

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

Г. В. Симоненко

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ СЦЕПЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА
С ОРИЕНТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ π -ЯЧЕЙКИ**

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, 410012 Саратов, Россия. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

Выполнено компьютерное моделирование характеристик ЖК-модулятора на основе π -ячеек для 3D-приложений в зависимости от энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих поверхностях. Показано, что уменьшение энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих подложках для π -ячеек с углом закрутки структуры ЖК 0° приводит к существенному улучшению их интегральных оптических характеристик. Для π -ячеек с углом закрутки ЖК-структуры 180° уменьшение энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими подложками приводит, наоборот, к ухудшению их интегральных оптических характеристик. В то же время для модуляторов на основе π -ячеек, как для ЖК-структуры с углом закрутки 0° , так и для структуры с углом закрутки 180° , уменьшение энергии сцепления на ориентирующих подложках приводит к увеличению полного времени срабатывания модулятора.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, модуляторы, компьютерное моделирование.

DOI: 10.18083/LCAppl.2019.2.40

G. V. Simonenko

**INFLUENCE OF COHESIVE ENERGY OF LIQUID CRYSTAL MOLECULES BINDED
TO ORIENTING SURFACE ON DYNAMIC AND OPTICAL CHARACTERISTICS
OF THE π -CELL BASED MODULATOR**

National Research Saratov State University of N. G. Chernyshevsky,
83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russia. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

Computer simulation of characteristics of the liquid crystalline (LC) modulator based on π -cells for 3D applications was performed considering the cohesive energy of LC molecules on orienting surfaces. It is shown that the decrease in the cohesive energy of LC molecules binded to orienting substrates of π -cells, when the spin angle of LC-structure is 0° , leads to significant improvement of their integrated optical characteristics. On the contrary, when the spin angle is 180° , the cohesive energy decrease results in deterioration of their integrated optical characteristics. At the same time, for modulators based on π -cells, both for the LC-structures with the spin angle of 0° and for structures with the spin angle of 180° , the cohesive energy decrease leads to the increase of the total response time of the modulator.

Key words: liquid crystals, modulator, computer modeling.

Введение

В технологиях применения жидких кристаллов (ЖК) в системах отображения и преобразования информации давно идет поиск путей повышения быстродействия модулятора и снижения времени электрооптического отклика ЖК с десятков миллисекунд до единиц миллисекунд и ниже [1]. С развитием 3D-приложений возник повышенный интерес к ЖК-модуляторам, которые используются в активных стереочках [2–10]. По динамическим и оптическим характеристикам наиболее подходящим устройством для этого может быть ЖК-модулятор на основе π -ячеек различных конструкций [2, 5, 6]. В таких устройствах используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ЖК. Их основным недостатком является относительно большое время срабатывания (не менее 4 мс). Поэтому до сих пор актуальной задачей является перевод времени срабатывания ЖК-модулятора в диапазон хотя бы сотен мкс. На сегодняшний день известны ЖК-модуляторы [9–12], которые удовлетворяют этому условию по уровню быстродействия, однако не получившие широкого распространения. В настоящее время выполнено достаточно полное исследование связи между физико-технологическими параметрами такого устройства и его оптическими и динамическими характеристиками (см., например, [6, 7, 13]) и остается открытым только вопрос о влиянии энергии связи молекул ЖК на ориентирующих поверхностях π -ячейки на ее характеристики. Это обстоятельство может играть большое значение в связи с тем, что в последнее время появились новые технологии ориентации ЖК, которые позволяют получать различные граничные условия в ЖК-ячейках [14–16]. С этой целью нами выполнено компьютерное моделирование характеристик различных конструкций ЖК-модулятора для 3D-приложений в зависимости от энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих поверхностях. Статья состоит из нескольких разделов, в которых дается краткое описание оптических характеристик ЖК-устройств и метода их моделирования и приведены результаты компьютерного моделирования оптических и динамических (временных) характеристик модуляторов.

Характеристики ЖК-модулятора и метод их моделирования

Как правило, при моделировании ЖК-модуляторов используется достаточно большой набор их оптических, электрооптических и динамических (времена реакции τ_{reac} и релаксации τ_{relax}) характеристик [17–19]. Однако для поиска оптимальной конструкции ЖК-модулятора достаточно использовать меньшее число интегральных характеристик [13, 20]:

- среднее по спектру пропускание (отражение) ЖК-модулятора в состоянии «выключено» T_{off} (управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового) или «включено» T_{on} (управляющее напряжение на затвор подано выше порогового значения);

- ахроматичность изображения H , величина которой определяется как расстояние на цветовом треугольнике текущей точки изображения от точки белого цвета D_{65} [20–22]. При этом должно выполняться условие возможности получения полноцветного изображения $H \leq 0,05$ [21];

- средний по спектру контраст изображения (контрастное отношение) C :

$$C = \frac{T_{\text{off}}}{T_{\text{on}}};$$

- полное время срабатывания ЖК-модулятора τ , которое в данном случае определяется так [19]:

$$\tau = \tau_{\text{reac}} + \tau_{\text{relax}}.$$

Для моделирования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-модулятора чаще всего применяется метод компьютерного моделирования [17, 18]. Нами для этой цели использовался пакет программ *MOUSE-LCD* [23–25].

Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений оптических характеристик ЖК-модуляторов показало, что величина расхождения экспериментальных и расчетных данных находится в пределах погрешности эксперимента и в худшем случае не превышает 10 %.

Проверка адекватности компьютерного описания динамики оптического отклика была проведена путем сравнения теоретически полученной и экспериментально измеренной зависимости времени реакции от управляющего напряжения для

ЖК-модулятора, работающего на основе интерференции оптических мод в ЖК-структуре с углом закрутки 180° [26]. Эти зависимости показаны на рис. 1.

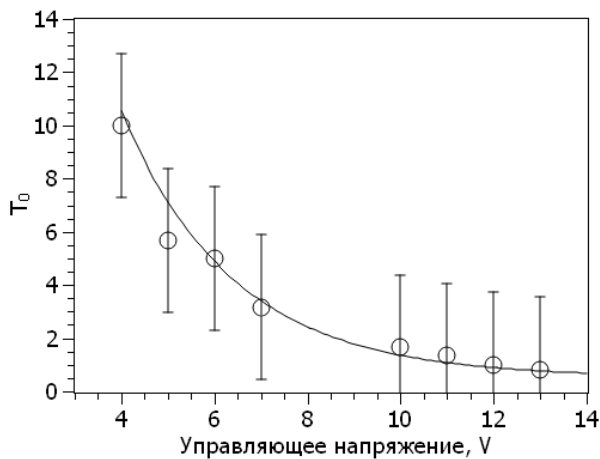


Рис. 1. Сравнение экспериментальных (○) и расчетных (—) данных для динамики оптического отклика ЖК-модулятора на основе структуры с углом закрутки 180° : $T_0 = \tau^{14}_{\text{reac}} / \tau_{\text{reac}}$, τ_{reac} – текущее время реакции ЖК-модулятора, τ^{14}_{reac} – время реакции ЖК-модулятора при управляющем напряжении 14 В

Fig. 1. Comparison of experimental (○) and calculated (—) data for the optical response dynamics of the LCD modulator based on structure with twist angle of 180° : $T_0 = \tau^{14}_{\text{reac}} / \tau_{\text{reac}}$, τ_{reac} – current response time of the LC modulator, τ^{14}_{reac} – reaction time of the LCD modulator at control voltage of 14 V

Отметим, что в приведенных пределах изменения управляющего напряжения экспериментальная и рассчитанная зависимости времени реакции от управляющего напряжения хорошо описываются известной формулой [17, 18]

$$\tau_{\text{reac}} = \frac{\Gamma}{U_{\text{on}}^2 - U_{\text{Fred}}^2},$$

где U_{on} – текущая величина управляющего напряжения, U_{Fred} – напряжение порога эффекта Фредерикса. Постоянная Γ зависит от физических и конструктивных параметров ЖК-модулятора (коэффициентов вязкости, постоянных упругости, диэлектрических постоянных, толщины ЖК-слоя, граничных условий). Отметим, что величина параметра Γ различна для теоретической и экспери-

