

УДК 532.783 : 535.241.13

И. Р. Гуральник*(Самара)***МОДАЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ
ЛИНЗА С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Предложена и теоретически исследована модификация модальной адаптивной жидкокристаллической линзы, в которой в качестве управляющего электрода используется слой фоточувствительного полупроводника. В результате возникает линза, фокусное расстояние которой зависит от интенсивности падающего излучения. Рассчитаны распределения локального напряжения и фазовой задержки, вносимой линзой в прошедшую световую волну с гауссовым распределением интенсивности, при различных параметрах управляющего напряжения. Обсуждается возможность применения предлагаемого устройства для внутрирезонаторной коррекции тепловой линзы лазеров средней мощности.

В работах [1, 2] был предложен новый метод формирования непрерывного квазипараболического фазового пропускания слоя нематического жидкого кристалла (ЖК) с большой апертурой. Устройство, реализующее этот метод, – модальная жидкокристаллическая линза (МЖКЛ) [3] – отличается от обычного ЖК-модулятора тем, что один из низкоомных контактных слоев заменяется высокоомным слоем, называемым далее управляющим электродом (УЭ), а низкоомные контакты наносятся по периферии УЭ (рис. 1 [4]). Возникающая система с распределенными значениями сопротивления (УЭ) и емкости (слой ЖК) имеет реактивный характер, что позволяет для управления параметрами модулятора, помимо амплитуды напряжения, использовать его частоту. Предлагаемый метод дает возможность получать адаптивные МЖКЛ как сферической, так и цилиндрической конфигурации, поскольку характер пространственной модуляции волнового фронта определяется геометрией электрических контактов. Так, для реализации сферической линзы нужен один кольцевой контакт, а для цилиндрической линзы – два параллельных полосковых контакта. Изготовленные нами МЖКЛ имели переменное фокусное расстояние в диапазоне от 0,5 м до бесконечности [4]. Изменяя величину или частоту приложенного к адаптивной линзе напряжения, можно управлять величиной фокусного расстояния.

В данной работе предложена и теоретически описана модификация МЖКЛ, в которой фокусное расстояние зависит еще и от интенсивности падающего на линзу излучения. Для этого вместо обычного управляющего электрода необходимо использовать полупрозрачный слой фоточувствительного полупроводника, сопротивление которого уменьшается с ростом

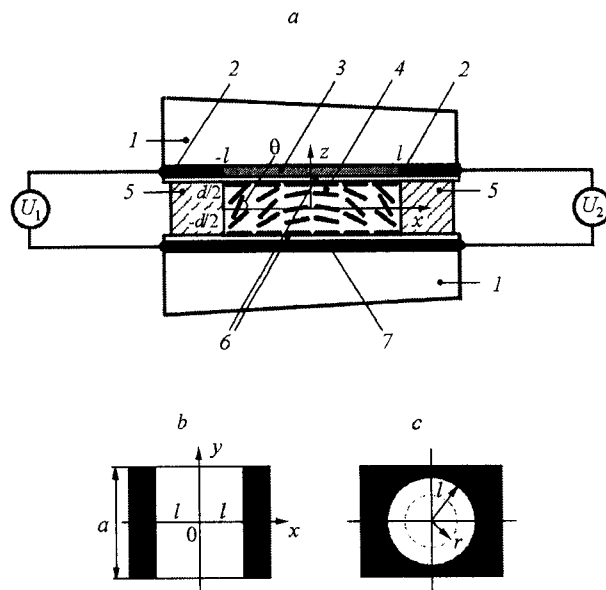


Рис. 1. Схема МЖКЛ (а) и конфигурация контактных электродов для цилиндрической (b) и сферической (c) линз: 1 – стеклянные подложки, 2 – контакты, 3 – управляющий электрод, 4 – ЖК-слой, 5 – прокладки, 6 – ориентирующие покрытия, 7 – общий электрод

освещенности. Как будет показано, при использовании электрооптического S -эффекта в ЖК фокусное расстояние такой оптически управляемой линзы (ОУЛ) увеличивается с ростом интенсивности падающего на апертуру излучения. Рассчитаны формы волнового фронта, обсуждаются возможные применения ОУЛ для внутрирезонаторной коррекции тепловой линзы лазеров средней мощности.

