

УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ ПРОПУСКАНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

С.П. Котова, М.Ю. Локтев, А.Ф. Наумов ¹,
А.В. Парфенов ², Т.Н. Сапцина ³

Предложен новый способ управления фазовым пропусканием жидкокристаллического пространственного модулятора с реактивными распределенными параметрами, заключающийся в варьировании формы импульса питающего напряжения.

Жидкокристаллические модуляторы, управляющие проходящим через них излучением, обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими электрооптическими элементами. Прежде всего это отсутствие высоких управляющих напряжений. Во-вторых, хорошо освоенная технология изготовления, которая значительно продвинулась с развитием жидкокристаллических дисплеев. И, наконец, низкая стоимость, равная стоимости дисплея в электронных часах (при массовом производстве, конечно). Вот основные причины, по которым в последнее время наметился некоторый подъем в разработке подобных элементов. Для задач технического зрения, согласования волнового фронта полупроводниковых лазеров с внешними элементами представляет интерес создание жидкокристаллической линзы с переменным фокусным расстоянием. Обычный подход к решению этой задачи заключается в использовании модуляторов с индивидуальной адресацией [1, 2, 3]. В работе [4] была предложена более простая конструкция ЖК пространственного модулятора с реактивными распределенными параметрами. Она позволяет реализовать фазовое пропускание, близкое к параболическому, за счет подбора оптических параметров модулятора, а также частоты или фазы управляющего напряжения. В настоящей работе показана принципиальная возможность управления фазовым пропусканием при помощи еще одного фактора - спектрального состава (формы импульса) питающего напряжения.

Конструкция этого модулятора достаточно проста (рис.1а), а принцип работы становится понятным из электрического аналога устройства (рис.1б). Уравнение, описывающее распределение напряжения электрического поля имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RC \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

¹ Котова Светлана Павловна, Локтев Михаил Юрьевич, Наумов Александр Федорович. Самарский филиал Физического института им.П.Н.Лебедева РАН.

² Парфенов Александр Васильевич. Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН.

³ Сапцина Татьяна Николаевна. Самарский филиал Физического института им.П.Н.Лебедева РАН.

где R и C - сопротивление и емкость устройства, отнесенные к единице длины. В первом приближении не будем учитывать зависимость емкости от величины приложенного напряжения. В этом случае уравнение имеет аналитическое решение при граничных условиях $u_1 = u_0 \cos(\omega t)$ при $x = 0$ и $u_2 = u_0 \cos(\omega t + \varphi)$ при $x = l$, где u_0 — амплитуда управляющего напряжения, а ω — его частота; l — расстояние между проводящими электродами. Решение имеет вид

$$u(x, t) = U(x)e^{i\omega t}, \quad U(x) = A_1 e^{-\beta x} + A_2 e^{\beta x}, \quad (2)$$

где A_1 и A_2 - комплексные функции, зависящие от граничных условий, а $\beta = \frac{1}{2}(\sqrt{2RC\omega} + i\sqrt{2RC\omega})$. Величиной, определяющей распределение фазовой задержки светового луча, является модуль комплексной функции $U(x)$.

Решение уравнения зависит как от частоты питающего напряжения, так и от изменения сдвига фаз ϕ электрического напряжения u_1 и u_2 на проводящих контактах. Управление фокусным расстоянием за счет подбора частоты будем называть "частотным", за счет изменения сдвига фаз - "фазовым". Распределения модуля напряжения и фазовой задержки световой волны, полученные при решении уравнения (1), показаны на рисунках 2,а — при "частотном" и 2,б — "фазовом" управлении. Полученные фазовые распределения были найдены при использовании функции отклика ЖК на величину амплитуды управляющего сигнала для слоя толщиной 12μ , $RC = 1 \text{ мс/см}^2$, $f = 5 \text{ кГц}$, $l = 1 \text{ см}$, длины волны $\lambda = 0.633 \mu$. Значения функции отклика были взяты из эксперимента [5] (рис.3). Степень фокусировки оценивается следующими параметрами: F - фокусное расстояние, σ - среднеквадратичное отклонение фазового распределения от идеального параболического, r - радиус Эйри, S - фактор Штреля.

