

УДК 532.738

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

В.К. АБРАМЯН¹, Н.Г. АКОПЯН¹, В.М. АРУТЮНЯН¹, Н.В. КАМАНИНА², А.Л.
МАРГАРЯН¹, Д.Л. ОГАНЕСЯН¹, Д.К. ПОХСРАРЯН¹

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

(Поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.)

Проведено исследование влияния продольного напряжения, приложенного вдоль полупроводниковой подложки планарно-ориентированной жидкокристаллической ячейки, на двулучепреломление нематического жидкого кристалла (НЖК). Показано, что при фиксированном значении поперечного поля приложение продольного напряжения создает дополнительную возможность управления электрооптически-наведенной фазовой задержкой проходящего через НЖК излучения. Получена зависимость фазовой задержки от управляющих напряжений. Приведены результаты моделирования влияния продольного напряжения на процесс переориентации НЖК. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании жидкокристаллических фазовых модуляторов.

1. Введение

Одной из важнейших характеристик оптоэлектронных устройств на основе жидких кристаллов (ЖК) является время переключения, обусловленное в основном временем переориентации молекул ЖК. Проблема улучшения времени переориентации является весьма актуальной, в частности, в адаптивной оптике, в задачах пространственно-временной фильтрации с использованием электрически-управляемого транспаранта на основе ЖК. Существуют определенные способы улучшения временных характеристик ЖК ячеек. Они заключаются в повышении напряжения питания, уменьшении толщины структуры, изменении угла предварительного наклона директора молекулы ЖК на границе, а также синтезе новых типов малоинерционных ЖК [1-3]. Сегодня наиболее широкое распространение находят пространственно-временные модуляторы света на основе структуры полупроводник – нематический жидкий кристалл.

В данной работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования влияния напряжения, приложенного к полупроводниковой подложке жидкокристаллической ячейки, на наведенное

двулучепреломление в НЖК. Показано, что изменением амплитуды электрического поля, прикладываемого к полупроводнику, можно осуществить управление величиной наведенного двулучепреломления. Показано также, что приложение электрического поля к полупроводнику приводит к уменьшению времени переориентации НЖК.

2. Постановка задачи

Для выявления возможности дополнительного управления величиной наведенного двулучепреломления исследована планарно-ориентированная жидкокристаллическая ячейка, одной из подложек которой является полупроводник. При этом для управления величиной электрооптически наведенного двулучепреломления, кроме поперечного поля, под воздействием которого происходит переход Фредерикса, используется также управляющее напряжение (продольное поле), прикладываемое вдоль полупроводниковой подложки. Ранее при проведении нами аналогичных экспериментов к полупроводнику прикладывалось постоянное электрическое поле [4-6]. Это приводило к повышению температуры НЖК в результате выделения тепла на полупроводниковой подложке и, соответственно, к уменьшению оптической анизотропии ЖК. В данной работе с целью сведения к минимуму тепловых эффектов, вместо постоянного электрического поля, к полупроводнику прикладывались короткие дипольные электрические импульсы. Длительность импульсов выбрана таким образом, чтобы обеспечить процесс переориентации НЖК, а выбор периода следования импульсов обусловлен временем, необходимым для полной релаксации ЖК до прихода следующего импульса.

Для решения рассматриваемой задачи необходимо определить влияние поперечного и продольного управляющих напряжений на двулучепреломление ЖК ячейки. С этой целью следует исследовать динамику изменения фазового набега, обусловленного переходом Фредерикса, под влиянием продольного электрического поля, прикладываемого к кремниевой подложке.

3. Теоретическое рассмотрение задачи. Моделирование процесса переориентации директора нематического жидкого кристалла во внешнем продольном и поперечном электрических полях

Рассмотрим динамику переориентации директора НЖК во внешнем продольном и поперечном электрических полях при следующих упрощающих предположениях. Рассмотрим ячейку НЖК с планарной ориентацией, направленной вдоль оси x . Поперечное электрическое поле приложено перпендикулярно директору вдоль оси z , а продольное электрическое поле приложено вдоль проводящей подложки НЖК ячейки. В качестве проводящей подложки в данной работе рассматривается полупроводник. Рассмотрим случай, когда имеется жесткая связь молекул НЖК с поверхностями подложек ячейки: отсутствуют потоки жидкости, переориентирующие директор. Электропроводностью НЖК пренебрегаем, а анизотропия диэлектрической

