

УДК 532.738

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ-УПРАВЛЯЕМЫХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИНОК

В.К. АБРАМЯН¹, Н.Г. АКОПЯН¹, В.М. АРУТЮНЯН¹,
В.Г. БАБАДЖАНИЯН², А.Л. МАРГАРЯН¹, Д.Л. ОГАНЕСЯН¹,
А.Т. ПОГОСЯН¹, Д.К. ПОХСРАРЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 25 сентября 2008 г.)

Приведены результаты исследований основных характеристик электрически-управляемых фазовых пластинок, изготовленных на основе планарно- и твист-ориентированных нематических жидких кристаллов (ЖК) – времени переключения и калибровочной кривой контролируемого фазового набег. Проведены компьютерное моделирование и численные расчеты процессов переориентации директора ЖК во внешнем электрическом поле. На базе программного обеспечения LabView создана специальная программа для компьютерного управления формой, частотой и амплитудой внешних напряжений, подаваемых на ЖК ячейки. Проведен эксперимент по реализации заданной фазовой задержки оптического пучка с использованием данной программы. Результаты расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными.

1. Введение

В настоящее время в приложениях по модуляции интенсивности света особое место нашли ЖК фазовые пластинки, благодаря простоте управления и достаточно высокому контрасту [1–5]. Основными преимуществами устройств на основе ЖК по сравнению с микро-электромеханическими системами, являются низкий уровень электропотребления, простота и надежность управления, отсутствие движущихся частей и деталей, низкая себестоимость [6,7].

В настоящей работе на основе численного моделирования процессов переориентации директора нематического жидкого кристалла (НЖК) во внешнем электрическом поле получены расчетные зависимости времени включения НЖК, интенсивности света, прошедшего через систему анализатор – НЖК – поляризатор, и наведенной фазовой задержки от величины приложенного напряжения. Приведены экспериментальные результаты исследований характеристик электрически-управляемых фазовых пластинок, реализованных на основе НЖК ячеек с планарной и твист-структурами. Описаны техника изготовления ячеек, экспериментальная установка и методика проведения измерений.

2. Моделирование процесса переориентации директора нематического жидкого кристалла во внешнем электрическом поле

Рассмотрим динамику переориентации директора НЖК во внешнем электрическом поле при следующих упрощающих предположениях: исходная ориентация – планарная вдоль оси x , электрическое поле приложено перпендикулярно директору вдоль оси z , имеется жесткая связь молекул с поверхностями ячейки; отсутствуют потоки жидкости, переориентирующие директор; пренебрегается электропроводностью ЖК; анизотропия диэлектрической проницаемости принимается малой по сравнению со средней диэлектрической постоянной (т.е. поле в образце считается однородным). Как известно, при данных упрощениях динамика угла наклона директора θ относительно оси z описывается уравнением Эриксона–Лесли и имеет следующий вид [8–10]:

$$(K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (1)$$

где K_{11} , K_{22} и K_{33} – упругие коэффициенты деформаций поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба, соответственно, θ – угол наклона директора ЖК относительно оси z , $\Delta \epsilon$ и γ – анизотропия диэлектрической проницаемости и коэффициент вязкости, $\epsilon_0 \Delta \epsilon E^2$ – плотность энергии электрического поля, E – амплитуда электрического поля. В общем случае решить уравнение (1) можно лишь численно. В приближении малых углов наклона директора ($\sin \theta \approx 0$) и одноконстантной модели ($K_{11} = K_{22} = K_{33} = K$) для полей, не сильно превышающих пороговые, время включения эффекта Фредерикса описывается выражением

$$\tau_1(E) = \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K (E^2/E_c^2 - 1)}, \quad (2)$$

где $E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{4\pi K}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}}$ – пороговое значение статического электрического поля, вы-

ше которого возникает ориентационная деформация, d – толщина ЖК ячейки. При выключении поля, из условия баланса между упругим и вязким моментами, для времени релаксации директора получается следующее выражение:

$$\tau_2(E) = \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K}. \quad (3)$$

Для получения времени включения при произвольных значениях угла наклона θ проведено численное интегрирование уравнения (1) методом конечных разностей с учетом граничных условий. В расчетах использовались параметры для ячейки толщиной 7 мкм с НЖК типа 5СВ ($K = 10$ пН, $\epsilon_e = 20$, $\epsilon_o = 6,7$, $\gamma = 9 \times 10^{-3}$ кг/м·с). Расчетное значение времени релаксации при выключении поля для указанных значений параметров оказалось равным 4.5 мс. Зависимость

расчетного времени включения НЖК ячейки от амплитуды приложенного поля показана на рис.1. Видно, что при увеличении амплитуды напряжения от 15 В до 60 В время включения ЖК уменьшается почти на порядок (от 2.75 мс до 0.24 мс).

