения растет. Соответствующие профили волнового фронта в сечении вдоль линии, проходящей через центр симметрии интерференционной картины, представлены на рис.8.

Из нормированных распределений фазы волнового фронта видно, что ширина профиля увеличивается с рос-

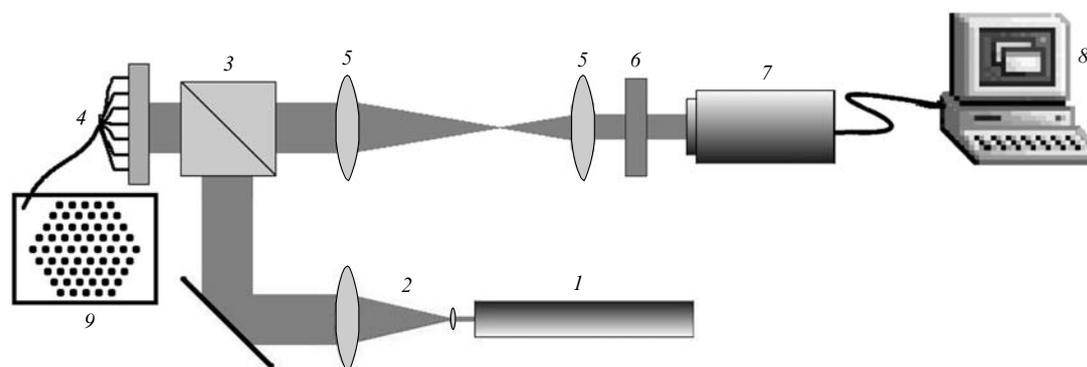


Рис.6. Схема поляризационного интерферометра для исследования формы волнового фронта: 1 – He – Ne-лазер; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – ЖК корректор; 5 – линзы; 6 – поляризатор; 7 – ПЗС-камера; 8 – персональный компьютер; 9 – генератор напряжения.

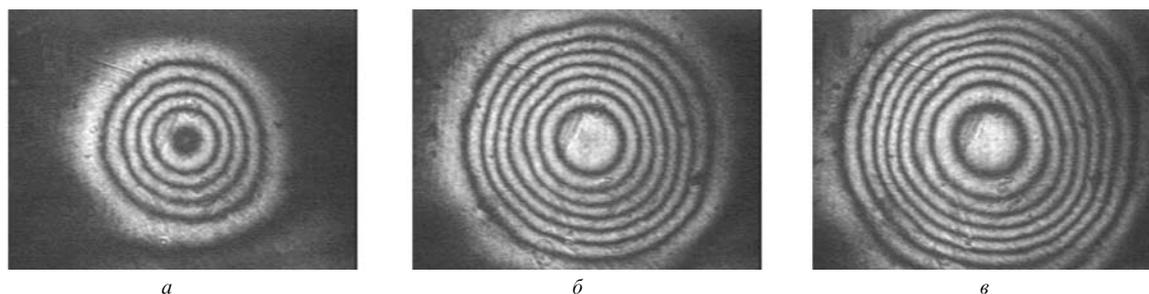


Рис.7. Интерферограммы волнового фронта, сформированного центральным электродом, при напряжении с частотой 10 кГц и амплитуде 20 (а), 40 (б) и 60 В (в) .