проницаемости принимается малой по сравнению со средней диэлектрической постоянной (т.е. поле в образце считается однородным). При данных упрощениях динамика угла наклона директора θ относительно оси z описывается уравнением Эриксона–Лесли и имеет следующий вид [7]:

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

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, $\epsilon_0 \Delta \epsilon E_{\perp}^2$ – плотность энергии электрического поля, а $E_{\perp}$ – амплитуда электрического поля.

В рассматриваемой модели к НЖК ячейке одновременно прикладываются поперечное и продольное электрические поля. Одновременно с поперечным электрическим полем, под воздействием которого происходит переход Фредерикса, вдоль полупроводника прикладывается продольное электрическое поле. Под воздействием этого поля в полупроводнике возникает дрейфовое движение электронов. Дрейфовый ток в полупроводнике, граничащим с планарно-ориентированным НЖК, за время действия продольного электрического поля дает вклад в свободную энергию жидкого кристалла. Это в свою очередь приводит к увеличению значения коэффициента деформаций поперечного изгиба и, следовательно, к увеличению значения порогового напряжения. Аналогичная ситуация имеет место в случае, когда на ЖК ячейку одновременно с поперечным электрическим полем подается продольное магнитное поле, приводящее к увеличению коэффициента упругости и значения порогового напряжения [8]. Иначе говоря, в рассматриваемом нами случае при фиксированном значении амплитуды поперечного поля можно управлять величиной наведенного двулучепреломления в НЖК путем изменения значения амплитуды продольного поля, прикладываемого к полупроводнику.

В общем случае решить уравнение (1) можно лишь численно. С учетом вышеизложенного можно сказать, что в уравнении (1) коэффициенты упругости являются функциями от амплитуды продольного поля. Поэтому 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 принимает вид

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

где $E_c(E_{\square}) = (\pi/d) \sqrt{4\pi K(E_{\square}) / \epsilon_0 \Delta \epsilon}$ – пороговое значение статического электрического поля, выше которого возникает ориентационная деформация, а d – толщина ЖК ячейки. В выражении (2) учитывается зависимость как времени включения, так и порогового значения поля от величины продольного поля. Следует отметить, что при отсутствии поперечного поля при планарной ориентации НЖК приложение продольного поля не может привести к пространственной переориентации молекул. Однако, согласно (2), при

фиксированном значении поперечного поля изменением величины продольного поля можно осуществить управление значением времени включения. При выключении поперечного поля из условия баланса между упругим и вязким моментами для времени релаксации директора получается следующее выражение:

$$\tau_2(E_{\perp} = 0, E_{\parallel}) = \gamma d^2 / \pi^2 K(E_{\parallel}). \quad (3)$$

Как видно из (3), изменением величины продольного поля можно управлять значением времени релаксации. А именно, увеличивая значение амплитуды продольного поля, можно уменьшить время релаксации.

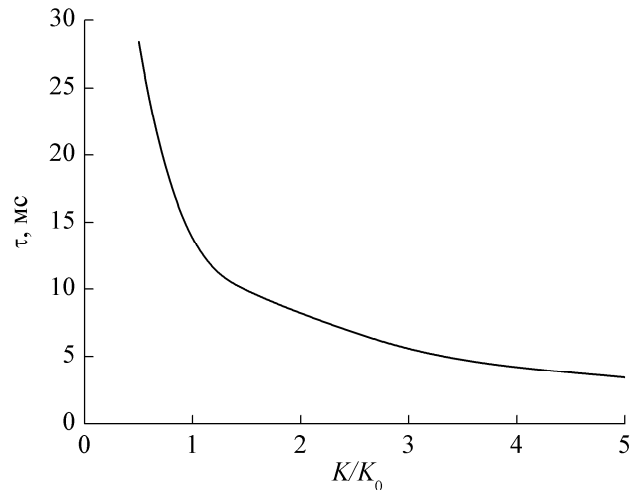


Рис.1. Зависимость времени релаксации НЖК от нормированного значения коэффициента упругости.