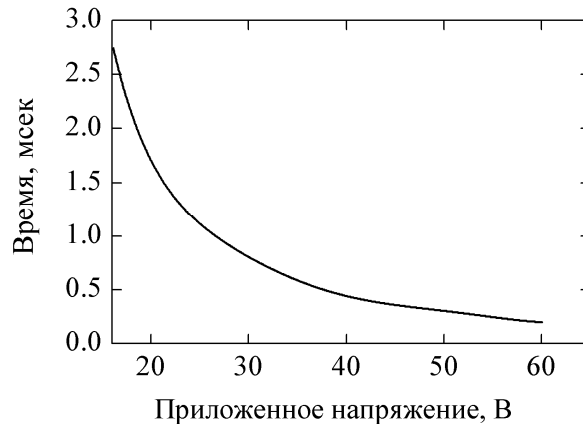


Рис.1. Рассчитанная зависимость времени включения оптического отклика ЖК от амплитуды приложенного напряжения.

3. Электрически-управляемые фазовые пластины

При нормальном падении линейно-поляризованного светового пучка на планарно-ориентированную НЖК ячейку с ориентацией директора l под углом α к плоскости поляризации пучка (рис.2) в анизотропной (одноосной) ЖК среде возникают две ортогонально-поляризованные волны с разными фазовыми скоростями. Набег фаз между этими волнами при прохождении через слой ЖК толщиной d определяется выражением

$$\Delta\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} d |n_e - n_o|, \quad (4)$$

где λ_0 – длина волны проходящего света в вакууме, n_o и n_e – показатели преломления ЖК для обыкновенной и необыкновенной волн. В общем случае интенсивность света I , прошедшего через систему поляризатор – ЖК ячейка – анализатор с углом β между осями поляризатора и анализатора, определяется следующим выражением [11]:

$$I = I_0 \left[\cos^2(\beta) - \sin(2(\alpha - \beta)) \sin^2\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right], \quad (5)$$

где I_0 – интенсивность пучка на входе в систему. Если поляризаторы скрещены ($\beta = 90^\circ$) и директор планарной ячейки ориентирован под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси поляризатора, то выражение упрощается и принимает вид

$$I = I_0 \sin^2(\Delta\Gamma/2). \quad (6)$$

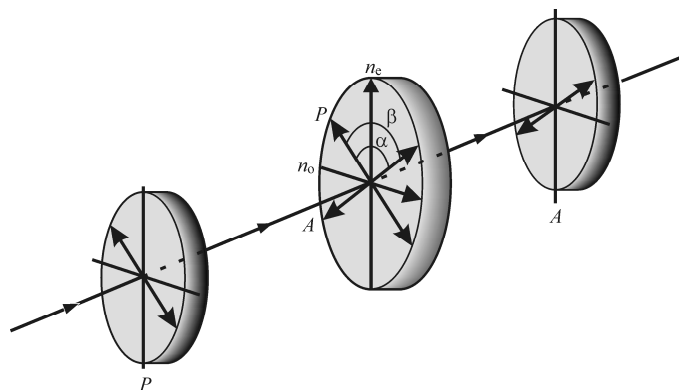


Рис.2. Схема распределения световых волн в исследуемой ячейке.

Регистрируя отношение I/I_0 с помощью приведенной формулы можно рассчитать соответствующие набег фаз:

$$\Delta\Gamma = \pm 2 \arcsin \sqrt{I/I_0}. \quad (7)$$

Отметим, что с целью обеспечения непрерывности восстанавливаемой фазы при каждом фазовом набеге, превышающем величину 2π , используется алгоритм сшивания фазы.