Заметим, что, вводя диэлектрическое зеркало между слоем ЖК и управляющим электродом, можно получить оптически управляемое ЖК-зеркало.

Основные уравнения. Уравнение для распределения локального напряжения $U(x, y)$ по апертуре ОУЛ, которое можно получить аналогично [5], имеет вид:

$$\nabla_s \left(\frac{1}{\rho_s} \nabla_s U \right) = c \frac{\partial U}{\partial t} + gU, \quad (1)$$

где ρ_s – поверхностное сопротивление УЭ; $\nabla_s = \mathbf{n}_x (\partial/\partial x) + \mathbf{n}_y (\partial/\partial y)$ – двумерный градиент в плоскости УЭ; g и c – проводимость и емкость ЖК-слоя на единицу площади соответственно. Для поверхностного сопротивления имеем $\rho_s = (\sigma h)^{-1}$, где σ – удельная проводимость фотопроводника, h – его толщина. В приближении постоянного времени жизни носителей заряда в фотопроводнике его проводимость определяется интенсивностью падающего излучения I [6]:

$$\sigma = \sigma_0 + e\mu\alpha\tau I, \quad (2)$$

где σ_0 – темновая проводимость; μ и τ – подвижность и время жизни носителей заряда соответственно; α – коэффициент поглощения излучения. Квантовый выход фотонов принят равным единице.

В случае однородного освещения величина ρ_s постоянна по апертуре и уравнение (1) принимает вид:

$$\nabla_s^2 U = \rho_s c \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_s g U. \quad (3)$$

Для синусоидального напряжения частоты ω и равномерного распределения интенсивности излучения по апертуре из (3) получаем уравнение для комплексной амплитуды напряжения

$$\nabla^2 U(x, y) = \chi^2 U(x, y) \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\begin{cases} U(r=l) = U_0 & \text{для сферической линзы,} \\ U(x = \pm l) = U_0 & \text{для цилиндрической линзы,} \end{cases} \quad (5)$$

где $2l$ – характерный размер апертуры; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$; U_0 – амплитуда приложенного к контакту напряжения. В уравнении (4) $\chi^2 = \rho_s (g + i\omega c)$ – характерный параметр линзы. Физически он равен отношению комплексного импеданса ЖК-слоя к удельной проводимости УЭ.

Вид решения уравнения (4) зависит от геометрии контактов. В настоящей статье рассматривается важный для практики случай сферической линзы. Цилиндрическая линза может быть рассчитана аналогично.

Расчет распределений напряжения и фазового сдвига. Ограничимся приближением постоянного (не зависящего от напряжения) импеданса ЖК, что существенно упрощает процедуру расчета. Заметим, что при напряжениях значительно выше порогового напряжения для электрооптического S-эффекта приближение постоянного импеданса хорошо соответствует действительности, поскольку вольтовые зависимости емкости и проводимости ЖК-слоя имеют тенденцию к насыщению при напряжениях выше 4–5 В для используемых ЖК (см. рис. 1–3 из [7]).