Для получения зависимости времени релаксации от коэффициента упругости численное решение уравнения (1) осуществлялось методом конечных разностей при следующих значениях параметров: значение угла наклона θ на границах принималось равным нулю, толщина ячейки с НЖК типа 5CB ($K_0 = 10$ пН, $\epsilon_e = 20$, $\epsilon_0 = 6.7$, $\gamma = 9 \cdot 10^{13}$ кг/м(с) принималась равной 7 мкм. Фиксированное значение амплитуды поперечного напряжения принималось равным 9 В. Зависимость расчетного времени релаксации НЖК от нормированного значения коэффициента упругости K/K_0 показана на рис.1. Видно, что при увеличении K/K_0 от 0.5 до 5 время релаксации НЖК уменьшается почти от 27.5 мс до 0.3 мс.

4. Описание эксперимента

Для проведения эксперимента была изготовлена планарно-ориентированная ячейка, заполненная НЖК марки 5CB (Merck) толщиной 7 мкм. В качестве одной из подложек ячейки использовалась пластина монокристаллического кремния толщиной 350 мкм с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см, а вторая

подложка представляла собой стеклянную пластину толщиной 1 мм, на которую было нанесено прозрачное проводящее покрытие (ITO). Ориентирование молекул НЖК на подложках производилось методом машинной затирки полимерного покрытия (поливиниловый спирт).

На рис.2 приведена оптическая схема экспериментальной установки. Излучение He-Ne лазера 1 на длине волны 0.63 мкм через нейтральный фильтр 2 направляется на призму Глана 3. Прошедший через призму Глана линейно-поляризованный пучок падает на ЖК ячейку 4, установленную перпендикулярно направлению распространения лазерного пучка. Таким образом, отраженный от полупроводниковой подложки ЖК ячейки пучок снова попадает на призму Глана. При этом изменение поляризации отраженного от ЖК ячейки пучка обусловлено электрооптически-наведенным двулучепреломлением НЖК. Отраженный от призмы Глана пучок с линейной поляризацией, перпендикулярной поляризации падающего на ячейку пучка, регистрируется фотодетектором 5. Электрический сигнал с выхода фотодетектора подается на цифровой осциллограф Tektronix TDS-3032 или на компьютер через карту NI DAQ 6025E. Представленная на рис.1 схема аналогична случаю, когда исследуемая ячейка располагается между двумя скрещенными поляризаторами.

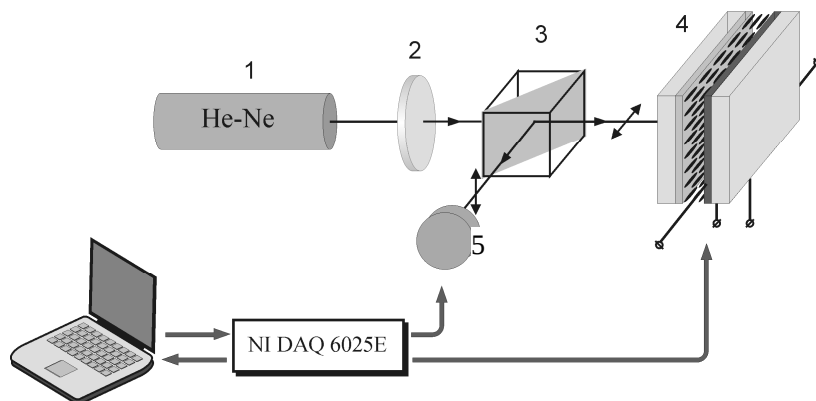


Рис.2. Схема экспериментальной установки.

Для управления параметрами подаваемых на НЖК ячейку поперечного и продольного электрических полей были созданы специальное аппаратное обеспечение и соответствующая программа в среде LabView. Данная программа позволяет формировать биполярные электрические импульсы с различной амплитудой, частотой следования и длительностью, которые после усиления подаются на исследуемую ячейку (рис.3). С выхода усилителя через первый канал на ячейку подается поперечное электрическое поле, а через второй – продольное, прилагаемое вдоль полупроводниковой ячейки. В ходе эксперимента управляющие напряжения и сигнал с выхода фотодетектора регистрировались одновременно.