Для получения сферического распределения фазовой задержки нужно изменить форму проводящих контактов на кольцевую. Значение минимального фокусного расстояния F_{min} как для сферической, так и для цилиндрической линзы зависит от разности фазовой задержки в центре линзы $\Delta\Phi_u$ и на краю $\Delta\Phi_k$, а также от размера апертуры (расстояния между электродами):

$$F_{min} = \frac{\pi l^2}{4(\Delta\Phi_u - \Delta\Phi_k)\lambda} \quad (3)$$

Величина фазовой задержки $\Delta\Phi_c - \Delta\Phi_e = 2\pi(n_u - n_k)\frac{d}{\lambda}$ ограничена толщиной жидкого кристалла d и величиной оптической анизотропии. Возможность получения максимального значения фазовой задержки определяется качеством ориентации слоя ЖК. Так, для линзы апертурой 10 мм, толщиной 0.1 мм и оптической анизотропии 0.24 минимальное фокусное расстояние может составить 52 см. Если использовать такой элемент совместно с линзой с фокусным расстоянием 10 см, то точку фокусировки можно смещать в пределах 15 мм. При изменении параметров ω или ϕ фокусное расстояние изменяется от F_{min} до ∞ .

Ясно, что дальнейшее уменьшение F_{min} связано с уменьшением апертуры линзы. Вместе с тем, для линз такой апертуры частотное управление (изменение частоты питающего напряжения) становится неэффективным, поскольку уменьшаются реактивные параметры устройства, а смещение в область более высоких частот приводит к шунтированию напряжения на ЖК линзе. На рис.4 показаны распределения модуля приложенного напряжения при частотном (а) и фазовом (б) управлении для линзы с апертурой 1 мм. Повышение частоты вдвое (до 10 кГц) или увеличение вдвое параметра RC (до 2 мс/см^2) приводит к большему диапазону изменения напряжения (рис. 4,а, кривая б). Здесь оба случая имеют одинаковое распределение

$U(x)$. "Фазовое" управление (рис. 4,б) для линз с малой апертурой более эффективно, поскольку позволяет реализовать больший диапазон изменения напряжения и, соответственно, больший диапазон управления фокусным расстоянием. Отметим, что удвоение частоты или реактивного параметра RC на распределение $U(x)$ в этом случае практически не влияет. При увеличении апертуры изменение этих величин влияет на $U(x)$ сильнее. Так, на рис. 2,б распределение $U(x)$ имеет некоторый прогиб в отличие от распределения на рис. 4,б.

Выбирая соответствующим образом электрические и оптические характеристики линзы: величину реактивных параметров RC , нелинейность в области рабочих напряжений $\Delta\Phi = \Delta\Phi(u)$, частоту ω , можно получить распределение фазового пропускания, близкое к фазовому пропусканию идеальных линз — параболическому. Но этот путь достаточно сложен, так как требует точной подгонки параметров на разных этапах изготовления оптического элемента: синтеза жидкого кристалла, нанесение высокоомных прозрачных проводящих покрытий и собственно сборки ЖК-элемента. Это, в свою очередь, требует дополнительных затрат времени и материалов. В данной работе предлагается еще один, более простой, способ управления фазовым пропусканием модулятора — это использование электрических сигналов сложной формы. Идея состоит в том, что каждая гармоническая составляющая электрического сигнала дает свой "вклад" в изменение распределения фазовой задержки $\Delta\Phi(x)$. Поясним на примере. Пусть для управления цилиндрической ЖК линзой используется двуполярный управляющий сигнал прямоугольной формы — меандр (рис.5). Зависимости изменения модуля гармонических составляющих этого сигнала для частот ω , 2ω , 3ω от величины обратной скважности импульсов $\frac{1}{q}$ показаны на рис.6а римскими цифрами I, II, III соответственно. Возьмем два произвольных значения скважности, например, $\frac{1}{q} = 0.2$ (а) и $\frac{1}{q} = 0.5$ (б). Соответствующие распределения модулей напряжения для каждой из трех гармоник в линзе показаны на рис.6б, в. На рис.6г показаны суммарные распределения действующего значения напряжения на слой ЖК в линзе для случая а и б. Из рисунка видно, что изменение скважности приводит к изменению формы распределения напряжения.

На рис.7 показано распределение напряжения и фазовой задержки при питании линзы двуполярным меандром частоты 5 кГц. При этом в расчетах учитывались первые 10 гармонических составляющих сигнала. На рис.8 — то же, но для пилообразного напряжения.

Распределение фазового пропускания линзы в значительной степени определяется нелинейностью электрооптического отклика слоя ЖК. Для используемой в данной работе функции отклика (рис.3) при гармонических управляющих сигналах одной частоты получить фазовое пропускание, близкое к параболическому, удастся лишь для больших фокусных расстояний (до 20 м при $l=1$ см). С увеличением фазового пропускания отклонение от параболического профиля увеличивается, и картина в плоскости фокусировки значительно отличается от идеальной (рис. 9,б).