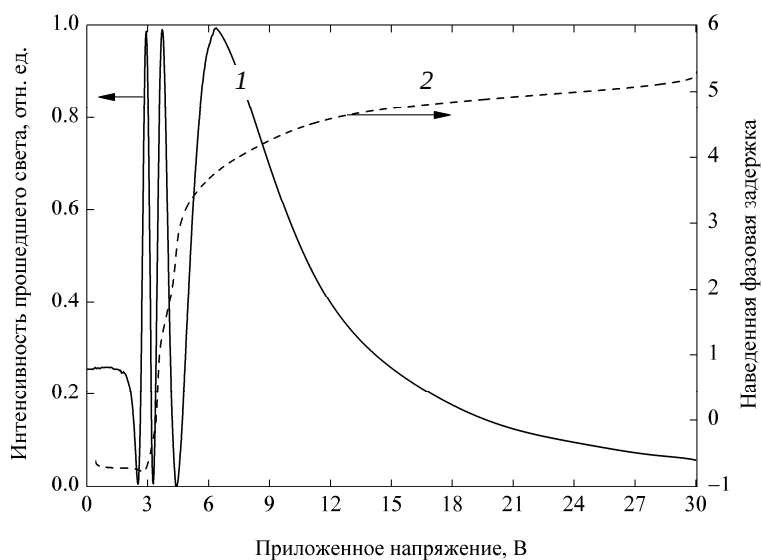


Рис.3. Рассчитанные зависимости интенсивности прошедшего света при $\alpha = 45^\circ$ и наведенной фазовой задержки от приложенного напряжения.

На рис.3 показаны зависимости интенсивности прошедшего света при $\alpha = 45^\circ$ (кривая 1) и наведенной фазовой задержки (кривая 2) от приложенного напряжения, полученные в результате численного интегрирования уравнения (1) с последующим использованием выражений (6) и (7). Из анализа представленных

зависимостей можно заключить, что для обеспечения фазового набег α необходимо переключить амплитуду управляющего напряжения с 7 В на 30 В и больше. В расчетах шаг изменения напряжения принимался равным 10 мВ.

4. Экспериментальная установка и методика измерений

Для проведения исследований были изготовлены ячейки планарной и твист-ориентаций толщиной 7 мкм, заполненные жидкими кристаллами марок E48 и 5CB (Merck, Германия). В качестве подложек использовались стеклянные пластинки толщиной 1 мм, покрытые прозрачным проводящим слоем оксида олова и индия (ITO) толщиной 20 нм. Ориентирование молекул ЖК на подложках производилось затиркой ориентирующего покрытия (пленка поливинилового спирта). Измерения проводились на экспериментальной установке, оптическая схема которой приведена на рис.4. Излучение непрерывного гелий-неонового лазера (1) на длине волны 633 нм через поляризатор (2) направляется на исследуемую ячейку (3) с ориентацией директора под углом 45° относительно плоскости поляризации входного поляризатора. В качестве анализатора служила призма Глана (4), установленная таким образом, чтобы поляризация проходящего через нее света была бы скрещенной относительно поляризатора (2), а поляризация отклоненного под прямым углом света – параллельной.

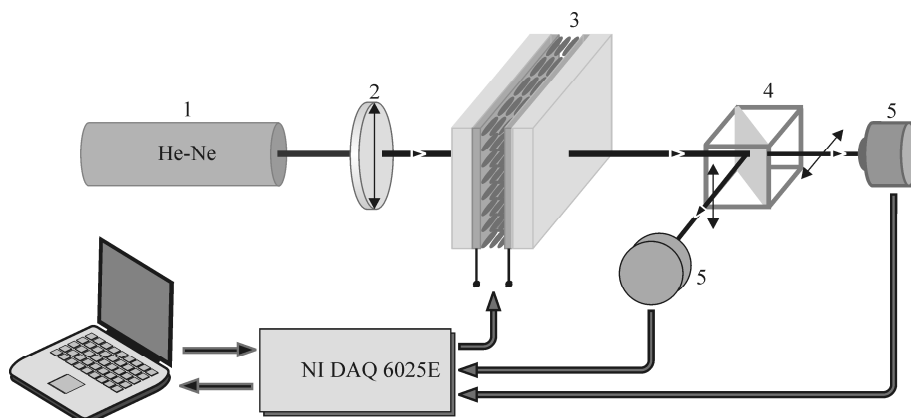


Рис.4. Схема экспериментальной установки.

Представленная схема позволяет проводить измерения интенсивностей прошедших через ячейку световых лучей ортогональных поляризаций. Регистрация световых пучков осуществлялась фотоприемниками (5), подключенными либо к цифровому осциллографу Tektronix TDS-3032, либо к компьютеру через плату для сбора данных NI DAQ 6025E.