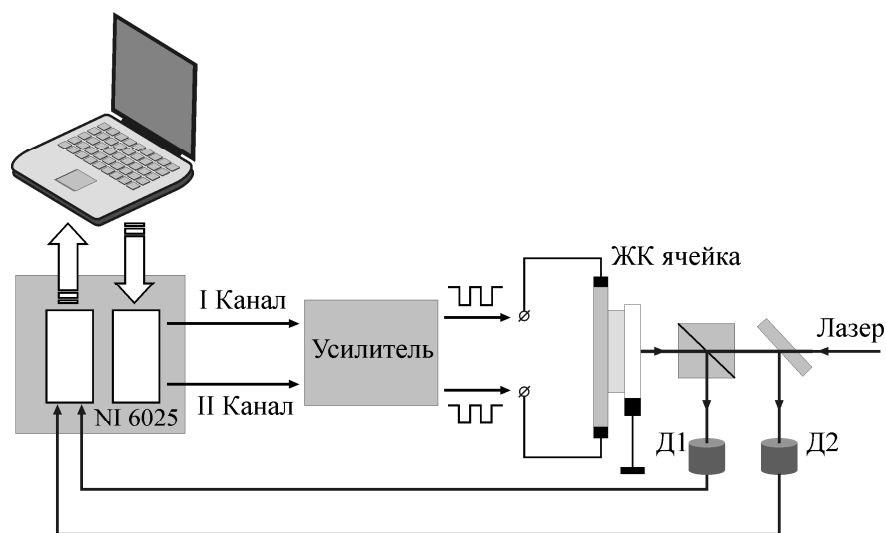


Рис.3. Блок-схема установки.

На рис.4 приведено схематическое изображение исследуемой НЖК ячейки со специальными электрическими контактами для приложения управляющих напряжений.

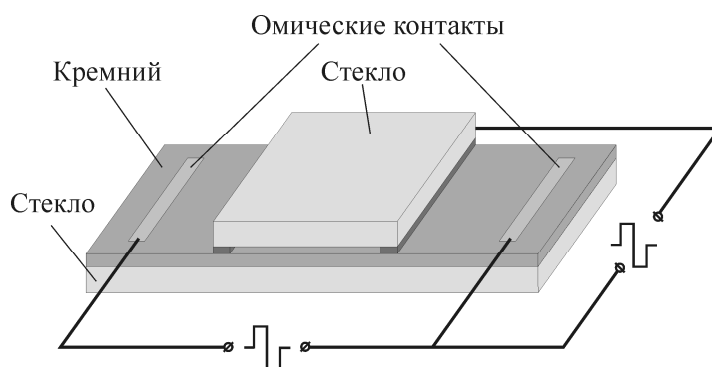


Рис.4. Схема ЖК ячейки со специальными контактами для приложения управляющих напряжений.

Эксперимент проводился следующим образом. К НЖК ячейке прикладываются двуполярные импульсы (поперечное поле), под воздействием которых происходит переход Фредерикса. Одновременно с поперечными импульсами на кремниевую подложку подаются двуполярные импульсы (продольное поле). Длительность импульсов составляла 1–2 мс, а частота следования 0.25–1 Гц. С целью исследования влияния вышеупомянутых управляющих напряжений на двулучепреломление НЖК были проведены две серии экспериментов: 1) исследование зависимости фазовой задержки от амплитуды поперечного поля ($V_{\perp}$) при фиксированном значении амплитуды продольного поля ($V_{\parallel}$); 2) исследование зависимости фазовой задержки от амплитуды продольного поля при фиксированном значении амплитуды поперечного поля.

Визуализация и обработка результатов эксперимента осуществлялись с помощью интерфейса, на котором отображались процессы переориентации и релаксации (рис.5а,б). Из временной зависимости интенсивности процесса релаксации путем применения преобразования Гильберта восстанавливалась временная зависимость фазового набега (рис.5в).