Расчет проводился для случая освещения ОУЛ пучком света с гауссовым распределением интенсивности по апертуре. Тогда фотопроводимость σ_1 (второе слагаемое в (2)) может быть представлена в виде

$$\sigma_1(r) = \sigma(0) \exp(-r^2/w^{*2}), \quad (6)$$

где w^* – ширина пучка. Подставляя (6) в (1) и полагая $\sigma_1 \gg \sigma_0$ (в данном сообщении не рассматривается влияние темновой проводимости на работу ОУЛ), получим следующее уравнение для радиально-симметричного распределения напряжения при синусоидальном управляющем сигнале:

$$u'' + \left(\frac{1}{x} - \frac{2x}{w^2} \right) u' - i\beta u \exp(x^2/w^2) = 0, \quad (7)$$

где введены безразмерные переменные:

$$x = r/l, \quad w = w^*/l, \quad \beta = \omega c a^2 / h \sigma(0). \quad (8)$$

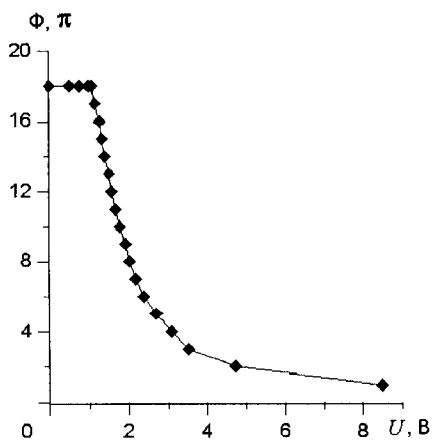


Рис. 2. Вольт-фазная характеристика ЖК

Уравнение (7) вместе с граничными условиями

$$u'(0)=0, \quad u(1)=1 \quad (9)$$

представляет собой краевую задачу на отрезке $[0, 1]$, которая решалась численно методом подбора: необходимо найти такое число A , чтобы уравнение (7) с начальными условиями $u(0) = A$, $u'(0) = 0$ приводило к решению, для которого с заданной точностью $u(1) = 1$.

Затем с помощью полученных распределений напряжения рассчитывались профили фазового сдвига, вносимого ОУЛ в прошедшую волну. При этом использовалась экспериментальная вольт-фазная характеристика (ВФХ) для ЖК, применяемого при изготовлении МЖКЛ [4] (рис. 2). Для удобства проведения расчетов ВФХ аппроксимировалась аналитическим выражением

$$\Delta\Phi(U) \approx \begin{cases} 18, & U < 1 \text{ В}, \\ -10U + 28, & 1 \text{ В} < U < 1,5 \text{ В}, \\ 28,7U^{-1,95}, & U > 1,5 \text{ В}. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь фаза выражена в единицах π .

Результаты расчета напряжения u в безразмерных единицах приведены на рис. 3, а соответствующие распределения фазы – на рис. 4. Кривые распределения напряжения в размерном выражении могут быть получены из рис. 3 умножением на U_0 согласно (8). Профиль напряжения определяется как шириной пучка, так и параметром β , зависящим для данной ОУЛ от частоты управляющего напряжения и интенсивности освещения. Для $w \leq 1$ практически все падение напряжения вдоль апертуры приходится на контактные области. Это объясняется различием освещенности в центре и по краям, в результате чего приконтактные области имеют существенно большее сопротивление.

Как следует из рис. 4, распределения фазы качественно аналогичны тем, что получаются для МЖКЛ [2, 3]. Формой фазового профиля можно управлять путем изменения как амплитуды, так и частоты приложенного напряжения. В дополнение к этому форма фазового профиля ОУЛ зависит от интенсивности освещения и его распределения по апертуре. Указанная особенность распределения напряжения при $w \leq 1$ приводит к тому, что в центре апертуры модуляция фазы практически отсутствует. Вопрос о величине возникающих aberrаций требует отдельного рассмотрения, однако полученные результаты уже позволяют утверждать, что ОУЛ будет лучше фокусировать пучки, гауссова ширина которых сравнима или немного превышает диаметр апертуры.