Подбирая для данной функции электрооптического отклика форму импульсов питающего напряжения из условия минимума среднеквадратичного отклонения фазового пропускания ЖК - модулятора от параболической функции, можно получить почти идеальную линзу с большой оптической силой. На рис.10 приведены формы управляющего сигнала, включающего в себя 10 оптимальным образом подобранных гармоник и распределение напряжения и фазового пропускания для этого случая. Распределение интенсивности в плоскости фокусировки представлено на рис. 9,в. Видно, что оно близко к идеальному. Данный пример подтверждает возможность улучшения характеристики ЖК-линзы за счет подбора формы импульсов управля-

ющего напряжения.

В целом, задача поиска оптимальной формы импульсов управляющего напряжения для реализации желаемого профиля фазового пропускания является достаточно сложной и требует дальнейшего исследования. Решение ее позволит создать новый класс конструктивно простых электрооптических приборов для формирования сложных световых полей.

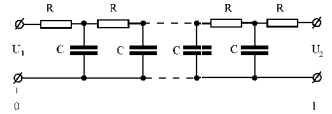
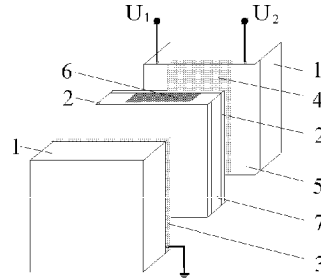
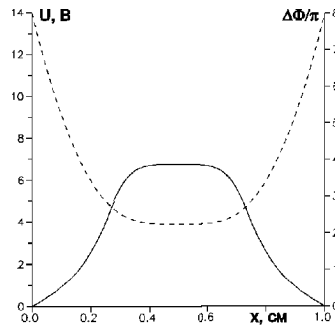


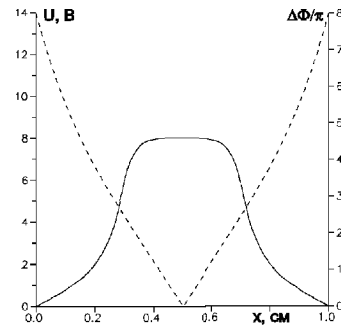
Рис. 1 а. Устройство адаптивной цилиндрической линзы:

Рис. 1 б. Эквивалентная электрическая схема

- 1 - стеклянные подложки; 2 - ориентирующие покрытия;
 3 - прозрачный низкоомный электрод; 4 - прозрачный высокоомный электрод;
 5 - эквидистантные проводящие контакты;
 6 - планарно ориентированный нематический слой жидкого кристалла;
 7 - ограничители; u_1 и u_2 - управляющее напряжение.



а



б

Рис.2. Распределение фазового пропускания (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) в ЖК линзе:

а при "частотном управлении": $\phi = 0$,

а - $f=5$ кГц, $F = 5.852$ м, $\sigma = 1.031\pi$, $r = 0.37$ мм, $S = 35.8\%$;

б - $f=9.97$ кГц, $F = 4.95$ м, $\sigma = 1.004\pi$, $r = 0.31$ мм, $S = 6.47\%$:

б при "фазовом" управлении $\phi = \pi$, $f=5$ кГц, $F = 4.938$ м, $\sigma = 1.781\pi$, $r = 0.31$ мм, $S = 15.6\%$

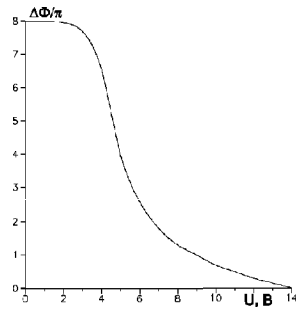


Рис.3

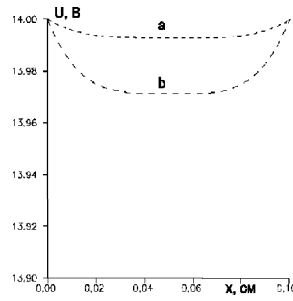


Рис.4,а)

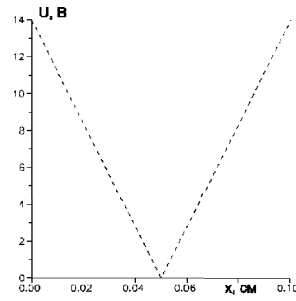


Рис.4,б)