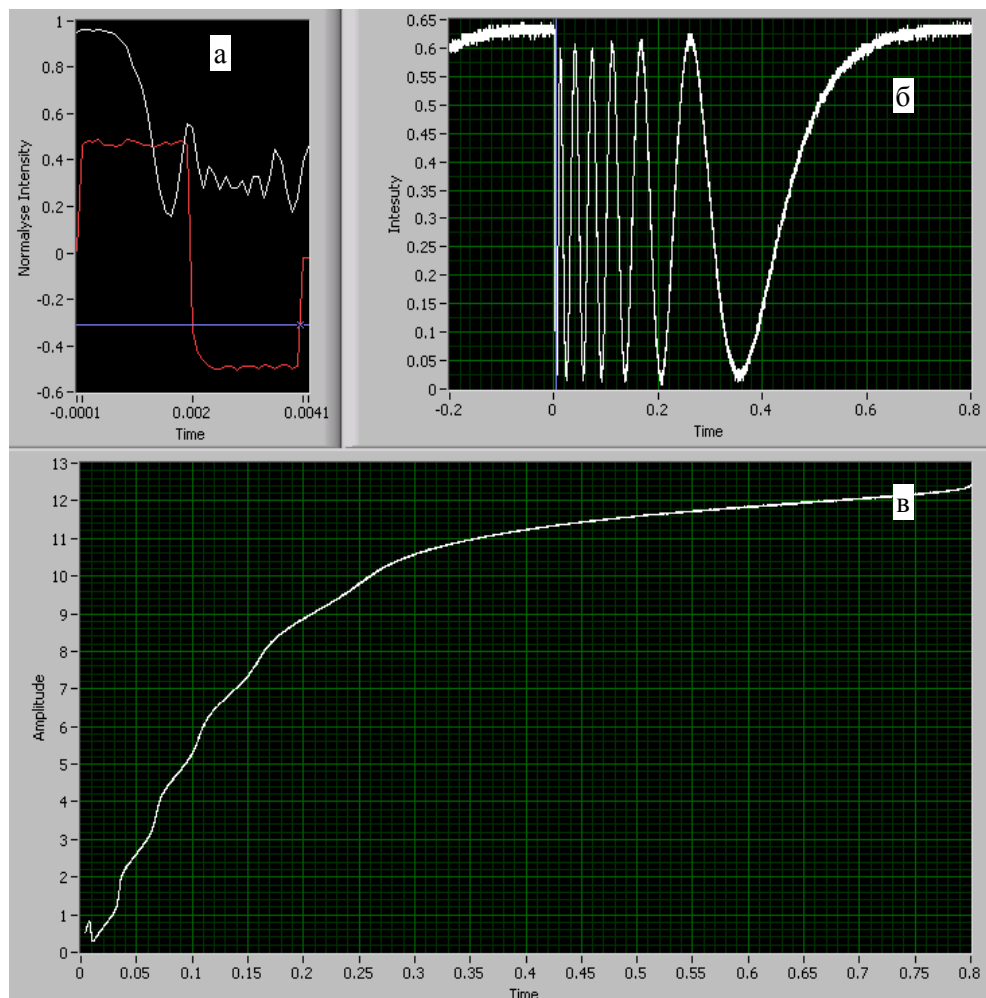


Рис.5. Интерфейс для визуализации и обработки результатов эксперимента.

В ходе эксперимента для каждой пары значений $V_{\perp}$ и $V_{\square}$ получается соответствующая временная зависимость фазового набега. Из множества таких кривых определяется зависимость фазового набега от изменяемого управляющего напряжения. При этом значение фазового набега определяется для фиксированного момента времени, при котором процесс релаксации можно считать завершённым.

5. Обсуждение результатов

Рассмотрим, как реализуется процесс управления фазовым набегом

отраженного от ЖК ячейки света посредством изменения $V_{\perp}$ при заданном значении $V_{\parallel}$. На рис.6 приведены временные зависимости фазового набега ($\Delta\varphi$) отраженного света при разных значениях $V_{\perp}$ и при $V_{\parallel} = 0$ В (а) и $V_{\parallel} = 57.6$ В (б), соответственно. Следует отметить, что при отсутствии поперечного напряжения приложение продольного поля не наводит двулучепреломления.