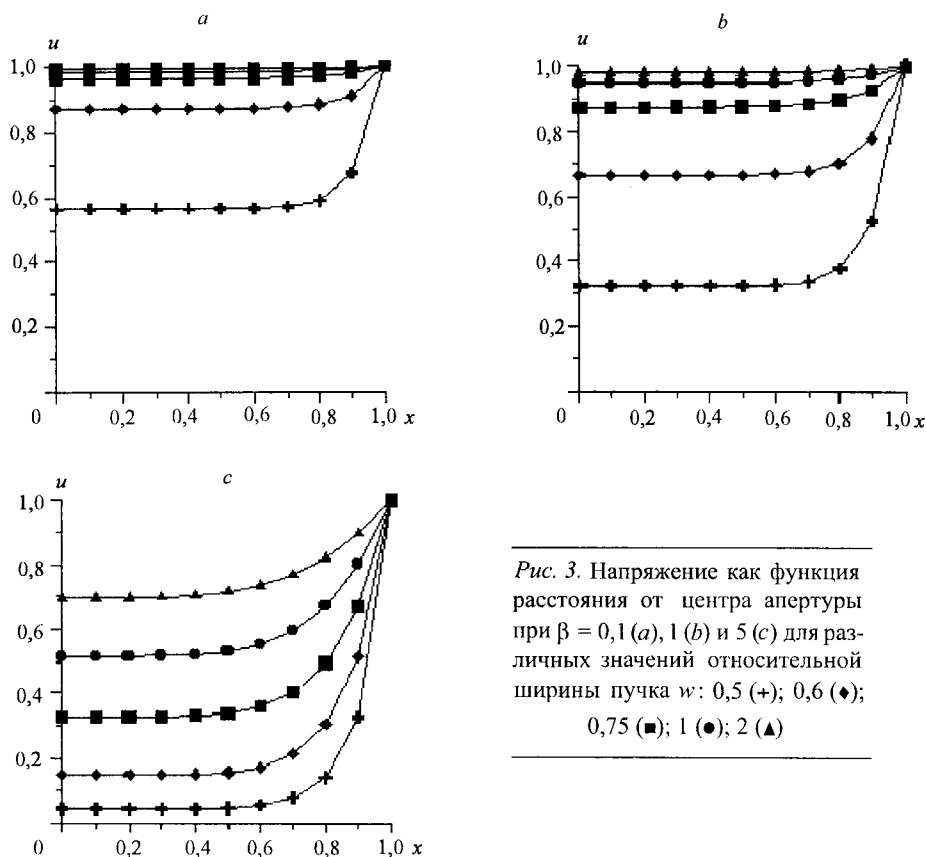


Рис. 3. Напряжение как функция расстояния от центра апертуры при $\beta = 0,1$ (a), 1 (b) и 5 (c) для различных значений относительной ширины пучка w : 0,5 (+); 0,6 (◆); 0,75 (■); 1 (●); 2 (▲)

Параметры фоточувствительного слоя. Приведенные расчеты позволяют указать примерные параметры фотопроводника, пригодного для использования в качестве УЭ.

Эффективное управление волновым фронтом возможно при согласовании сопротивления УЭ с импедансом ЖК-слоя. В отличие от обычных оптически управляемых ЖК-модуляторов, в которых используется так называемая продольная фотопроводимость (заряды перемещаются по направлению распространения света), в предлагаемой ОУЛ перенос заряда происходит вдоль поверхности УЭ (поперечная фотопроводимость). Поскольку в этом случае «длина» сопротивления (h) и его «сечение» (a) взаимозаменяются, для данного материала отношение продольного сопротивления к поперечному по порядку равно $(a/h)^2$ и для $a \sim 1$ см, $h \sim 1$ мкм составляет 10^8 . По этой причине для изготовления ОУЛ не могут быть использованы фоточувствительные слои, применяемые в обычных ЖК-модуляторах.

