

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 771.36

АДАПТИВНЫЕ ЛИНЗЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ*

© 2008 г. Г. Е. Невская*, доктор техн. наук; М. Г. Томилин**, доктор техн. наук

* Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

Рассмотрены принципы и теоретические основы построения различных типов адаптивных линз на основе жидких кристаллов. Показано их развитие от линз, работающих в поляризованном свете с большими временами фокусировки, до линз, работающих в неполяризованном свете, с увеличенной апертурой, быстродействием и улучшенным качеством изображения. Обсуждены возможности их применения в оптических системах.

Коды OCIS: 160.3710.

Поступила в редакцию 28.01.2008.

Введение

Адаптивная оптика – это современное, интенсивно развивающееся научное направление, в котором перспективно использование элементов и устройств на основе жидких кристаллов (ЖК). Области применения ЖК-элементов определяются возможностями плавного или дискретного изменения в широких пределах оптических свойств тонкого слоя материала при малых управляющих напряжениях (U) электрического поля (E -поля). Они основаны на контролируемой деформации слоя ЖК, осуществляемой либо локально, либо по всему полю зрения. Эти свойства уже три десятилетия привлекают внимание разработчиков линз с переменным фокусным расстоянием или адаптивных линз (АЛ).

В АЛ изменение фокусного расстояния осуществляется не за счет механического перемещения компонентов объектива, а в плоской ячейке без перемещающихся деталей при переориентации молекул ЖК. Принцип работы АЛ состоит в формировании управляемой фазовой задержки слоем ЖК с необходимым пространственным распределением под действием E -поля. Изменение фокусного расстояния АЛ может быть дискретным или плавным и осуществляется изменением амплитуды U и его частоты.

* Обзор составлен по материалам доклада Г.Е. Невской и М.Г. Томилина “Анализ развития адаптивных линз на жидких кристаллах”, сделанного на VII международной конференции “Прикладная оптика-2006”, СПб. 16–18.10.2006.

Пионерские исследования по созданию АЛ относятся к 1970-м годам и связаны с работами Берримана [1] и Сато [2] с сотрудниками. Первые АЛ представляли собой ЖК-ячейку, одна из подложек которой была выполнена в виде линзы, находящейся в контакте со слоем ЖК. Их недостатком являлось низкое быстродействие, вызванное большой толщиной слоя ЖК в центре или на периферии. Кроме того, возникла проблема в однородной ориентации ЖК в относительно толстом слое и на неплоской поверхности. Поэтому они не нашли дальнейшего развития.

Цилиндрические ЖК-линзы, содержащие совокупность электродов с индивидуальной адресацией были разработаны в 1981 г. группой из Сиракузского университета (США) [3]. Электроды с индивидуальной адресацией были использованы для создания сферических ЖК-линз [4, 5]. Впервые ЖК микролинзы были предложены в работах Сато [6, 7]. Линзы Френеля на основе ЖК впервые описаны в [8]; их модификации проанализированы в обзоре [9].

Использование АЛ может дать ряд интересных применений в цифровых фотокамерах с переменным фокусным расстоянием, сканнерах объемных дисплеев, корректорах астигматизма полупроводниковых лазеров и устройствах с автоматической фокусировкой. АЛ рассматриваются как перспективные оптические переключатели в одномодовых волоконно-оптических элементах применительно к эндоскопии. Пожилым людям, страдающим дальновзоркостью, при наблюдении близко расположенных объектов, находящихся на разном расстоянии от наблюдателя,

требуется несколько пар очков. Больные катарактой при удалении хрусталика также используют несколько пар очков, что неудобно в повседневной жизни. Легкие и миниатюрные АЛ, управляемые от маломощных источников, могут устранить эти проблемы.

В обзоре рассматриваются принципы и основы теории построения АЛ, а также тенденции их развития: увеличение апертуры, быстродействия и повышение качества изображения. Обсуждены возможности применения АЛ в оптических системах.

Теоретические основы работы адаптивных линз

Рассмотрим два этапа создания управляемой фазовой задержки: формирование необходимой конфигурации E -поля и вызванную им деформацию слоя ЖК. Обусловленная этой деформацией фазовая задержка обеспечивает фокусирующие свойства линзы. Изменение фокусного расстояния АЛ осуществляется изменением амплитуды и частоты E -поля.

Способы создания пространственно неоднородных полей и их расчет

Электрическое поле в микролинзах

Конфигурация E -поля в микролинзах (МЛ) задается геометрией электродов. В сферической МЛ для получения аксиально-симметричного E -поля в электродах создаются круглые отверстия диаметром L . Различают несимметричные МЛ – отверстия имеются в одном из электродов, и симметричные – совмещенные отверстия имеются в обоих электродах. В цилиндрической МЛ в электродах выполнена щель.

Расчет распределения напряженности в аксиально-симметричном поле несимметричной МЛ проведен в работах [10, 11], симметричной – в работах [12–14]. В работе [10], в частности, учтено влияние диэлектрических свойств подложки на распределение E -поля. На рис. 1 приведена схема несимметричной МЛ. Верхний электрод из хрома имеет отверстие, нижний электрод – сплошной. Зазор между ними толщиной d заполняется ЖК. Уравнения, описывающие E -поле, имеют вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \mathbf{E} = \operatorname{grad} u,$$

где \mathbf{D} – вектор электрического смещения, u – потенциал E -поля.

Так как поле потенциала $u(r, z)$ в МЛ сферически симметрично, уравнение для потенциала в цилиндрических координатах имеет вид:

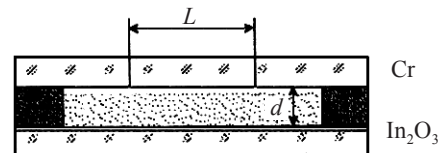


Рис. 1. Схема несимметричной микролинзы. L – апертура микролинзы, d – толщина слоя ЖК

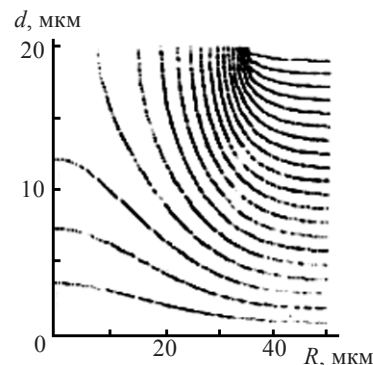


Рис. 2. Эквипотенциальные поверхности для микролинзы с $L = 70$ мкм, $d = 20$ мкм, ЖК E-7 (фирмы Merck). R – расстояние от центра линзы до рассматриваемой точки апертуры.

$$\varepsilon_{\perp} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \varepsilon_{\parallel} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где ε_{\perp} и ε_{\parallel} – диэлектрическая проницаемость в перпендикулярном и параллельном директору направлениях.

Далее формулируются граничные условия для электрического потенциала в окрестности отверстия и уравнение (1) решают численными методами. Результаты расчета в виде эквипотенциальных поверхностей для МЛ с $L = 70$ мкм, $d = 20$ мкм, ЖК E-7 фирмы Merck приведены на рис. 2. Вблизи края отверстия E -поле наиболее неоднородно. С увеличением L неоднородность уменьшается, и это приводит к исчезновению фокусирующих свойств.

Электрическое поле в адаптивных модальных ЖК-линзах

Создание АЛ с большой апертурой основано на ином формировании E -поля [15-17]. Известны два подхода: зональный (E -поле создается с помощью совокупности индивидуально адресуемых электродов) и модальный (при их ограниченном количестве). Модальные линзы (МЛ) в отличие от зональных обеспечивают плавное, непрерывное изменение фазового профиля. В МЛ один из электродов

является высокоомным управляющим электродом (УЭ), по периферии которого наносятся низкоомные контакты. Возникающая система с распределенным сопротивлением (УЭ) и емкостью (слой ЖК) имеет реактивный характер и управляет параметрами АЛ при изменении амплитуды и частоты U .