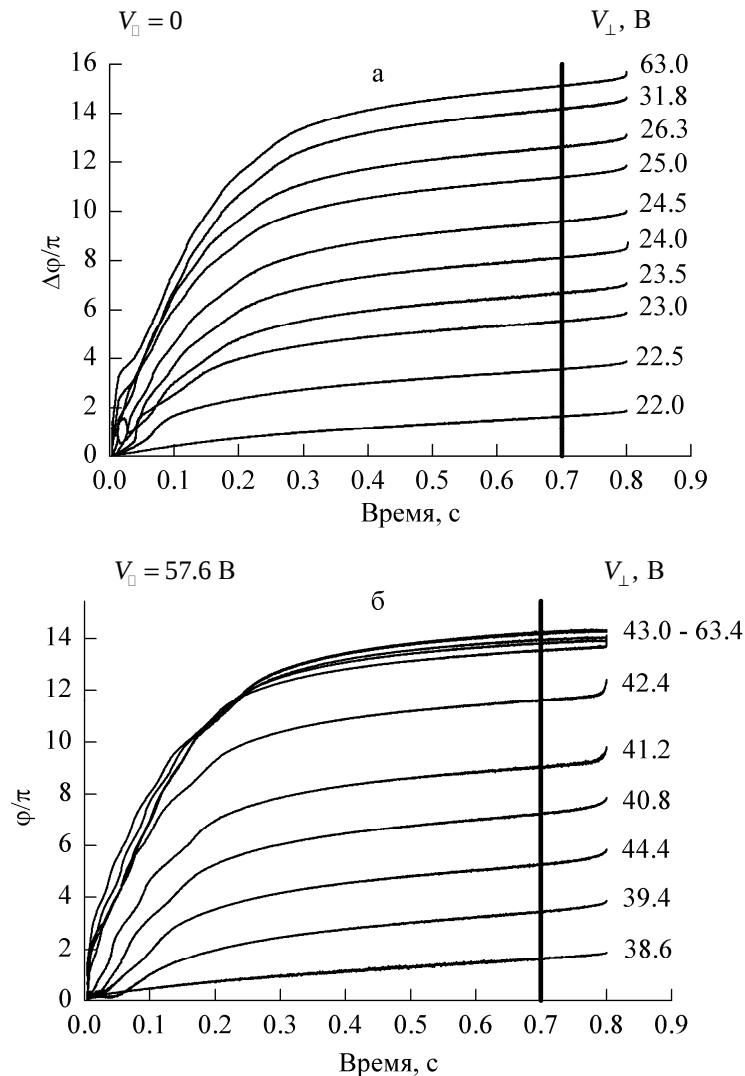


Рис.6. Временная зависимость фазового набега отраженного света для различных значений поперечного поля при фиксированном значении продольного поля $V_{\parallel} = 0$ В (а) и $V_{\parallel} = 57.6$ В (б).

Из полученной серии кривых определяются зависимости фазового набега от величины поперечного напряжения для фиксированного момента времени (в данном случае 0.7 с) при различных значениях постоянного продольного напряжения (рис.7). Как видно из рисунка, характер зависимости для различных значений продольного поля одинаков: фазовый набег с увеличением $V_{\perp}$ резко

возрастает, затем наблюдается насыщение. Однако увеличение $V_{\square}$ приводит к смещению порога Фредерикса в сторону больших значений.

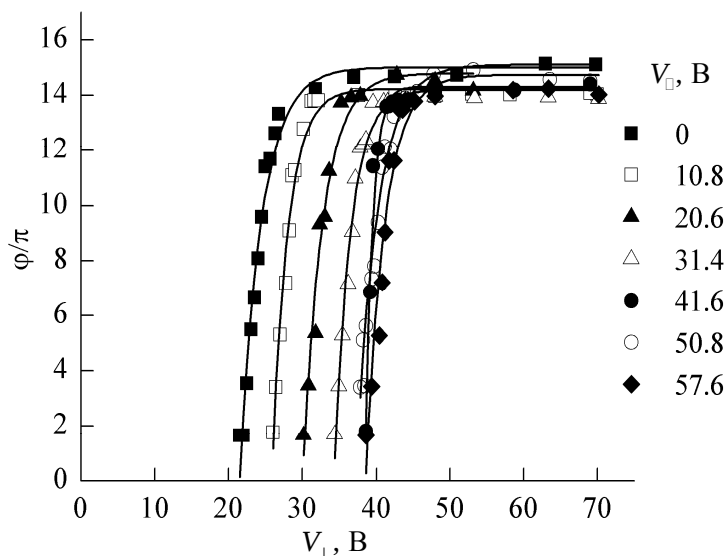


Рис.7. Зависимость фазового набег от величины поперечного напряжения при различных значениях постоянного продольного напряжения.