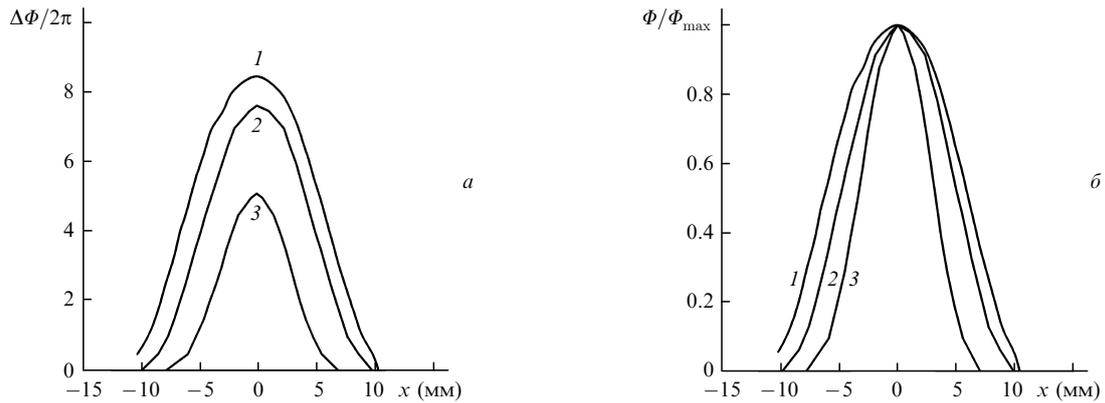


Рис.8. Профили волнового фронта, сформированного одним электродом корректора на керамической подложке, в реальном (а) и нормированном (б) виде при амплитуде напряжения 60 (1), 40 (2) и 20 В (3).

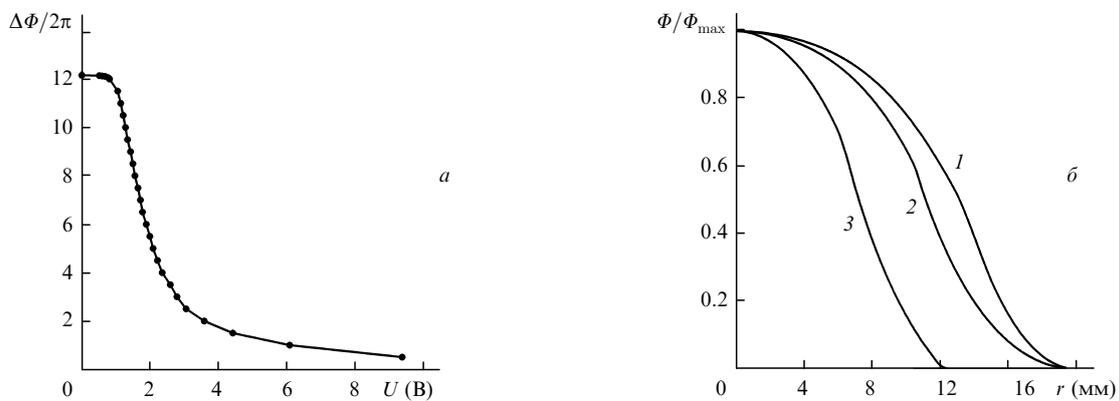


Рис.9. Вольт-фазная характеристика для ЖК марки BL037 при толщине слоя 25 мкм (а) и нормированные профили волнового фронта, сформированного одним электродом корректора на керамической подложке (б) при амплитуде напряжения 60 (1), 40 (2) и 20 В (3).