Разработаны сферические и цилиндрические АЛ. Характер волнового фронта определяется геометрией контактов: для сферической линзы – кольцевой контакт, цилиндрической – два параллельных полосковых контакта. Слой ЖК помещен между двумя стеклянными подложками с электродами. Поверхностное сопротивление УЭ (1–10 МОм/□) много больше сопротивления сплошного (заземленного) электрода (50–200 Ом/□). U прикладывается к контактам, расположенным на периферии УЭ. Если к контактам приложить синусоидальное напряжение, то из-за резистивно-емкостного характера системы изменение U в центре будет меньше изменения U на контактных электродах. С увеличением частоты различие растет, приводя к уменьшению среднеквадратичного значения U в центре апертуры. В установившемся режиме реализуется распределение среднеквадратичного значения U в слое ЖК, и в достаточно широкой области изменения параметров управляющего U это распределение будет квазипараболическим. Уравнение, описывающее распределение U по апертуре $U(x, y)$, имеет вид [16]:

$$\nabla^2 U = \rho_s c \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_s g U, \quad (2)$$

где g – проводимость слоя ЖК на единицу площади, ρ_s – поверхностное сопротивление УЭ, c – емкость на единицу площади УЭ.

Уравнение (2) при синусоидальном управляющем напряжении имеет вид:

$$\nabla^2 U = \chi^2 U, \quad (2a)$$

где $\chi^2 = \rho_s (g - i\omega c)$.

Уравнение (2a) применено для расчета поля цилиндрической АЛ:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \chi^2 U. \quad (3)$$

Из решения этого уравнения с учетом граничных условий следует, что при $|\chi|l \ll 1$, где l – характерный размер апертуры (рис. 3), зависимость $U(x, y)$ приобретает вид:

$$U(x) \approx U_0 \left[1 - \frac{\chi^2}{2} (l^2 - x^2) \right]. \quad (3a)$$

Уравнение (3a) показывает, что характер распределения напряжения в этом случае будет квазипараболическим, что позволяет создать МЛ.

В случае сферической линзы при $|\chi|l \ll 1$ уравнение (2a) приобретает вид:

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\chi^2}{4} \right) (l^2 - r^2). \quad (4)$$

Как и в случае цилиндрических МЛ, напряжение в сферических МЛ изменяется квадратично в зависимости от расстояния до центра. Однако глубина прогиба кривой $U(r)$ для сферической МЛ в два раза меньше, чем в цилиндрической. Это означает, что сферические МЛ имеют больший диапазон управляющих частот. Наличие квадратичного E -поля вызывает такое изменение оптической анизотропии (Δn) слоя ЖК, при котором фазовая задержка от периферии $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi (r = l)$ к центру $\Delta\Phi_0 = \Delta\Phi (r = 0)$ плавно уменьшается, обеспечивая условие фокусировки.

Деформация нематического ЖК в неоднородном электрическом поле

Деформация директора \mathbf{n} в пространственно неоднородном E -поле определяется из условия минимизации функционала свободной энергии. Для этого необходимо выполнение условия Эйлера–Лагранжа. В цилиндрических координатах при отсутствии твист-эффекта и, пренебрегая вкладом флекса-эффекта, уравнение Эйлера–Лагранжа принимает вид [11]:

$$K_{11} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + K_{33} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \Delta \epsilon \epsilon_0 E_r E_z = 0, \quad (5)$$

где θ – угол отклонения директора (\mathbf{n}) от исходной ориентации (рис. 3), K_{11} , K_{33} – константы упругости для продольного и поперечного изгибов соответственно. E_z и E_r – компоненты E -поля:

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad \text{и} \quad E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}.$$

Задача решается в одноконстантном приближении ($K_{11} = K_{33}$). Проведен численный расчет деформации директора нематика в гомеотропной несим-

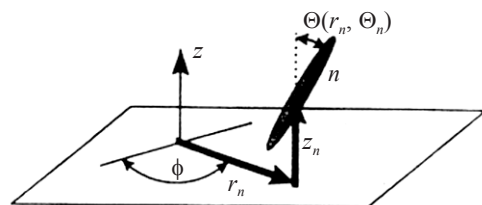


Рис. 3. Расположение директора в объеме ЖК при исходной гомеотропной ориентации.

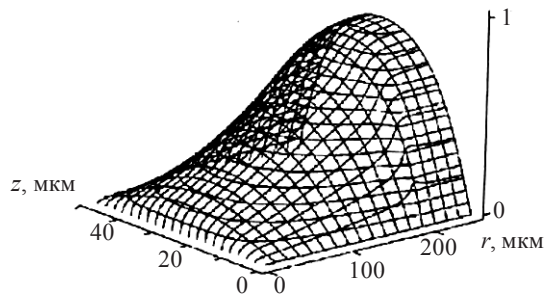


Рис. 4. Распределение директора ЖК в гомеотропной МЛ с $L = 600$ мкм, $U = 14$ В.

метричной МЛ [18, 19] в предположении сильного сцепления молекул ЖК с подложкой. В работе [11] задача решена в приближении малых деформаций ($n = [\theta; 0; 1]$), в работе [10] – для любых деформаций $[\sin\theta; 0; \cos\theta]$. Распределение директора для сферической МЛ с исходной гомеотропной ориентацией представлено на рис. 4 [20]. Деформация плавно увеличивается при удалении от центра линзы и достигает максимума вблизи края отверстия.

Результаты расчета деформации директора в симметричной планарной МЛ представлены в работе [21]. Численный расчет угла θ проведен в одноконстантном приближении в предположении, что твист-деформация в слое ЖК отсутствует. Одновременно рассмотрена динамика переориентации молекул в планарной МЛ.

Расчет деформации в АЛ [17] выполнен с использованием уравнения Эриксона–Лесли:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \frac{\Delta \epsilon U^2}{4\pi d^2} \sin \theta \cos \theta = 0. \quad (6)$$

Уравнения (6) и (2) описывают распределение угла θ по апертуре линзы.

Важной величиной для характеристики АЛ является значение двулучепреломления (Δn). Пространственное распределение его локальных значений вычисляется по формуле:

$$\Delta n = \frac{1}{d} \int_0^d n(\theta(r, z)) dz - n_o, \quad (7)$$

где $n(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}$,

n_e, n_o – показатели преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей.

Профиль фазовой задержки между обыкновенной и необыкновенной волнами определяется выражением:

$$\Delta \Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^d n(\theta) dz - n_o d \right]. \quad (8)$$

Распределение фазовой задержки по апертуре линзы определяет оптические свойства линзы. С помощью формул (7), (8) при известном распределении директора $\theta(r, z)$ была рассчитана фазовая задержка $\Delta \Phi(r)$ для гомеотропной [10, 11], планарной [21] МЛ, а также для АЛ с планарной ориентацией [17]. Для гомеотропной линзы в центре отверстия фазовая задержка равна нулю, с увеличением расстояния r от центра она возрастает. Фазовый профиль зависит от приложенного напряжения, в определенном диапазоне напряжений зависимость $\Delta \Phi(r)$ становится квадратичной и гомеотропная линза становится сферической рассеивающей линзой. Это напряжение увеличивается с увеличением размера линзы. Для МЛ с отношением $L/d \geq 15$ параболический фазовый профиль не наблюдается. У планарной АЛ и МЛ фазовая задержка возрастает от края линзы к ее центру (рис. 4) [17, 21] и в определенном диапазоне U имеет форму параболы. В этом случае линза является сферической собирающей.

Оптические характеристики микролинз

Несимметричные МЛ

МЛ с планарной (гомогенной) ориентацией

В несимметричных МЛ [6, 7, 22] один из электродов представлял собой непрозрачную алюминиевую пленку, в которой с помощью фотолитографии выполнено отверстие диаметром 750 мкм, а противоположный электрод – прозрачный слой оксида индия (ITO) (рис. 1). Пространство между электродами заполнялось планарно (гомогенно) ориентированным ЖК толщиной 50 мкм с $\Delta \epsilon > 0$. Исследования профиля интенсивности проходящего через отверстие света показали, что структура обладает свойствами собирающей линзы при низких U и рассеивающей – при высоких, что в свою очередь определяется деформацией ЖК в аксиально-симметричном E -поле. Максимальная деформация наблюдается вдоль края отверстия, где поле наиболее неоднородно. При малых U деформация в центре мала, в результате чего формируется профиль показателя необыкновенной волны (e -волны), определяющий фокусирующие свойства микролинзы

(рис. 5а). При больших U переориентация молекул происходит и в центре микролинзы, поэтому показатель преломления e -волны проходит через минимум в центре (рис. 5б) и микролинза приобретает дефокусирующие свойства. Поскольку профиль показателя преломления зависит от U , то и аналогичная зависимость имеет место для фазовой задержки. Это подтверждается экспериментальными данными по исследованию структуры фазовых профилей (рис. 6). Фазовая задержка при низких U максимальна в центре МЛ. С ростом U глубина фазового фронта уменьшается и при U около 40 В (для $L = 174$ мкм) МЛ становится рассеивающей (фазовая задержка в ее центре становится меньше, чем на краях).