Процесс управления фазовым набегом отраженного от ЖК ячейки света посредством изменения $V_{\square}$ при заданном значении $V_{\perp}$ реализуется следующим образом. К ЖК ячейке прикладывалось поперечное напряжение (выше порога Фредерикса), в результате чего прошедшее через ЖК излучение приобретает соответствующий фазовый набег. Далее, синхронно с поперечными импульсами на ячейку подавались продольные импульсы, амплитуда которых увеличивалась с определенным шагом. Временная зависимость фазового набег от управляющих напряжений для случая с варьируемым значением продольного напряжения приведена на рис.8. Из рисунка видно, что увеличение значения $V_{\square}$ приводит к уменьшению фазового набег, наведенного поперечным полем.

Из полученной серии кривых в соответствии с вышеописанной методикой определялась зависимость фазового набег от величины продольного напряжения при различных значениях постоянного поперечного напряжения (рис.9). Как видно из рисунка, при каждом заданном значении $V_{\square}$ путем варьирования $V_{\perp}$ можно осуществить плавное изменение фазового набег. При этом диапазон изменения управляющего продольного напряжения достаточно широк и увеличивается с увеличением начального фазового набег. В данном случае, в отличие от предыдущего, любое небольшое изменение амплитуды продольного напряжения приводит к небольшому изменению фазы прошедшего излучения.

$V_{\square}, \text{B}$

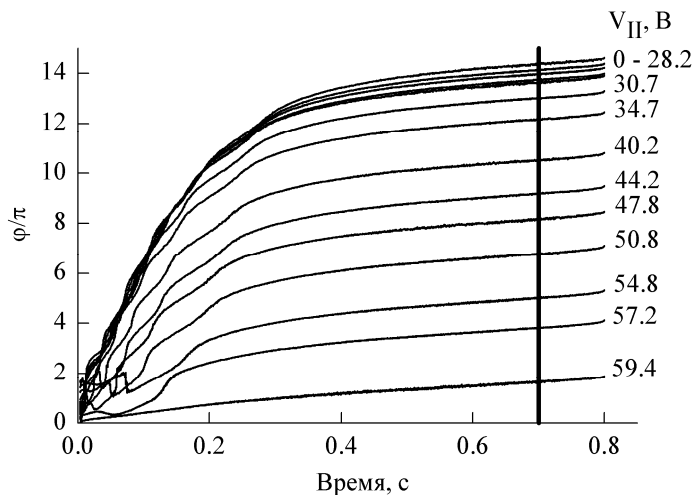


Рис.8. Временная зависимость фазового набег отраженного света для различных значений продольного поля при фиксированном значении поперечного поля $V_{\perp} = 38.0$ В.

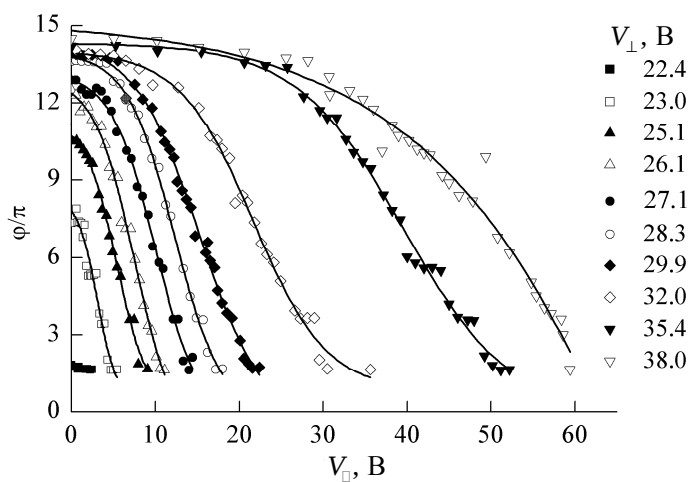


Рис.9. Зависимость фазового набег от величины продольного напряжения при различных значениях постоянного поперечного напряжения.