Параметры внешнего напряжения, прикладываемого к ЖК ячейке, управлялись с помощью АЦП и разработанной нами специальной программы на базе программного обеспечения LabView. Программа позволяет задавать форму

импульсов напряжения, изменять по заданному закону их амплитуду в интервале ± 10 В с шагом 10 мВ, частоту следования в диапазоне 10 – 2000 Гц с шагом 1 Гц и скважность в диапазоне 0.1 – 0.9.

Формируемые импульсы напряжения после усиления подавались на исследуемые ЖК ячейки. Для каждой конкретной ячейки скорость изменения амплитуды управляющего напряжения выбиралась такой, чтобы ячейка успевала бы достичь стационарного состояния. Амплитуда импульсов напряжения увеличивалась до тех пор, пока не достигался минимально возможный для данной ячейки фазовый набег. Затем программно организовывался обратный процесс – уменьшение амплитуды управляющего напряжения с теми же параметрами импульсов до полного обнуления напряжения на ячейке и восстановления исходного (максимального) фазового набег. При измерениях использовалась техника, основанная на “переходном нематическом эффекте” [12], заключающаяся в приложении к ячейке опорного начального переменного напряжения с последующим переключением до требуемой величины. Такая техника позволяет существенно уменьшать времена переключения ЖК ячейки.

При применении электрически управляемых ЖК фазовых пластин в разных приложениях необходимо иметь калибровочную кривую зависимости фазового набег от внешнего напряжения. Наиболее удобным для построения калибровочной кривой является методика, основанная на регистрации зависимости интенсивности света, проходящего через систему скрещенных поляризаторов с ЖК ячейкой между ними, от величины внешнего управляющего напряжения.

Определим условия получения необходимого фазового набег с одновременным обеспечением максимального быстродействия. Рассмотрим экспериментально полученные зависимости интенсивности прошедшего света от времени и от управляющего напряжения для планарной и твист-ячеек. Экспериментальная зависимость пропускания планарно-ориентированной ЖК ячейки от амплитуды внешних прямоугольных импульсов напряжения, формируемых программно со скоростью изменения амплитуды 30 мВ/с, приведена на рис.5 (кривая 1). Видно, что для обеспечения фазового набег, равного π , необходимо переключить амплитуду управляющего напряжения с 5.8 В на 60 В. Аналогичного изменения набег фаз можно достичь для той же ячейки и при меньших значениях управляющего напряжения (например, при переключении с 4.5 В на 5.8 В). Однако скорость оптического переключения будет выше при больших значениях амплитуды напряжения, так как время переориентации НЖК обратно пропорционально амплитуде напряжения (см. формулу (2)). На основе полученной зависимости с использованием алгоритма сшивания фазы построена калибровочная кривая (рис.5, кривая 2), которая полностью описывает возможные режимы работы данной ячейки в качестве электрически-управляемой фазовой пластины. На рис.6а показана зависимость интенсивности прошедшего света в случае, когда амплитуда напряжения переключается от 60 В до 6 В (время включения 5 мс), а на рис.6б – такая же

зависимость при переключении амплитуды напряжения от 6 В до 60 В (время выключения 0.325 мс).

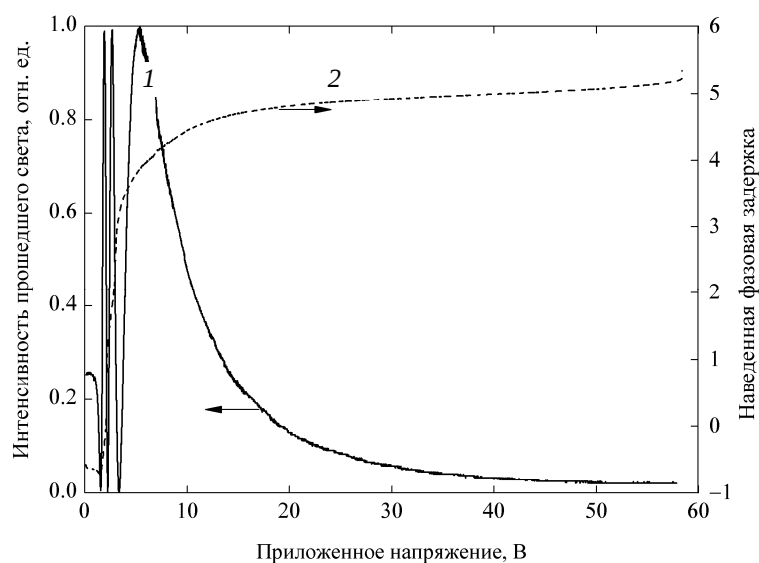


Рис.5. Зависимости интенсивности прошедшего света при $\alpha = 45^\circ$ и наведенной фазовой задержки от приложенного напряжения, полученные экспериментально.