Зависимость фокусного расстояния для планарной МЛ от U для фокусирующего режима показана на рис. 7а [23, 24]. При увеличении U фокусное расстояние сначала уменьшается, достигая минимума при некотором напряжении U_m , а потом увеличивается. С ростом диаметра микролинзы фокусное расстояние увеличивается. Зависимость фокусного расстояния от U для дефокусирующего режима показана на рис. 7б. С ростом U фокусное расстояние уменьшается до некоторого значения, а затем не изменяется. Напряжение перехода от фокусирующего к дефокусирующему режиму принимает

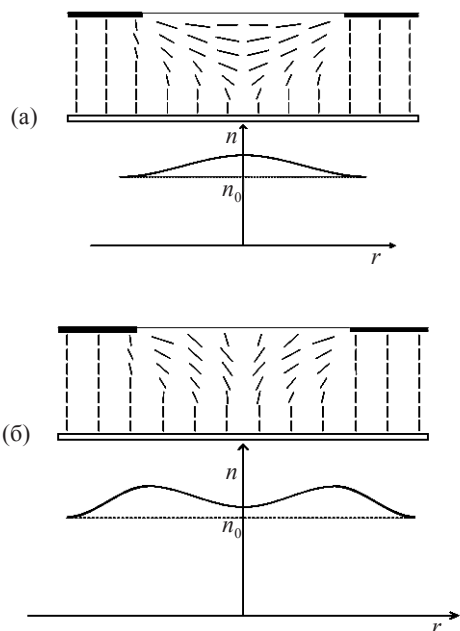


Рис. 5. Распределения директора и показателя преломления для e -волны в ЖКМЛ с гомогенной ориентацией (без учета дисклинации): а – малые напряжения, б – более высокие напряжения.

более высокие значения у микролинз с большим диаметром.

Исследования интерференционных картин планарной микролинзы в поляризационный микроскоп показали, что с повышением U в линзе формируется дисклинация, которая ухудшает ее оптические свойства [6, 23, 24]. На рис. 8 представлены интер-

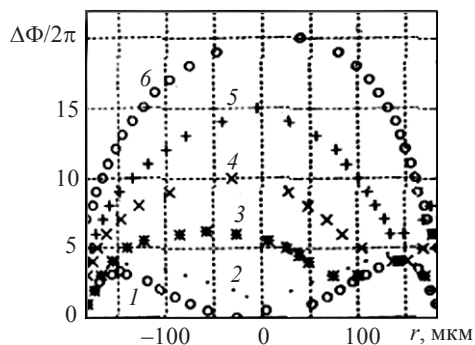


Рис. 6. Профили фазовой задержки в планарной МЛ. $L = 370$ мкм, 1 – $U = 2$, 2 – 3, 3 – 4, 4 – 5, 5 – 9, 6 – 30 В.

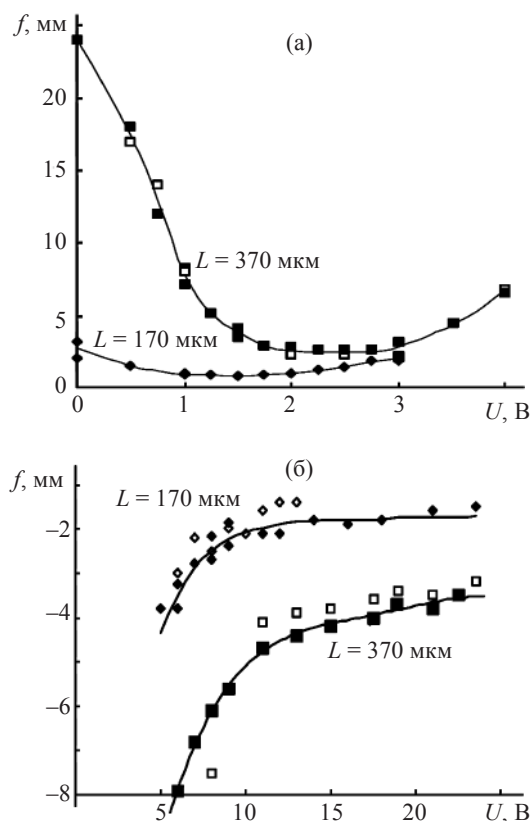


Рис.7. Зависимости фокусного расстояния от напряжения для планарной МЛ для фокусирующего (а) и дефокусирующего (б) режимов, $d = 120$ мкм, $\Delta\epsilon > 0$ (5СВ).

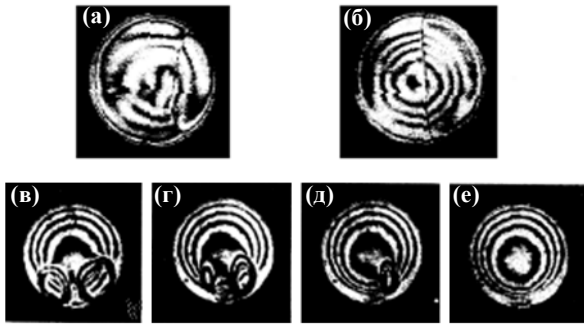


Рис. 8. Интерференционные картины планарной микролинзы, показывающие возникновение дисклинации (а, б) и ее исчезновение (в, г, д, е) с течением времени при наличии мультидоменной структуры: в – через 1 с, г – 10 с, д – 20 с, е – 40 с.

ференционные картины при различных U . При увеличении U на краю возникает излом фазового профиля (рис. 8а). С ростом U область излома растет, пока не появится дисклинация (рис. 8б). Способы ее устранения описаны в ряде работ. Например, в работе [25] на границе микролинзы, где формируется дисклинация, создается клинообразная область с гибридной ориентацией. Эта область меняет характер переориентации молекул ЖК в МЛ, в результате чего дисклинация уходит из области отверстия (рис. 8в, г, д, е).

Исследование зависимости числовой апертуры и разрешающей способности МЛ с планарной ориентацией [24] от U для разных отношений L/d показало, что наилучшие оптические свойства наблюдаются на ниспадающей ветви зависимости фокусного расстояния от U и в области минимума этой зависимости. Сообщается, что достигнуто уменьшение управляющего напряжения до 6,5–7 В при частоте 10 кГц и использовании ЖК с $\Delta\epsilon = 2$ при толщине слоя 50 мкм [26].

МЛ с гомеопланарной (гибридной) ориентацией

Молекулы ЖК в гибридной МЛ имеют различную исходную ориентацию вблизи разных подложек: гомеотропную на одной и планарную на другой. Результаты исследований приведены в работах [23, 24, 27–29]. В случае ЖК с $\Delta\epsilon < 0$ при низких U МЛ имеет дефокусирующие свойства. При высоких U (около 80 В) МЛ становится собирающей и имеет хорошие оптические свойства, однако ее фокусное расстояние слабо зависит от U . При использовании ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ наблюдается обратная ситуация: при малых U МЛ является собирающей, при высо-

ких – рассеивающей, о чем свидетельствует структура фазовых профилей. Зависимость фокусного расстояния от U для гибридной МЛ в фокусирующем режиме аналогична соответствующей зависимости для планарной МЛ (рис. 7б). Измерения времен отклика и восстановления ориентации показали, что для МЛ с $\Delta\epsilon > 0$ они составляют несколько секунд. При $\Delta\epsilon < 0$ в фокусирующем режиме нужны более высокие U , и время отклика может быть уменьшено до нескольких миллисекунд. В отличие от планарной МЛ, в гибридной не возникает дисклинации. Недостатком этого типа МЛ является сдвиг центра фазового профиля относительно центра отверстия.