Рис.3 Зависимость электрооптического отклика ЖК от величины действующего напряжения

Рис.4 Распределение напряжения в микролинзе ($l = 1\text{ мм}$): а - при "частотном" управлении кривая а - $f = 5\text{ кГц}$, $RC = 1\text{ мс/м}^2$; кривая б - $f = 10\text{ кГц}$ и $RC = 1\text{ мс/м}^2$, (совпадает с кривой для $f = 5\text{ кГц}$ и $RC = 2\text{ мс/м}^2$); б - при "фазовом" управлении" (все параметры из 4,а приводят к совпадающим кривым)

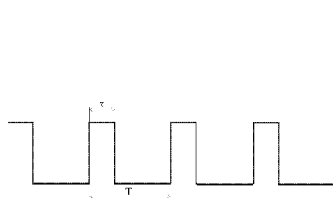


Рис.5

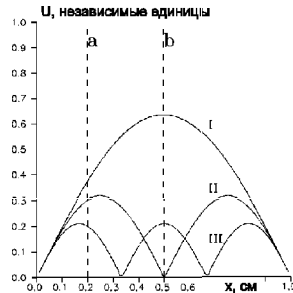


Рис.6,а)

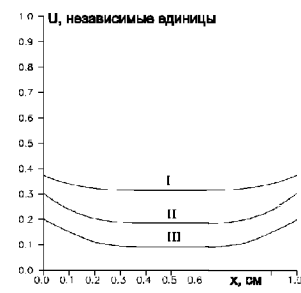


Рис.6,б)

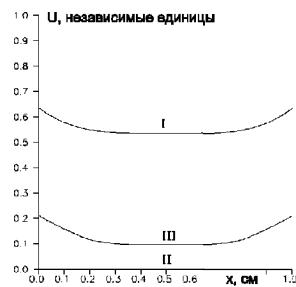


Рис.6,в)



Рис.6,г)

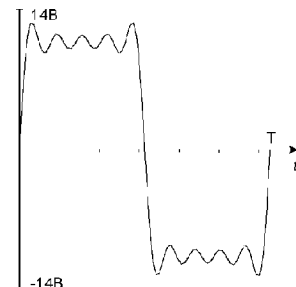


Рис.7,а)

Рис.5 Вид управляющего напряжения: $q = \frac{T}{\tau}$ - скважность.

Рис. 6: а - амплитуда гармонических составляющих сигнала как функция обратной скважности $1/q$ (кривая I - первая гармоника; кривая II - вторая гармоника; кривая III - третья гармоника); б - распределение гармонических составляющих напряжения питания для $1/q = 0.2$; в - распределение гармонических составляющих напряжения питания для $1/q = 0.5$; г - распределение действующего напряжения в цилиндрической ЖК-линзе (кривая а - $1/q = 0.2$; кривая б - $1/q = 0.5$)

Рис.7,а Форма импульса питающего напряжения

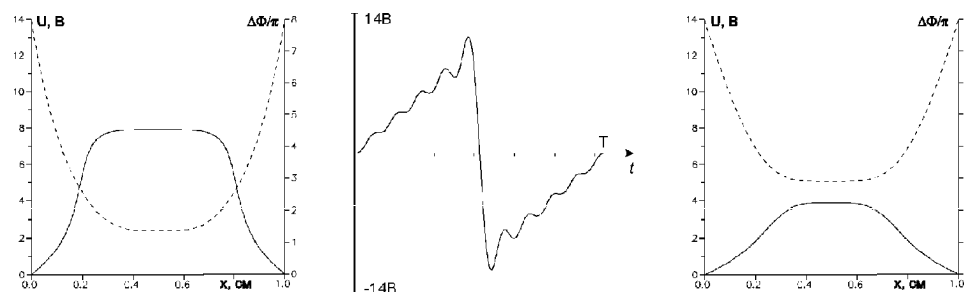


Рис.7,б)

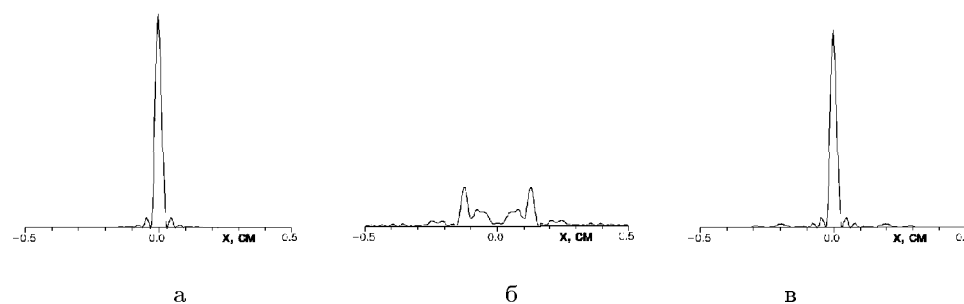
Рис.8,а)