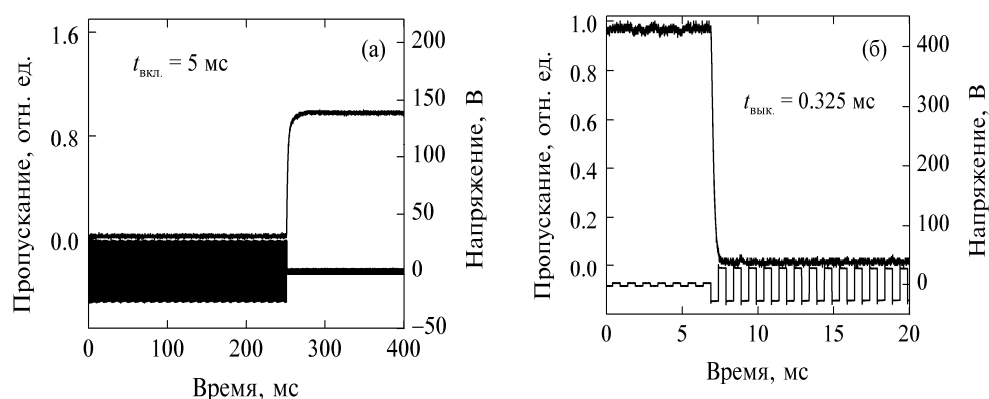


Рис.6. Времена переключения планарно-ориентированной ЖК ячейки.

Рассмотрим аналогичные характеристики для ячейки с твист-ориентацией. На рис.7 приведены наводимые внешним переменным полем фазовые задержки, а в табл.1 – соответствующие изменения поляризации пучка света на выходе ЖК ячейки, помещенной между скрещенными поляризаторами.

Ориентация плоскости поляризации падающего пучка параллельна направлению быстрой оси ячейки на ее входной поверхности. Видно, что изменением амплитуды внешнего поля в диапазоне 0–8 В на выходе ячейки можно получать различные поляризации пучка – от линейной до циркулярной. Времена

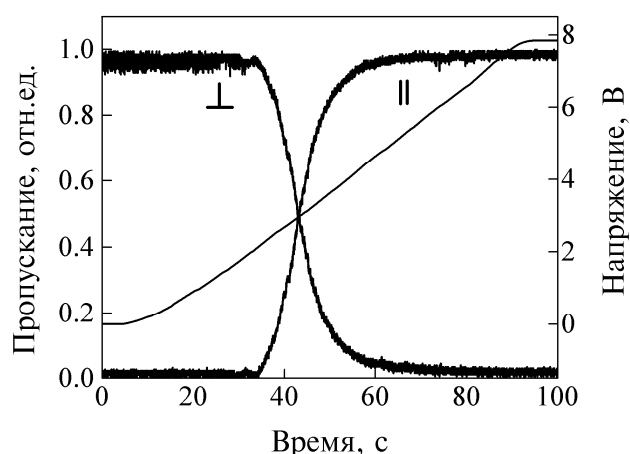


Рис.7. Наведенные внешним переменным полем фазовые задержки для твист-ориентированной ЖК ячейки.

Табл.1.

Напряжение, В	Фазовая задержка	Поляризация на выходе
$V \sim 2.5$	$\Delta\Gamma = \lambda/2$	$\updownarrow$
$2.5 < V < 3.5$	$\lambda/4 < \Delta\Gamma < \lambda/2$	$\circlearrowleft$
$V \sim 3.5$	$\Delta\Gamma = \lambda/4$	$\circlearrowright$
$3.5 < V < 5.8$	$0 < \Delta\Gamma < \lambda/4$	$\circlearrowright$
$V > 6$	$\Delta\Gamma = 0$	$\longleftrightarrow$

переключения исследуемой ячейки при работе в качестве оптического клапана составили: время включения – 38.4 мс, время выключения – 360 мс. Отметим, что измеренные времена переключения в случае твист-ориентированной ячейки почти на два порядка больше, чем для планарной ячейки. По-видимому, это связано с тем, что упругий коэффициент K_{22} для ЖК обычно по величине меньше двух других коэффициентов Лесли (K_{11} и K_{33}).