Гомеотропные МЛ

Результаты исследования оптических свойств МЛ с гомеотропно ориентированным ЖК представлены в работах [11, 20, 30]. В этом случае при приложении U формируется аксиально-симметричное распределение показателя преломления для e -волны с минимумом в центре (как на рис. 5в), т. е. гомеотропная линза должна иметь свойства рассеивающей линзы. Исследованы интерференционные картины (рис. 9) и фазовые профили этих МЛ при различных U . Наблюдается дефокусирующий режим, причем при определенном напряжении U_p профиль фазовой задержки становится квадратичным и МЛ также становится сферической. U_p повышается с увеличением размера линзы. При дальнейшем увеличении U профиль фазовой задержки становится близким к линейному. Режим перестраиваемой линзы наиболее выражен у МЛ с отношением $L/d = 3,5$. При малых U МЛ обладают двумя фокусами, причем один из них является кольцевым, другой – точечным. Точечному фокусу соответствуют большие значения фокусного расстояния. Когда напряжение становится равным U_p , точечный и кольцевой фокус сливаются.

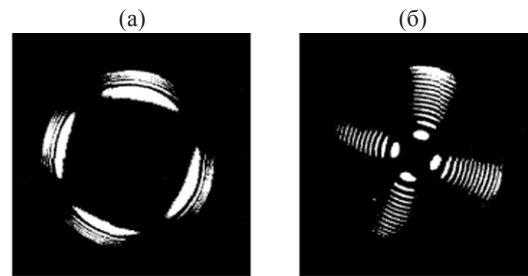


Рис. 9. Интерференционные картины гомеотропной МЛ. $L = 600$ мкм, а – $U = 6$, б – 14 В.

Числовая апертура МЛ зависит от отношения L/d . Максимальная числовая апертура при U_p наблюдается у МЛ с отношением $L/d = 3,5$, она достигает значения 0,11. Разрешающая способность гомеотропных МЛ увеличивается с уменьшением параметра L/d и достигает значения примерно 200 лин/мм, что является высокой величиной для АЛ.

В работе [11] исследована МЛ с ЖК с $\Delta\epsilon > 0$, обладающая дефокусирующими свойствами. Однако ее фокусные расстояния на порядок меньше, чем у аналогичных МЛ с $\Delta\epsilon < 0$. Теми же авторами приведены величины сферических aberrаций этих линз при напряжении 6,5 В и частоте 10 кГц, свидетельствующие об относительно высоком оптическом качестве.

Симметричные МЛ

Симметричная МЛ имеет отверстия одинакового диаметра в обоих электродах, помещенные одно над другим. Результаты исследований представлены в работах [31–35]. Переход к таким МЛ имел целью устранить дисклинации и сдвиг центра интерференционной картины у несимметричных планарных и гибридных МЛ. В симметричных МЛ не наблюдается сдвига центра интерференционной картины относительно центра отверстий, однако при повышении U вблизи края отверстия возникают две небольшие дисклинации. E -поле в симметричной МЛ отличается сильной неоднородностью – напряженность поля в центре значительно ниже, чем при несимметричных электродах, а рабочие U по сравнению с несимметричной МЛ повышаются. При малых U имеются два фокуса. При повышении U фокусное расстояние сначала убывает, достигает минимального значения, а затем растет. При некотором U фокусы микролинзы сливаются и наблюдаются наилучшие оптические свойства. Качество изображения симметричных линз характеризуется полушириной кривой функции рассеяния точки на уровне полумаксимум (FWM), равной для сферической линзы 2,5 мкм [13], а для цилиндрической 2,2–2,3 мкм [36].

В работах [34, 35] исследована зависимость параметров МЛ от свойств ЖК-материала. Максимальное значение числовой апертуры линейно увеличивается с ростом оптической анизотропии Δn и приведенной диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon/\epsilon$, а U , при котором наблюдается максимум, убывает с ростом диэлектрической анизотропии. В работе [35] проанализирована роль упругих свойств нематика в формировании астигматизма МЛ и показано, что чем больше анизотропия упругих свойств, тем сильнее астигматизм.

Усовершенствование симметричных МЛ описано в работах [37, 38]. Electroды имеют отверстия и разделены узкими щелями на два (четыре) сектора; на эти сектора могут подаваться разные U . Вследствие различия деформации нематика в разных частях МЛ возникает линейная добавка в фазовый профиль, вызывающая сдвиг луча в поперечном направлении. При небольшой разнице U оптические свойства остаются хорошими, и появляется возможность управляемого смещения точки фокусировки перпендикулярно к оптической оси. В работе [37] сообщается, что это смещение при сохранении параболического фазового профиля составляет 10 мкм (при $L/d = 3$).

В работах [36, 39] предложен другой вариант МЛ: помимо обычных управляющих электродов имеются четыре дополнительных, к которым подводятся различные U . При определенных условиях управления удастся избежать появления дисклинации в области отверстия и расширить диапазон U наблюдения фокусирующих свойств. Улучшение оптических свойств МЛ было достигнуто при использовании 4 электродов, расположенных друг над другом [14, 40]. Два из них имели круглые отверстия (линзовые электроды), два других являлись сплошными, нанесенными на стеклянные подложки и расположенными выше и ниже обычных линзовых электродов. В работе [40] исследована числовая апертура (NA) МЛ при сложении и вычитании E -полей, созданных парами электродов в слое ЖК. Показано, что NA_{\max} на 40% выше при вычитании E -полей, чем в случае их сложения, а также чем в случае обычной МЛ. В работе [14] теоретически и экспериментально показана возможность уменьшения сферической aberrации и астигматизма при подборе U на электродах.

Рассмотрев известные типы МЛ на нематиках, можно констатировать, что при малых U МЛ с планарной и гибридной ориентацией обладают фокусирующими свойствами, а с гомеотропной – дефокусирующими. Сравнение оптических свойств МЛ проведено в работе [29]. Зависимость фокусного расстояния от U схожа для всех типов МЛ: при повышении U оно сначала уменьшается, достигая минимума при некотором U_m , а затем возрастает. При дальнейшем увеличении U происходит инверсия оптических свойств МЛ: у гибридной и планарной МЛ наблюдаются дефокусирующие свойства. Максимальная числовая апертура для всех МЛ является наибольшей в случае, если отношение $L/d = 3$. Сравнение NA_{\max} у различных МЛ показывает, что наибольшая фокусирующая способность достигается при планарной ориентации ($NA_{\max} = 0,21$), а дефокусирующая – при гомеотропной ($NA_{\max} = 0,22$). Диапазон U , в котором можно уп-

равлять фокусным расстоянием, зависит от типа МЛ и от величины параметра L/d . Более широким он будет у гомеотропных микролинз. Максимальная разрешающая способность планарных и гибридных МЛ наблюдается при U_m , причем она выше у планарных. В дефокусирующем режиме наибольшая разрешающая способность у гомеотропной МЛ.

Оптические свойства симметричной и несимметричной МЛ с планарной ориентацией схожи. Создание симметричных МЛ связано с большими технологическими трудностями. Наблюдаемая в несимметричных планарных МЛ дисклинация возникает при U в полтора раза превышающих напряжения максимума числовой апертуры U_m , и потому в рабочем диапазоне U мало влияет на оптические свойства МЛ.

Для увеличения апертуры предложено расположить управляющий электрод на внешней поверхности одной из стеклянных подложек. В этом случае фокусирующие свойства реализуются для отверстий большего диаметра (5–7 мм) [41]. Это приводит к увеличению рабочего U до 40–100 В, что снижает привлекательность таких линз. В цилиндрических линзах с шириной щели 2 мм аналогичное решение увеличило U до 120–180 В [42]. В работе [43] в эту линзу над верхней подложкой был добавлен еще один слой ЖК (управляющий электрод один и находится в центре). Рассмотрены два случая взаимной ориентации молекул ЖК: оптические оси параллельны и ортогональны. Оптическая сила линз в этих случаях мало отличается (около 6 м^{-1} при $U = 100 \text{ В}$), но она существенно выше, чем у линзы с одним слоем (около 4 м^{-1} при $U = 100 \text{ В}$). Диапазон рабочих напряжений для линз с двумя слоями 90–120 В, что выше, чем для линз с одним слоем ЖК.