Рис.8,б)

Рис.7,б Распределение фазового пропускания (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) в ЖК линзе: $F = 5.00\text{ м}$, $\sigma = 0.894\pi$, $r = 0.32\text{ мм}$, $S = 11.8\%$.

Рис.8,а Форма импульса питающего напряжения

Рис.8,б Распределение фазового пропускания (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) в ЖК линзе: $F = 104.7\text{ м}$, $\sigma = 0.137\pi$, $r = 6.6\text{ мм}$, $S = 84.7\%$



а

б

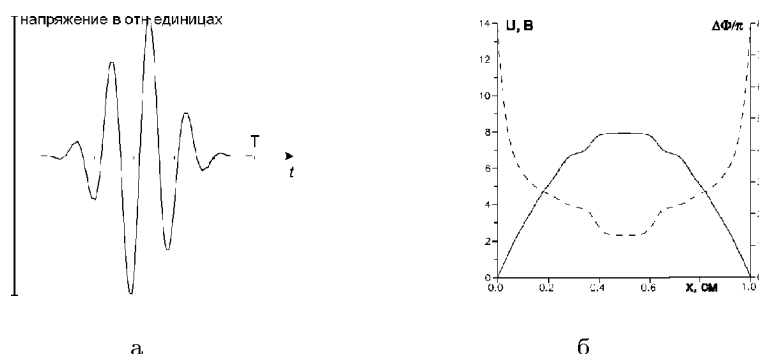
в

Рис.9 Распределение интенсивности в плоскости фокусировки для ЖК-модулятора с расстоянием между проводящими контактами 1 см для:

а - идеальной линзы ($\Delta\Phi_{max} = 4.5\pi$). $F = 4.95\text{ м}$, $\sigma = 0.00\pi$, $r = 0.31\text{ мм}$, $S = 100.0\%$;

б - при управлении гармоническим сигналом частотой 9.97 кГц ($\Delta\Phi_{max} = 4.5\pi$). $F = 4.95\text{ м}$, $\sigma = 1.004\pi$, $r = 0.31\text{ мм}$, $S = 6.47\%$;

в - при управлении сигналом, представленным на рис.10а ($\Delta\Phi_{max} = 4.5\pi$). $F = 4.95\text{ м}$, $\sigma = 0.089\pi$, $r = 0.31\text{ мм}$, $S = 83.8\%$



а

б

Рис.10: а - форма импульса питающего напряжения; б - Распределение фазового пропускания (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) в ЖК линзе.

Литература

- [1] N.A. Riza, M.C. DeJule. Optics Letters, 1994, V. 19, N 14. P. 1013-1015.
- [2] Y. Takaki, K. Ishida, Y. Kume, H. Ohzu. Appl. Opt. 1996. V. 35. N 17. P. 3134-3140.
- [3] Y. Takaki, H. Ohzu. Optic. Commun. 1996. V.126, P. 123-134.
- [4] А.Ф. Наумов. Труды ФИАН. 1993. Т. 217 С. 177-182.
- [5] Л.И. Жмурова, В.А. Игнатов, В.С. Коряковцев, А.Ф. Наумов. Практический метод измерения электрооптического отклика нематических жидких кристаллов с исходной планарной ориентацией // Деп. рукопись. 1988. ВИНТИ. N 4857-B88. С. 12.

LIQUID CRYSTAL LENS FOR WAVE FRONT CONTROL

S.P. Kotova, M.Ju. Loktev, A.F. Naumov ⁴, A.V. Parfenov⁵, T.N. Saptsyna ⁶.

The new way of phase transmittance control of liquid crystal modulator with distributed reactive parameters is proposed. This way consist of pulse form variation of supplying voltage.

⁴Kotova Svetlana Pavlovna, Loktev Michail Jurjevich, Naumov Alexandr Fedorovich. Lebedev Physical Institute, Samara Branch

⁵Parfenov Alexandr Vasiljevich. Lebedev Physical Institute

⁶Saptsyna Tatjana Nikolajevna. Lebedev Physical Institute, Samara Branch