Оценим удельное сопротивление фотопроводника, при котором ОУЛ могла бы иметь заметную чувствительность. Согласно рис. 3, 4, пространственная модуляция фазы в максимальном диапазоне ее изменения достигается при

$$\beta = \omega c a^2 / h \sigma(0) \sim 1. \quad (11)$$

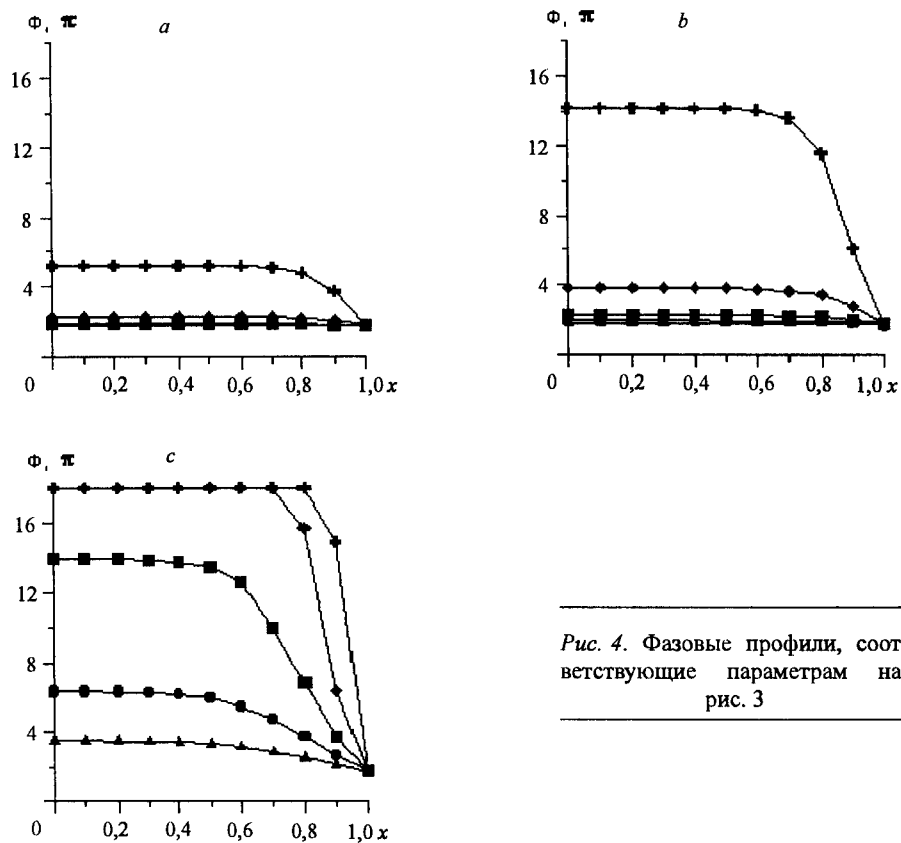


Рис. 4. Фазовые профили, соответствующие параметрам на рис. 3

Для реализации S -эффекта частота ω должна быть достаточно высокой, чтобы «директор» ЖК не успевал следовать за изменением мгновенного значения управляющего напряжения. В нашем случае эта частота составляет сотни герц. Принимая $\omega = 10^3$ Гц, $d = 25$ мкм, $\epsilon = 15$, $a = 5$ мм, $h = 1$ мкм, из (11) получим для нижней границы фотопроводимости $\sigma(0) \sim 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Это значение на несколько порядков выше проводимости как полупроводниковых [8], так и полимерных [9] материалов, применяемых при изготовлении оптически управляемых ЖК-модуляторов.

Полезно также оценить произведение времени жизни основных носителей на их подвижность, которое определяет так называемую дрейфовую длину носителей заряда. Для $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$ и $I = 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует пучку с плотностью потока $31,6 \text{ мВт/см}^2$ при длине волны $\lambda = 0,63$ мкм, из (2) следует $\mu\tau \geq 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1}$. Для такого типичного фотопроводника, как CdS, при $\mu \sim 10^2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ это соответствует вполне реальным временам жизни 10^{-6} с и выше.