Общим недостатком АЛ на нематиках является большое время их фокусировки, составляющее несколько секунд. В работе [44] предложено использовать нематик с двухчастотным режимом управления, что позволяет уменьшить времена фокусировки почти на порядок.

Микролинзы на основе сегнетоэлектрических смектиков (С*ЖК)

Недостатком МЛ на основе нематиков является их низкое быстродействие. Повышение быстродействия осуществляется использованием С*ЖК [45]. Дипольные моменты молекул в С*ЖК перпендикулярны директору и лежат в плоскости смектического слоя. В E -поле все диполи выстраиваются по направлению поля. Поле противоположного знака переориентирует диполи, а вместе с ним и директор, который поворачивается по образующей конуса в плоскости слоя на угол 2θ , где θ – угол наклона

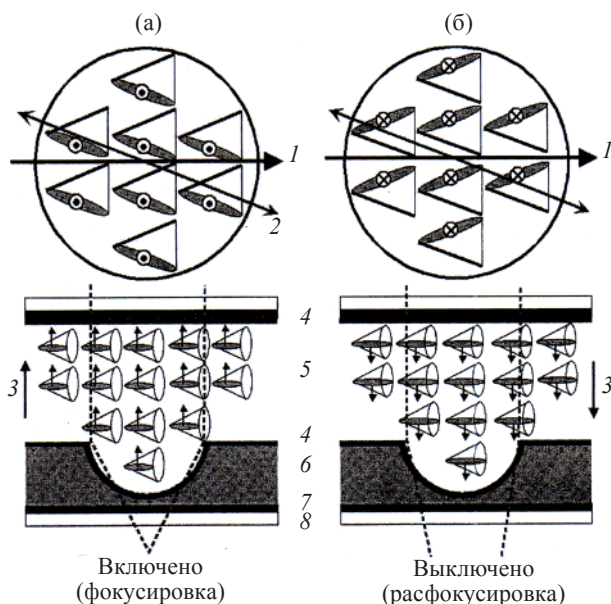


Рис. 11. Фокусирующий (а) и дефокусирующий (б) режимы работы МЛ на основе С*ЖК. 1 – направление натирания, 2 – поляризованный свет, 3 – направление электрического поля, 4 – ориентирующий слой, 5 – слой С*ЖК, 6 – фотополимер, 7 – прозрачный электрод, 8 – стекло.

молекул относительно оси спирали. Электрооптический отклик зависит от полярности приложенного U , причем время отклика существенно меньше, чем для неполярных ЖК. В работе [45] для создания массива С*ЖК-МЛ на одной из поверхностей формируется периодическая структура из отверстий глубиной 9 мкм и радиусом 200 мкм. Для этого на поверхность наносится фотополимер и через фотомаску подвергается воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения. С*ЖК введен в ячейку капиллярным методом и имеет планарную ориентацию. Принцип работы МЛ показан на рис. 10. В зависимости от направления E -поля реализуется как фокусирующий (рис. 10а), так и дефокусирующий (рис. 10б) режимы. Исследована зависимость времени отклика от величины E -поля. Время переключения из одного режима в другой составляет 100–200 мкс. С увеличением напряженности поля время отклика уменьшается.

Оптические характеристики адаптивных линз

Модальные линзы

В разделе “Электрическое поле в адаптивных модальных ЖК-линзах” описан способ формирования E -поля и приведены уравнения, описываю-

щие распределение напряжения по апертуре линзы. Численный расчет позволяет находить оптимальные значения частоты и амплитуды управляющего U для получения параболической зависимости фазовой задержки по апертуре линзы [15–17, 46–50]. Однако даже при известных параметрах ЖК и модальных (АЛ) вычисленные оптимальные соотношения амплитуда-частота не всегда приемлемы для реальной линзы. Это связано с технологическими особенностями их сборки: калибровочные параметры для каждой линзы индивидуальны. Основные параметры экспериментальных образцов МАЛ следующие: фокусные расстояния сферических и цилиндрических линз изменялись от 0,5 м до бесконечности; диаметр апертуры сферической линзы составлял 5 мм, размеры апертуры цилиндрической линзы были равны 5×15 мм. Использовался планарно ориентированный нематик фирмы “Merck” с $\Delta n = 0,26$. Высокоомный электрод был создан напылением прозрачного резистивного покрытия с сопротивлением около 9 МОм/□. Управляющее напряжение не превышало 10 В, частота – 17 кГц.

В работах [18, 49, 51] сообщается об АЛ с оптическим управлением. Они сочетают в себе все преимущества электрически управляемых адаптивных линз, но имеют дополнительную особенность – зависимость фокусного расстояния от интенсивности падающего на линзу излучения. Они представляют собой многослойную структуру. Внешними слоями являются стеклянные подложки с нанесенными на них электродами. На одной из них электрод имеет круглое отверстие для случая сферической линзы или представляет собой два полосковых контакта для цилиндрической линзы. Область без электродов играет роль апертуры линзы. На эту подложку наносится слой фоточувствительного полупроводника. Поверхностное сопротивление этого слоя много больше сопротивления сплошного низкоомного электрода при любой интенсивности падающего излучения. Используется планарно ориентированный нематик. Конструкция позволяет создавать в области апертуры емкостно-резистивный делитель U . Управлять в такой системе распределением U можно не только с помощью амплитуды и частоты приложенного U , но и изменением интенсивности излучения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что профиль фазовой задержки для пучка света с однородным и гауссовым распределением интенсивности близок к параболическому. Фокусное расстояние монотонно возрастает с увеличением мощности излучения. Приведены примеры простых адаптивных систем этого типа.

В электрически управляемых линзах на основе полимер-диспергированных ЖК (ПДЖК) градиент показателя преломления создается при изменении размеров микрокапель [52, 53]. Для этого на смесь ЖК-мономер воздействуют УФ излучением через фотомаску. Воздействие слабого УФ излучения дает капли более крупного размера и наоборот – чем сильнее облучение, тем меньше размер капель. Области с каплями меньшего размера имеют большую концентрацию полимера, и потому показатель преломления этой области будет меньше, чем область с большими каплями. При воздействии E -поля переориентация молекул нематика начинается при критическом напряжении U_d . Зависимость U_d от размера капли (D) выглядит следующим образом: $U = C/\sqrt{D}$, где C – const. Чем больше размер капли, тем меньше управляющее U . Для создания собирающей и рассеивающей линз используются фотомаски с круговым градиентом пропускания. На рис. 11 показаны фотомаски и профили показателей преломления для собирающей (а) и рассеивающей линз. Недостатком ПДЖК-линз – высокое управляющее U (более 100 В). Для уменьшения управляющего U авторы предложили использовать ЖК с полимерной сеткой с градиентом профиля показателя преломления. Концентрация ЖК в этой смеси – 95%, поэтому U снижается до 10 В. Фокусное расстояние этой линзы примерно 310 м, и для работы линза должна использовать скрещенные поляроиды. Линза с таким большим фокусным расстоянием

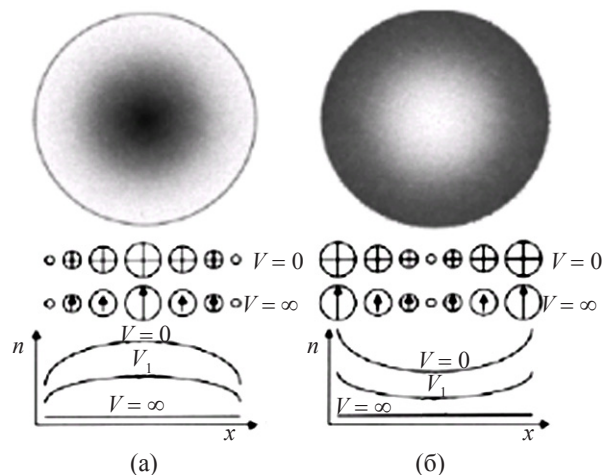


Рис. 11. Адаптивные линзы на ПДЖК для фокусирующего (а) и расфокусирующего (б) режимов.

представляет интерес для целей астрономии и спутниковой аппаратуры. Для работы в неполяризованном свете предложено использовать два ортогональных ориентированных гомогенных слоя ЖК [53].