6. Выводы

В результате проведенных исследований показана возможность плавного изменения фазового набег путем изменения амплитуды продольного напряжения, приложенного вдоль полупроводниковой подложки планарно-ориенти-рованной жидкокристаллической ячейки. Таким образом, можно реализовать дополнительное управление величиной наведенного двулучепреломления в НЖК. Установлено также, что увеличение амплитуды продольного поля приводит к увеличению порогового значения напряжения Фредерикса. Результаты численного моделирования влияния продольного напряжения на процесс переориентации НЖК находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть использованы при разработке жидкокристаллических фазовых модуляторов, в частности, для улучшения временных характеристик и усовершенствования

процесса управления модуляционными характеристиками.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ А-1484.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Д.Думаревский, Н.Ф.Ковтонюк, А.И.Савин. Преобразование изображений в структурах полупроводник-диэлектрик. М., Наука, 1987.
2. А.А.Васильев, Д.И.Касасент, И.П.Компанец, А.В.Парфенов. Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 1987.
3. X.Nie, H.Xianyu, R.Lu, T.Wu. Journal of Display Technology, **3**, 280 (2007).
4. A.O.Arakelyan, V.M.Aroutiounian, H.L.Margaryan, V.A.Meliksetyan, S.R.Nersi-syan, N.V.Tabiryan. Mol. Cryst. Liquid Cryst., **422**, 497 (2004).
5. H.L.Margaryan, V.M.Aroutiounian. Mol. Cryst. Liq. Cryst., **454**, 111 (2006).
6. H.Margaryan, V.Aroutiounian, V.Babajanyan, N.Hakobyan, V.Harutyunyan, V.Abrahamyan. Mol. Cryst. Liq. Cryst., **488**, 231 (2008).
7. L.M.Blinov, V.G.Chigrinov. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. New York, Springer-Verlag, 1994.
8. В.Г.Чилингаров. Кристаллография, **27**, 404 (1982).

ԼՐԱՅՈՒՑԻՉ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՈՒՆԸ
ՆԵՄԱՏԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂԻ ԵՐԿԲԵԿՄԱՆ ՎՐԱ

Վ.Կ. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ն.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ն.Վ. ԿԱՄԱՆԻՆԱ,
Հ.Լ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Դ.Լ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Դ.Կ. ՓՈԽՍՐԱՐՅԱՆ

Բերված են նեմատիկ հեղուկ բյուրեղի (ՆՀԲ) երկբեկման վրա պլանար կողմնորոշված հեղուկ բյուրեղային բջժի կիսահաղորդչային հարթակի երկայնքով կիրառված լարման ազդեցության հետազոտության արդյունքները: Ցույց է տրված, որ լայնական դաշտի ֆիքսված արժեքի դեպքում երկայնական լարման կիրառությունը ստեղծում է ՆՀԲ-ով անցնող լույսի էլեկտրաօպտիկական եղանակով մակածված փուլային հապաղման լրացուցիչ կառավարման հնարավորություն: Ստացված է փուլային հապաղման կախվածությունը կառավարող լարումներից: Բերված են ՆՀԲ-ի վերակողմնորոշման պրոցեսի վրա երկայնական լարման ազդեցության մոդելավորման արդյունքները:

INFLUENCE OF ADDITIONAL ELECTRIC FIELD ON THE BIREFRINGENCE OF NEMATIC LIQUID CRYSTAL

V.K. ABRAHAMYAN, N.H. HAKOBYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, N.V. KAMANINA,
H.L. MARGARYAN, D.L. HOVHANNISYAN, D.K. POKHSRARYAN

The results of investigating the influence of the longitudinal voltage, applied along the semiconductor substrate of the planar-oriented liquid-crystal cell, on the birefringence of a nematic liquid crystal (NLC) are presented. It is shown that with the fixed value of transverse field the application of longitudinal voltage gives an additional possibility to control the electro-optically induced phase delay of radiation passing through NLC. The dependence of the phase delay on control voltages is obtained. The results of simulation of the longitudinal voltage influence on the process of NLC reorientation are given.