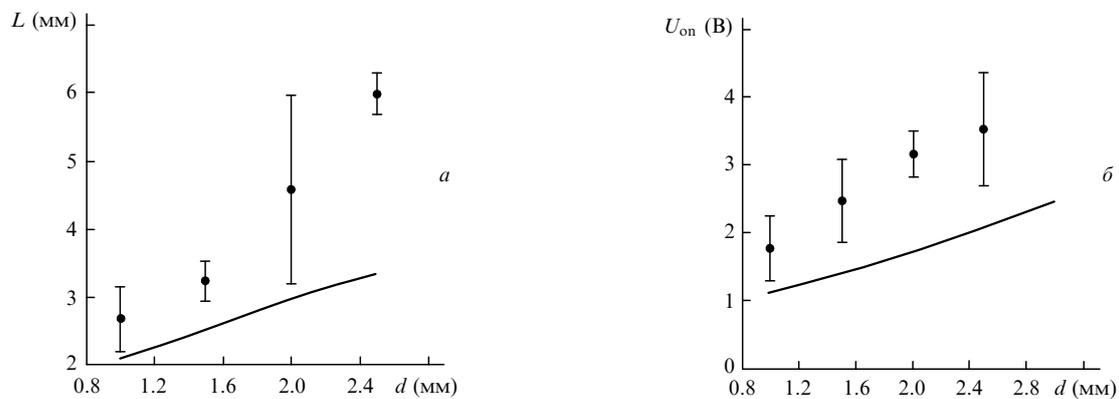


Рис.10. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные кривые) зависимости полуширины фазового распределения (а) и действующего значения напряжения включения (б) от расстояния d между концом электрода и слоем ЖК.

том прикладываемого к электроду напряжения. Это обусловлено нелинейностью зависимости фазовой задержки ЖК слоя от напряжения (вольт-фазная характеристика) (рис.9). Так, при больших напряжениях на электроде падение напряжения на ЖК слое соответствует нелинейной области вольт-фазной характеристики (действующее напряжение более 2 В). Зависимость фазовой задержки в ЖК слое от напряжения на данном участке имеет более пологий вид, чем на линейном. В результате скорость спада фазы в профиле волнового фронта при одном и том же распределении напряжения будет значительно меньше, чем в линейной области. Поэтому даже при одинаковых распределениях напряжения в случае высо-

ких потенциалов распределение фазы будет иметь большую ширину.

Как отмечалось ранее при теоретическом моделировании, на ширину распределения фазовой задержки оказывает влияние расположение электрода относительно ЖК слоя, а именно расстояние до него. Экспериментально было установлено, что с ростом расстояния ширина распределения фазы увеличивается, что подтверждается и результатами теоретического расчёта (рис.10,а). Представленные на графиках теоретические значения получены из нормированных распределений напряжения, рассчитанных в рамках предложенной модели. Экспериментальные данные приведены для электродов диаметром

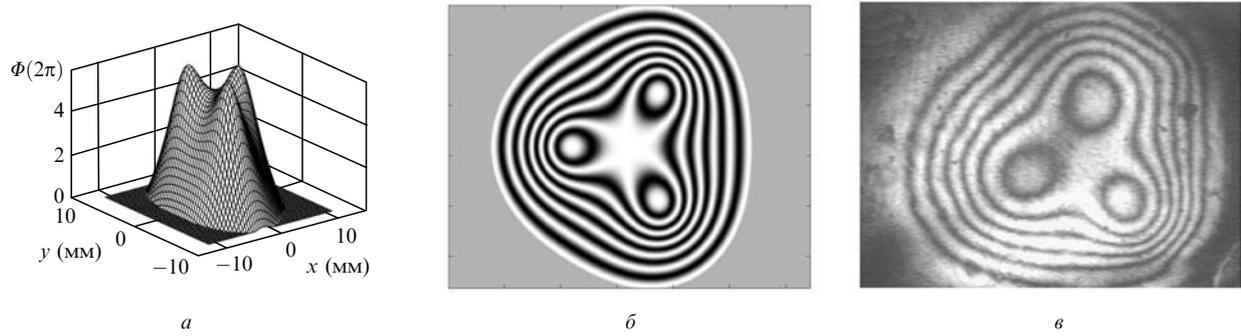


Рис.11. Распределения фазовой задержки – расчетные профиль фазы (а) и вид интерферограммы (б), а также интерферограмма, полученная в схеме со скрещенными поляроидами (в).

1.5 мм. При диаметре 1.0 мм зависимости имеют аналогичный вид.

На основе полученных экспериментальных данных были оценены величины напряжения включения $U_{оп}$, т.е. минимального напряжения, которое нужно подать на электроды корректора, чтобы началась переориентация ЖК. Для самого ЖК пороговое напряжение составляет 0.82 В. Поскольку в данном корректоре напряжение, прикладываемое к электроду, делится между ёмкостями керамического и ЖК слоев, то напряжение включения для корректора будет выше порогового для ЖК слоя. Его зависимость от расстояния между электродом и ЖК слоем представлена на рис.10,б.