В работах [54, 55] описаны линзы, в которых фокусирующие свойства задаются исходным профилем поверхности подложки, выполненным в виде сферических углублений диаметром 450–500 мкм. Нанесенные на них электроды формируют неоднородные E -поля. При увеличении U до 200 В фокусное расстояние изменяется от 3,3 до 3,5 см, время фокусировки – 200 мкс [54].

В работе [56] предложены АЛ, использующие новый принцип формирования градиента показателя преломления в композиции ЖК/мономер. В отсутствие E -поля ЖК и мономер в смеси распределены равномерно. При приложении неоднородного E -поля молекулы ЖК перемещаются в область более сильного поля. С другой стороны, наблюдается их диффузия в обратном направлении, вызванная различием концентрации. В итоге возникает градиент концентрации ЖК, что приводит к градиенту показателя преломления. Изменение величины управляющего напряжения позволяет изменять распределение показателя преломления и, следовательно, фокусного расстояния линз. Авторы считают достоинством таких АЛ малые величины астигматизма и светорассеяния. Недостатками являются высокие величины управляющих напряжений (до 180 В) и длительные времена фокусировки (3 мин при световом диаметре 9 мм, 1 с при диаметре 50 мкм). Данный принцип рекомендован для создания оптических микроэлементов: микролинз, микропризм, линз Френеля.

Интересно предложение использовать АЛ для формирования страниц текста в оптических системах памяти [57].

Применение адаптивных линз в оптических системах

Устройство записи информации на оптические диски

Бифокальные АЛ (с двумя фиксированными значениями фокусного расстояния) использованы для записи информации на оптические диски [58]. Новые разработки направлены на увеличение объема памяти носителей. Для этого в толще диска помещен дополнительный регистрирующий слой. Для записи и считывания информации при использовании двух слоев удобна бифокальная оптическая система. Задача решена с помощью АЛ, выполненной в виде твистовой ЖК ячейки (ТЖКЯ) и осуществ-

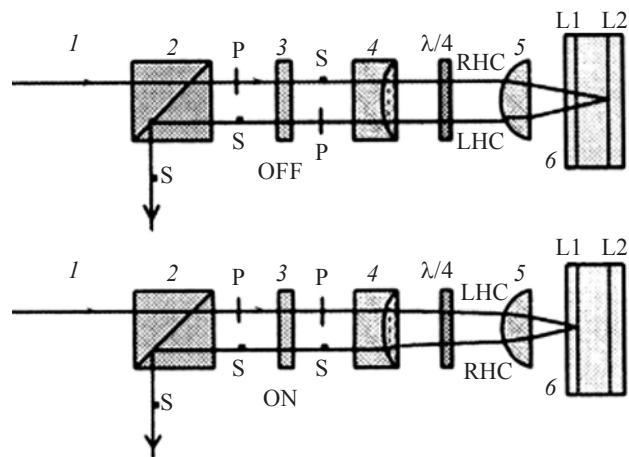


Рис. 12. Схема бифокальной АЛ, выполненной в виде ТЖКЯ. 1 – излучение лазера, 2 – делитель пучка, 3 – ТЖКЯ, 4 – АЛ, 5 – объектив, 6 – диск. S , P – ортогональные направления поляризации света; OFF, ON – режимы “выключено” и “включено”; LHC, RHC – лево- и правосторонний свет; $L1$, $L2$ – регистрирующие слои в объеме диска.

ляющей переключение между различными модами поляризации (рис. 12). В положении “выключено” ТЖКЯ за счет закрученной структуры ЖК поворачивает линейно поляризованный свет на 90° . В результате свет взаимодействует с ЖК с показателем преломления n_o и фокусируется в точке на большом фокусном расстоянии (верхняя часть рис. 12). В положении “включено” оптическая активность слоя ЖК исчезает, и плоскость поляризации света не изменяется при его прохождении через слой ЖК с показателем преломления n_e . При этом свет фокусируется в точке с малым фокусным расстоянием (нижняя часть рис. 12), и ТЖКЯ работает как бифокальная переключаемая линза.

Фирмой Philips (Нидерланды) были изготовлены образцы бифокальных АЛ [58]. Материалом служил полимеризующийся ЖК фирмы “Merck” на основе цианобифенилов с добавкой, увеличивающей диэлектрическую анизотропию. АЛ сферической конфигурации с радиусом 49 мм и диаметром 3,44 мм изготавливались формовкой с последующей фотополимеризацией. Разница в фокальном расстоянии для двух поляризаций составила 19 мм.

Оптоволоконный переключатель

Семейство МЛ предложено использовать в качестве оптических переключателей для волоконно-оптических элементов [22, 59]. Особенностью это-

го направления является применение не столько фокусирующих свойств МЛ, сколько формирование апертуры выходного светового сигнала, которую согласуют с входной апертурой оптического волокна. Слой ЖК в МЛ имел толщину 50 мкм и размещался на расстоянии 7 мм от торца оптического волокна ($NA = 0,1$) с сердцевинной диаметром 10 мкм. С помощью ПЗС-матрицы измерялось изменение интенсивности проходящего через МЛ и оптическое волокно светового сигнала от He–Ne-лазера с диаметром пучка 2 мм при подаче U от 0 до 4 В. Исследовались изменения интенсивности излучения на выходе оптического волокна при изменении U , времена отклика при различных условиях ориентации ЖК и значениях диэлектрической анизотропии. Эксперименты показали, что интенсивность излучения на выходе оптического волокна возросла при оптимальной фокусировке в 210 раз при $U = 1$ В. Время отклика при двухчастотном режиме управления МЛ составило 5 с.

В работах [60, 61] МЛ использована для управления световым потоком в одномодовом оптическом волокне для эндоскопов. Благодаря фокусирующему действию МЛ интенсивность проходящего сигнала ($\lambda = 458$ нм) через оптическое волокно с диаметром жилы 3,2 мкм увеличилось более чем в 1100 раз при $U = 1$ В и расстоянии до оптического волокна 1 см. При толщине слоя ЖК 27 мкм время отклика МЛ составило несколько десятков секунд. Для широкого применения необходимо повышение быстродействия, что позволяют С*ЖК.

Системы оптического ограничения

Массив несимметричных МЛ был использован для ограничения интенсивности светового потока, проходящего через кювету, заполненную нелинейно поглощающей средой – раствором фуллерена C_{70} в толуоле при концентрации $2,3 \times 10^{-3}$ М [62, 63]. Толщина кюветы подбиралась так, чтобы поглощающая среда оказалась в фокальной плоскости МЛ. Источником излучения служил многоимпульсный Nd:YAG лазер ($\lambda = 532$ нм) с длительностью импульса 1 нс. Для регистрации ослабления интенсивности светового потока использовался калиброванный диод ФД-23 и калориметр ИЭК-1. Измерения производились при параллельной и перпендикулярной ориентации поляризации излучения по отношению к ориентации директора ЖК. Результаты, полученные для излучения выше порога в 3 мДж с параллельной ориентацией поляризации, подтвердили возможность использования МЛ для оптического ограничения.

Дефлектор на основе АЛ с разделенными электродами

Особенность конструкции таких АЛ состоит в том, что система симметричной линзы имеет на верхней и нижней подложке по два независимо управляемых разделенных электрода, параллельных друг другу [32, 37]. Исследования проводились с АЛ, содержащей отверстия диаметром 300 мкм, при толщине слоя ЖК 40 мкм. Измерительная установка содержала He–Ne-лазер и CCD-камеру, связанную с поляризационным микроскопом. При подаче $U = 16$ В на одну пару электродов и 14,5 В на другую пару наблюдался сдвиг сфокусированного пучка на 2,7 мкм в плоскости фокусировки. Этот эффект можно использовать в оптических системах связи.

Адаптивная контактная линза

При использовании очков разрешающую способность можно повысить устранением aberrаций линз. Компенсация aberrаций высшего порядка возможна, если корректирующий элемент оптики сопряжен с очковой линзой. В работах [64–68] предложено использовать ЖК-корректор в виде адаптивной контактной линзы, имплантированной в глаз. Это решает проблему оптического сопряжения и позволяет компенсировать aberrации непосредственно в глазу.