В заключение отметим одно из возможных применений предлагаемой ОУЛ. Речь идет о коррекции так называемой тепловой линзы, представляющей собой поперечное неоднородное распределение показателя преломления рабочего тела лазеров, обусловленное неоднородным по сечению нагревом рабочего тела [10]. Тепловая линза может в значительной степени

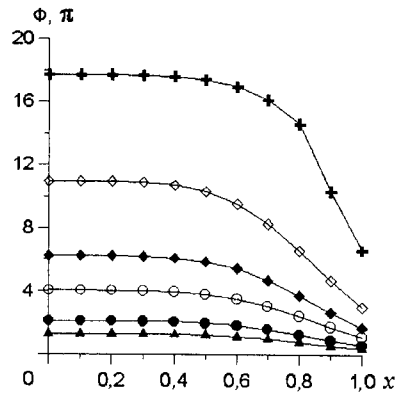


Рис. 5. Фазовые профили для случая $\beta = 5$, $w = 1$ и при различных контактных напряжениях (В): 2 (+); 3 (\diamond); 4 (\blacklozenge); 5 (o); 7 (\bullet); 9 (\blacktriangle)

обуславливать потери энергии в резонаторе и увеличивать угол расходимости выходного излучения.

Рассмотрим кратко принцип внутррезонаторной коррекции дефокусировки, основанный на применении ОУЛ. При уменьшении интенсивности кривизна волнового фронта света, прошедшего через ОУЛ, возрастает, что позволяет реализовать чисто оптическую встроенную отрицательную обратную связь в резонаторе лазера, помещая ОУЛ перед одним из зеркал резонатора. Если в результате действия тепловой линзы расходимость пучка увеличится и часть излучения будет потеряна, то уменьшится интенсивность излучения, попадающего на управляющий электрод ОУЛ. Это вызовет увеличение прогиба волнового фронта, т. е. усилит фокусирующее действие ОУЛ, компенсируя возникшую дефокусировку. Выбором параметров управляющего напряжения можно регулировать диапазон изменения фазовой задержки (рис. 5), вносимой ОУЛ, т. е. глубину обратной связи.

Автор выражает глубокую признательность В. И. Шмальгаузену и А. Ф. Наумову за полезные дискуссии и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамочкин Е. Г., Васильев А. А., Вашурин П. В. и др.** Управляемая жидкокристаллическая линза. М., 1988. (Препр. /ФИАН: 194).
2. **Наумов А. Ф.** Модальные корректоры волнового фронта // Труды ФИАН. 1993. **217**. С. 177.
3. **Naumov A. F., Loktev M. Yu., Guralnik I. R., Vdovin G. V.** Liquid-crystal adaptive lenses with modal control // Opt. Lett. 1998. **23**, N 13. P. 992.
4. **Naumov A. F., Loktev M. Yu., Guralnik I. R., Vdovin G. V.** Liquid crystal wavefront correctors of new type // Proc. SPIE. 1998. **3688**. P. 479.
5. **Naumov A. F., Loktev M. Yu., Guralnik I. R. et al.** Modal liquid-crystal adaptive lenses. М., 1998. (Prepr. /Phys. Institute of RAS: 36).
6. **Рывкин С. М.** Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963.

7. **Guralnik I. R., Naumov A. F., Belopukhov V. N.** Optic and electric characteristics of phase modulators base on nematic liquid-crystal // Proc. SPIE. 1998. **3684**. P. 28.
8. **Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Савин А. И.** Преобразование изображений в структурах полупроводник–диэлектрик. М.: Наука, 1987.
9. **Kamanina N. V., Vasilenko N. A.** Influence of operating conditions and interface properties on dynamic characteristics of liquid-crystal spatial light modulators // Opt. and Quant. Electron. 1997. **29**, N 1. P. 1.
10. **Мак А. А., Сомс Л. Н., Фромзель В. А., Яшин В. Е.** Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990.

*Самарский филиал Физического
института им. П. Н. Лебедева РАН*

*Поступило в редакцию
28 апреля 1999 г.*

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!