В рассмотренных выше случаях напряжение подавалось только на один электрод. Если же прикладывать напряжение ко всем электродам, то можно формировать произвольное распределение потенциала и фазовой задержки. На рис.11 представлены распределения фазовой задержки для случая, когда были включены три электрода. На них подавалось одинаковое по амплитуде напряжение. Теоретическое моделирование данной ситуации проводилось в одноконтактном приближении. Распределение потенциала находилось сложением распределений от каждого электрода, при этом функция отклика для всех них считалась одинаковой. Величина напряжения, прикладываемого к электродам, выбиралась такой, чтобы размах фазового распределения совпадал с экспериментальными значениями. Размеры теоретического и экспериментального изображений на рис.11 одинаковы и равны 22×16 мм.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована работоспособность предлагаемого ЖК корректора волнового фронта на основе керамической подложки. Предложенная математическая модель на качественном уровне правильно описывает зависимости профиля напряжения и фазы от конструктивных особенностей корректора.

6. Заключение

В работе теоретически и экспериментально подтверждена возможность создания многоканального модального ЖК корректора нового типа на основе керамической подложки с высокой диэлектрической проницаемо-

стью. Разработана технология изготовления керамической подложки со встроенными электродами, которая является менее сложной по сравнению с технологией изготовления стеклянной подложки со встроенными электродами, используемой в разработанных нами ранее модальных ЖК корректорах. Экспериментально продемонстрирована работоспособность предлагаемого подхода. Показано, что пространственное распределение фазовой задержки зависит от величины прикладываемого к электродам напряжения и не зависит от его частоты. Основным фактором, определяющим ширину функции оптического отклика, является расстояние между слоем ЖК и концом электрода. Наиболее подходящими с конструктивной точки зрения являются электроды диаметром 1.5 мм, расположенные на расстоянии 1.5 мм от слоя ЖК. Предложенный и исследованный способ создания многоэлементных модальных корректоров обладает преимуществами как перед зональными, так и перед разработанными ранее модальными ЖК корректорами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-08269-офи_а).

1. Cho D.J., Thurman S.T., Donner J.T., Morris G.M. *Opt. Lett.*, **23**, 969 (1998).
2. Dayton D., Browne S., Gonglewski J., Restaino S. *Appl. Opt.*, **23**, 2345 (2001).
3. Hu L., Xuan L., Liu Y., Cao Z., Li D., Mu Q. *Opt. Express*, **12**, 6403 (2004).
4. Kotova S. P., Kvashnin M. Yu., Rakhmatulin M. A., Zayakin O. A., Guralnik I. R., Klimov N. A., Clark P., Love G. D., Naumov A. F., Saunter C. D., Loktev M. Yu., Vdovin G. V., Toporkova L. V. *Opt. Express*, **10**, 1258 (2002).
5. Kotova S.P., Kvashnin M.Yu., Rakhmatulin M.A., Zayakin O.A., Guralnik I.R., Klimov N.A., Clark P., Langlois M., Love G.D., Naumov A.F., Saunter C. D., Loktev M.Yu., Vdovin G.V., in *Techn. Dig. of the Conference on Lasers, Applications and Technologies* (Moscow, Russia, 2002, p. 68).
6. Kotova S.P., Clark P., Guralnik I.R., Klimov N.A., Kvashnin M.Yu., Langlois M., Loktev M.Yu., Love G.D., Naumov A.F., Rakhmatulin M.A., Saunter C.D., Vdovin G.V., Zayakin O.A., in *Techn. Dig. of the 19th Congress of the International Commission for Optics* (Florence, Italy, 2002, p. 181).
7. Loktev M., Vdovin G., Klimov N., Kotova S., Naumov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5741**, 163 (2005).
8. Loktev M. *PhD Thesis* (Delft: Delft University of Technology, 2005).
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред* (М.: Наука, 1982, с. 278).