Рассмотрены индуктивный (рис. 13) и электростатический варианты беспроводного управления имплантантом. При использовании контактной линзы диаметром 5 мм показана возможность электростатического управления при изменении глубины аккомодации от бесконечности до 30 см, что открывает перспективы динамической коррекции aberrаций высшего порядка человеческого глаза.

ЖК-линзы для бифокальных очков

Если адаптивная контактная линза находится на стадии разработок, то ЖКЛ для бифокальных очков – на стадии производства фирмой Pixel Optics



Рис. 13. Адаптивная ЖК-линза с беспроводным управлением.



Рис. 14. Прототип бифокальных очков разработки фирмы Pixel Optic.

(рис. 14) [69, 70]. Очки предназначены для компенсации дальнозоркости, от которой страдает 93% населения старше 45 лет. При отсутствии напряжения очки используются для рассматривания близко расположенных объектов, при подаче напряжения – для наблюдения удаленных объектов. Для управления слоем ЖК толщиной 5 мкм при дискретном изменении фокусировки требуется напряжение 1,8 В.

АЛ можно использовать и для изменения преломляющей способности глаза. Л. Тибос и А. Брэдли из Калифорнии создали пространственный модулятор света, содержащий 127 ЖК-ячеек и расположенный во входном зрачке глаза. Эти ячейки позволяют по программе осуществлять изменения преломления призматического (0,8 диоптр.), сферического (1,5 диоптр.) характера и астигматизма в сечении зрачка диаметром 3 мм. Субдискретизация может быть фактором, ограничивающим диапазон изменения преломления.

Применение АЛ в оптических системах не ограничивается приведенными примерами. Новым является их использование в качестве оптических пинцетов и ловушек при работе с малыми объектами в объемных средах [71].

Заключение

В обзоре проведен анализ тенденций развития адаптивных линз на ЖК: увеличение апертуры, быстродействия и улучшение качества изображения. АЛ представляют собой плоские элементы без перемещающихся деталей, позволяющие осуществлять изменение фокусного расстояния в широких пределах. Различают микролинзы и линзы с увеличенной апертурой. Большинство АЛ работают при малых управляющих напряжениях. Использование

С*ЖК позволило получить быстродействие порядка 100–200 мкс (при комнатной температуре). Перспективным для повышения оптического качества АЛ является применения структур на основе ЖК, диспергированных в полимерную матрицу.

Следует признать, что многие эксплуатационные параметры, такие как относительно низкое быстродействие, большое светорассеяние и невысокое оптическое качество, еще нуждаются в улучшении. Тем не менее, достигнутые эксплуатационные свойства АЛ открывают интересные возможности их применения в устройствах фотоники: информационных дисплеях, оптических модуляторах, системах оптической фокусировки, устройствах коррекции зрения, оптических пинцетах и ловушках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berreman D.W. Variable focus LC lens system. US patent № 4, 190, 330. 1980.
2. Sato S. LC lens-cell with variable focal length // Jpn. J. Appl. Phys. 1979. 18. P. 1679–1684.
3. Kowel S.T., Cleverly D.S. Focusing by electrical modulation of refraction in a LC cell // Proc. of NASA conference “Optical Information Processing for Aerospace Applications”. (Virginia, USA). 1981. P. 329–340.
4. Riza N.A., DeJule M.C. 3-terminal adaptive NLC lens device // Opt. lett. 1994. 19. P. 1013–1015.
5. Chan M.C., Kowel S.T. Imaging performance of the LC adaptive lens with conductive ladder meshing // Appl. Opt. 1997. 36. P. 8958–8969.
6. Nose T., Sato S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field // Liquid Crystals. 1989. V. 5. № 5. P. 1425–1433.
7. Nose T., Sato S. Optical properties of liquid crystal microlens // Reprinted from Inter. Conf. Optoelectr. Science and Engineering. 1990. SPIE. V. 1230. P. 17–20.
8. Williams G., Powell N.J., Purvis A., Clark M.G. Electrically controllable LC Fresnel lens // Proc. SPIE. 1989. 1168. P. 352–359.
9. Fowler C.W., Pateras E.S. LC lens review // Ophthalmic and Physiological Optics. 1990. 10. P. 186–194.
10. Гвоздарев А.Ю., Юдин И.Б., Невская Г.Е., Юдин Б.И. Расчет деформации директора в аксиально-симметричном электрическом поле ЖК микролинзы // Труды 4-й Межд. конф. АПЭП-98. 1998. Т. 6. С. 17–22.
11. Scharf T., Fontannaz J., Bouvier M., Grupp J. An adaptive microlens formed by homeotropic aligned liquid crystal with positive dielectric anisotropy // MCLC. 1999. V. 331. P. 235–243.
12. Ye M., Sato S. Dynamic director's behavior in LC microlens // MCLC. 2000. V. 368. P. 113–120.
13. Yanase S., Ouchi K., Sato S. Molecular orientation analysis of design concept for optical properties of liquid crystal

- microlenses // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001. V. 40. Part 1. № 11. P. 6514–6521.
14. *Honma M., Nose T., Sato S.* Improvement of aberration properties of liquid crystal microlenses using the stacked electrode structure // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001. V. 40. Part 1. № 3A. P. 1322–1327.
 15. *Naumov A.F., Loktev M.J., Guralnik I.R., Vdovin G.V.* Modal liquid crystal adaptive lenses // Preprint № 36. General Phys. Inst. of Russian Academy of Sciences, 1998. 28 p.
 16. *Вдовин Г.В., Гуральник И.Р., Котова С.П., Локтев М.Ю., Наумов А.Ф.* Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. I. Теория // *Квант. электрон.* 1999. Т. 26. № 3. С. 256–260.
 17. *Вдовин Г.В., Гуральник И.Р., Котова С.П., Локтев М.Ю., Наумов А.Ф.* Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. II. Численная оптимизация и эксперимент // *Квант. электрон.* 1999. Т. 26. № 3. С. 261–264.
 18. *Гуральник И.Р., Самаргин С.А.* Электрофизические и оптические свойства жидкокристаллических линз с оптическим управлением // *Квант. электрон.* 2004. Т. 434. С. 673–678.
 19. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Nematic deformation in homeotropically aligned liquid crystal microlens and its optical properties // *MCLC.* 2001. V. 4. P. 364–368.
 20. *Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е.* Оптические характеристики жидкокристаллических микролинз с планарной и гибридной гомеотропной ориентацией нематика // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. № 9. С. 61–65.
 21. *Ye M., Sato S.* Transient properties of a liquid-crystal microlens // *Jpn. Appl. Phys.* 2001. V. 40. Part 1. № 10. P. 6012–6018.
 22. *Nose T., Sato S.* Application of a liquid crystal microlens to an optical fiber switch // *Electronics and Commun. in Japan.* 1992. Part 2. V. 75-C-1. № 3. P. 155–163.
 23. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Optical properties of homogeneously-and hybrid-aligned liquid crystal microlenses // *MCLC.* 1999. V. 329. P. 81–89.
 24. *Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е., Юдин И.Б.* Перестраиваемые жидкокристаллические микролинзы с гомеотропной ориентацией // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. № 9. С. 55–60.
 25. *Морозов А.В.* Исследование электрооптических свойств мультидоменных ЖК структур, полученных с использованием поверхностно-активных веществ. Автореф. канд. диссер. 2005.
 26. *Scharf T., Kipfer P., Bouvier M., Grupp J.* Diffraction Limited Liquid crystal Microlenses with Planar Alignment // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. V. 39. P. 6629–6636.
 27. *Nose T., Masuda S., Sato S.* Optical properties of a hybrid-aligned liquid crystals microlens // *MCLC.* 1991. V. 199. P. 27–39.
 28. *Nevskaya G.E., Gvozdev A.* Analysis of phase retardation profiles in LC-microlenses with different nematic alignment // *Proc. of the 4-th Korea-Russia Int. Symp. on science and technology.* 2000. Part 1. P. 126–130.
 29. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Comparison of electrooptical properties of asymmetrical liquid crystal microlenses // *MCLC.* 2001. V. 4. P. 358–363.
 30. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Optical properties of homeotropical aligned liquid crystal microlens // *MCLC.* 1997. V. 304. P. 423–429.
 31. *Nose T., Masuda S., Sato S.* Optical properties of a hybrid-aligned liquid crystal microlens with a symmetric electrode structure // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1991. V. 30. № 12. P. 2110–2112.
 32. *Masuda S., Ito H., Nose T., Sato S.* Optical properties of a liquid crystal microlens with a deflection function // *Photonics in Switching.* Sendai. 1996. P. 21–25.
 33. *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.
 34. *Masuda S., Fulioka S., Honma M., Sato S.* Dependence of optical properties on device and material parameters in liquid crystal microlenses // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1996. V. 35. P. 4668–4672.
 35. *Masuda S., Honma M., Nose T., Sato S.* Influence of elastic constants on the optical properties of liquid crystal microlenses // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997. V. 36. Part 1. № 5A. P. 2765–2770.
 36. *Sato S., Nose T.* Improvement of optical properties and beam steering function in liquid crystal microlens with an extra controlling electrode by a planar structure // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. V. 39. Part 1. № 11. P. 6383–6387.
 37. *Masuda S., Takahashi S., Nose T., Sato S.* Liquid-crystal microlens with a beam-steering function // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 20. P. 4772–4778.
 38. *Ye M., Honma M., Sato S.* Improvement of decay properties of a liquid crystal microlens with a divided electrode structure // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999. V. 38. Part 2. № 12A. P. 1412–1415.
 39. *Nose T., Yamada J., Sato S.* Molecular orientation effect in LC cell using inhomogeneous electric field with extra controlling electrodes // *MCLC.* 2001. V. 368. P. 231–238.
 40. *Honma M., Nose T., Sato S.* Enhancement of numerical aperture of liquid crystal microlenses using a stacked electrode structure // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. V. 39. Part 1. № 8. P. 4799–4802.
 41. *Ye M., Sato S.* New liquid crystal lens // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4926. P. 75–80.
 42. *Lin Y.-H., Ren H., Fan-Chiang K.-H., Choi W.-K., Gauza S., Zhu X., Wu S.-T.* Tunable-focus cylindrical LC lenses // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. V. 44. № 1a. P. 243–244.
 43. *Ye M., Sato S.* Liquid crystal lens of two liquid crystal layers // *MCLC.* 2004. V. 422. P. 197–207.
 44. *Pisnyak O., Sato S., Lavrentovich O.* Electrically tunable lenses based on dual-frequency NLC // *Appl. Opt.* 2006. V. 4. № 45. P. 4576–4583.