5. Заключение

Приведены расчетные и экспериментальные зависимости времен переключения НЖК, интенсивности прошедшего света и наведенной фазовой задержки от амплитуды управляющего напряжения. Сравнение этих результатов выявило довольно хорошее соответствие примененных теоретических моделей с реальными устройствами. Отметим, что описанная в работе методика получения калибровочных кривых может быть использована не только при реализации электрически-управляемых фазовых пластин, но и для переменных аттенуаторов света на основе ЖК ячеек, широко используемых в различных приложениях [12,13].

ЛИТЕРАТУРА

1. **S.T.Wu, D.K.Yang.** Reflective Liquid Crystal Displays. New York, Wiley, 2001.
2. **Ю.Д.Думаревский, Н.Ф.Ковтонюк, А.И.Савин.** Преобразование изображений в структурах полупроводник–диэлектрик. М., Наука, 1987.
3. **H.Ren, Y.H.Lin, Y.H.Fan, S.T.Wu.** Appl. Phys. Lett., **86**, 141110 (2005).
4. **D.P.Resler, D.S.Hobbs, et al.** Opt. Lett., **21**, 689 (1996).
5. **Y.-H.Fan, H.Ren, X.Liang, et al.** IEEE/OSA J. of Display Techn., **1**, 151 (2005).
6. **T.-R.Hsu.** MEMS and microsystems: Design and manufacture. Boston, 2001.
7. **C.Khoo, S.-T.Wu.** Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals. Singapore, 1993.
8. **Л.М.Блинов.** Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., Наука, 1978.
9. **П. де Жен.** Физика жидких кристаллов. М., Мир, 1977.
10. **М.Борн, Э.Вольф.** Основы оптики. М., Наука, 1973.
11. **S.T.Wu, C.S.Wu.** J. Appl. Phys., **65**, 527 (1989).
12. **Y.Wu, X.Liang, Y.Lu, F.Du, Y.Lin, S.Wu.** Appl. Optics, **44**, 4394 (2005).
13. **Y.Lu, F.Du, Y.Lin, S.Wu.** Optics Express, **12**, 1221 (2004).

ՀԱՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆՈՐԵՆ ՂԵԿԱՎԱՐՎՈՂ ՓՈԻԼԱՅԻՆ ԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Վ.Կ. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ն.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Վ.Մ. ԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ,
Կ.Գ. ԲԱԲԱՋՅԱՆ, Հ.Լ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Դ.Լ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ,
Ա.Տ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Դ.Կ. ՓՈԽՏՐԱՐՅԱՆ

Բերված են պլանար և թվիստ կողմնորոշումներով նեմատիկ հեղուկ բյուրեղի հիման վրա պատրաստված էլեկտրականորեն ղեկավարվող փուլային թիթեղների հիմնական բնութագրերի հետազոտման արդյունքները՝ փոխանջատման ժամանակը և վերահասկվող փուլային շեղման չափաբերման կորի որոշումը: Արված են հեղուկ բյուրեղի դիրեկտորի արտա-քին դաշտում վերակողմնորոշման պրոցեսների համակրգչային մոդելավորում և թվային հաշվարկներ: LabView ծրագրային փաթեթի հիման վրա ստեղծվել է հատուկ ծրագիր՝ հեղուկ բյուրեղի բջջի վրա կիրառված լարման ձևը, հաճախությունը և ապակիտուղը համա-կարգչի միջոցով ղեկավարելու համար:

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF ELECTRICALLY CONTROLLED LIQUID-CRYSTAL RETARDERS

V.K. ABRAHAMYAN, N.H. HAKOBYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, V.G. BABAJANYAN,
H.L. MARGARYAN, D.L. HOVHANNISYAN, A.T. POGHOSYAN, D.K. POKHSRARYAN

Research results of main characteristics of electrically controlled retarders based on planar- and twist-oriented nematic liquid crystals – switching time and definition of controlled phase retardation calibration curve, are presented. Computer simulation and numerical calculations of the liquid-crystal director orientation processes in external electric field are carried out. On the base of LabView software a special program was built for computer control of form, frequency and amplitude of control voltages applied to LC cells. Using this program, an experiment of realization of the specified phase incursion was performed. Calculated data are in accordance with the experimental results.