45. *Choi Y., Park J.-H., Kim J.-H., Lee S.-D.* Fabrication of switchable microlens arrays based on a liquid crystal // Lasers and Electro-Optics Society. 2001. LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE. V. 2. P. 618–619.
46. *Naumov A.F., Love G.D., Loktev M.Yu., Vladimirov F.L.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses // Opt. Exp. 1999. V. 4. № 9. P. 344–352.
47. *Loktev M.Yu., Belopukhov V.N., Vladimirov F.L., Vdovin G.V., Love G.D., Naumov A.F.* Wave front control systems based on modal liquid crystal lenses // Rev. of Scientific Instr. 2000. V. 71. № 9. P. 3290–3297.
48. *Guralnik I.R., Samagin S.A.* High-sensitivity optically addressed liquid-crystal lens // Proc. SPIE. 2003. V. 5137. P. 194–200.
49. *Гуральник И.Р., Самагин С.А.* Сферическая жидкокристаллическая линза с оптическим управлением. Теория и эксперимент // Квант. электрон. 2003. Т. 33. С. 430–434.
50. *Naumov A.F., Loktev M.Yu., Guralnik I.R., Vdovin G.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 13. P. 992–994.
51. *Guralnik I.R., Samagin S.* Experimental implementation of the high-sensitivity liquid-crystal lens with optically controlled focal length // Proc. SPIE. 2003. V. 4986. P. 673–680.
52. *Fan Y.-H., Ren H., Wu S.-T.* Electrically controlled lens and prism using nanoscale polymer-dispersed and polymer-networked liquid crystals // Proc. SPIE. 2004. V. 5289. P. 63–73.
53. *Ren H., Wu S.-T.* Tunable electronic lens using a gradient polymer network liquid crystal // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. № 1. P. 22–24.
54. *Fan Y.-H., Ren H., Liang X., Wang H., Wu S.-T.* LC microlens array with switchable positive and negative focal lengths // J. Displ. Techn. 2005. V. 1. P. 151–156.
55. *Ren H., Fan Y.-H., Lin Y.-H., Wu S.-T.* Tunable-focus microlens arrays using nanosize PDLC droplets // Opt. Commun. 2005. V. 247. P. 101–106.
56. *Ren H., Lin Y.-H., Wu S.-T.* Adaptive lenses using liquid crystal concentration redistribution // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. 1911116–1–6.
57. *Brinkley P.F., Kowel S.T.* Liquid crystal adaptive lens: operation and aberration // Proc. SPIE. 1993. V. 1773. P. 449–458.
58. *Stapert H.R., Versteegen E.J.K., del Valle S., van der Zande B.M.I., Lub J., Stallinga S.* Photoreplicated anisotropic liquid crystalline lenses for aberration control and dual layer read out of optical disks // Philips Research Information. 2002. P. 1.
59. *Nose T., Sato S.* Application of LC microlens to an optical fiber switch // Electronics and communications in Japan. 1992. Part 2. V. 75. № 11. P. 1–10.
60. *Smith P.J., Taylor C.M., McCabe E.M., Selviah D.R., Day S.E., Commander L.G.* Switchable fiber coupling using variable-focal-length microlenses // Review of scientific instruments. 2001. V. 72. № 7. P. 3132–3134.
61. *Smith F.J., McCabe E.M., Taylor C.M., Selviah D.R., Day S.E., Commander L.G.* Variable-focus microlenses as a potential technology for endoscopy // Proc. SPIE. 2000. V. 3919. P. 187–192.
62. *Грязнова М.В., Данилов В.В., Кузнецов Ю.А., Рыльков В.В., Шахвердов П.А., Хребтов А.И.* Жидкокристаллические линзы в системе оптического ограничения // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 24–29.
63. *Gryaznova M.V., Danilov V.V., Belyaeva M.A., Shakhverdov P.A., Chistyakova O.V., Khrebtov A.I.* Optical limiters based on LC microlens // Optics and Spectroscopy. 2002. V. 92. № 4. P. 614–618.
64. *Vdovin G., Loktev M., Naumov A.* On the possibility of intraocular adaptive optics // Opt. expr. 2003. V. 11. № 7. P. 810–817.
65. *Vdovin G., Loktev M., Zhang X.* Adaptive Optics for Industry and Medicine // Proc. of the 4th International Workshop Münster, Germany. 2003. Oct. P. 19–24.
66. *Kotova S.P., Kvashnin M.Yu., Rakhmatulin M.A., Zayakin O.A., Guralnik I.R., Klimov N.A., Klark P., Love G.D., Naumov A.F., Saunter C.D., Loktev M.* Modal LC front corrector // Opt. Expr. 2002. V. 10 № 22. P. 1258–1272.
67. *Simonov A.N., Vdovin G., and Loktev M.* Liquid-Crystal intraocular adaptive lens with wireless control // Opt. Expr. 2007. 15. P. 7468–7478.
68. *Naumov A.F., Love G.D.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses // Opt. Expr. 1999. 4. P. 344–352.
69. *Peyghambarian N., Li G., Mathine D., Valley P., Schwiagerling J., Honkanen S., Ayras P., Haddock J.N., Malalahalli G., Kippelen B.* Electro-optic Adaptive Lens as a New Eyewear // Mol. Cryst. and Liq. Cryst. 2007. V. 454. P. 157–166.
70. *Hain M., Glokner R., Bhattacharya S., Dias D., Stankovic S., Tschudi S.* Fast switching LC lenses for dual focus digital versatile disk pickup // Opt. commun. 2001. V. 188. № 5. P. 291–299.
71. *Hands P.J. W., Tatarkova S.A., Kirby A.K., Love G.D.* Modal LC devices in optical tweezing 3D control and oscillating potential wells // Opt. Expr. 2006. V. 14. № 10. P. 4525–4537.