ментальной кривой, что объясняется в первую очередь неточным заданием основных физических параметров ЖК. В силу этого на рисунке по оси абсцисс приведено нормированное время реакции и различие между экспериментальной и теоретической кривой не превышает 5 %, что говорит об их удовлетворительном количественном согласии. Поэтому можно сделать вывод о том, что система компьютерного моделирования «MOUSE-LCD» количественно верно описывает динамику переключения ЖК-модулятора из состояния «выключено» в состояние «включено», при этом погрешность расчетов будет определяться точностью задания физических и конструктивных параметров модулятора [26].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим ЖК-модулятор на основе π -ячейки. В качестве ЖК-вещества, заполняющего рабочую ячейку, использовался ЖК типа ZLI 4792 фирмы Merck, физические параметры которого приведены в работе [13]. Входной поляризатор (NPF – F 1205 DU) ориентирован к выходному поляризатору (NPF – F 1205 DU) под углом 90° , а к направлению ориентации молекул ЖК на первой подложке – под углом 45° . Физические параметры (толщина и показатель преломления) ориентирующих, проводящих и пассивирующих слоев принимались равными средним технологическим величинам [27]. Мы исследовали характеристики π -ячейки, в которых используется либо «классическая» ориентация ЖК с нулевым углом закрутки структуры [28], либо более современная конструкция ячейки с углом закрутки структуры ЖК $\Phi_T = 180^\circ$ [6, 7]. Так как характеристики ЖК-модулятора зависят от управляющих напряжений, то для обоих типов π -ячеек эти величины считались одинаковыми, чтобы исключить их влияние. В расчетах полагалось что $U_{\text{off}} = 0$ В, а $U_{\text{on}} = 12$ В, т. е. $U_{\text{off}} < U_{\text{Fred}}$, $U_{\text{on}} \gg U_{\text{Fred}}$ (U_{Fred} – напряжение порога Фредерикса). Кроме этого во всех случаях толщина слоя ЖК L в рабочей ячейке всегда бралась равной 3 мкм. Угол преднаклона в отсутствии управляющего напряжения на одной ориентирующей подложке в ячейке $\theta_{01} = 2^\circ$, а на противоположной – $\theta_{02} = -2^\circ$. Сцепление молекул ЖК в азимутальном направлении считалось жестким, а в полярном направлении энергия сцепления выбиралась в виде потенциала Рапины [29]:

– $W = W_{01} \sin^2(\theta_1 - \theta_{01})/2$ на первой подложке, где θ_1 – угол наклона молекул ЖК на первой подложке при подаче управляющего напряжения; W_{01} – энергия сцепления молекул ЖК на первой ориентирующей подложке,

– $W = W_{02} \sin^2(\theta_2 - \theta_{02})/2$ на второй подложке, где θ_2 – угол наклона молекул ЖК на второй подложке при подаче управляющего напряжения; W_{02} – энергия сцепления молекул ЖК на второй ориентирующей подложке.

Заметим, что далее везде в расчетах считается $W_{01} = W_{02} = W_0$, так как нарушение антисимметричности или симметричности граничных условий приводит к значительному ухудшению оптических характеристик ЖК-модуляторов на основе π -ячеек [13]. Введем безразмерный параметр жесткости $\beta = \pi k_{11}/W_0 L$ [30], который удобно использовать для описания всех зависимостей характеристик ЖК-модулятора от энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой.

Рассмотрим зависимость интегральных оптических характеристик ЖК-модулятора от энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой. В первую очередь стоит отметить, что пропускание ЖК-модулятора в состоянии «выключено» как для структуры с углом закрутки 0° , так и для структуры с углом закрутки 180° не зависит от параметра β , так как все эти состояния одинаковы при $U_{off} = 0$. Аналогично ахроматичность этого состояния H_{off} ЖК-модулятора также не зависит от энергии сцепления по этой же причине. При этом стоит отметить, что $T_{off} = 0,42$, а $0,05 \leq H_{off} \leq 0,1$. Последнее условие соответствует слабой окраске состояния ЖК-модулятора при отсутствии управляющего напряжения. Поэтому единственной интегральной оптической характеристикой ЖК-модулятора на основе π -ячейки, которая зависит от энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой, является среднее по спектру контрастное отношение C . На рис. 2 представлена зависимость нормированного среднего по спектру контрастного отношения C^{nor} для ЖК-модулятора на основе π -ячейки от параметра жесткости β на ориентирующих подложках. При этом

$$C^{nor} = C/C^{max},$$

где C – текущее значение контрастного отношения; C^{max} – максимальное значение контрастного отношения.

Для ЖК-модулятора на основе π -ячейки с углом закрутки структуры 180° ситуация иная. При жестких граничных условиях высокие значения контрастного отношения для таких устройств обусловлены эффектом самокомпенсации [6, 7]. Эффект самокомпенсации состоит в том, что в состоянии «включено» π -ячейку с углом закрутки структуры 180° можно представить в виде двух планарных ячеек, ориентированных друг относительно друга на 90° . Это позволяет компенсировать разницу фаз световых волн, прошедших через ЖК, почти до π . Для мягких граничных условий с уменьшением энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими подложками нарушается и эффект фазовой самокомпенсации в состоянии «включено». Это приводит к тому, что с ростом β растет и T_{on} , а так как T_{off} от β не зависит, то контрастное отношение падает. Таким образом, уменьшение энергии сцепления с ориентирующими подложками в ЖК-модуляторе на основе π -ячейки по-разному сказывается на изменении контрастного отношения для структур углом закрутки 0° и 180° .

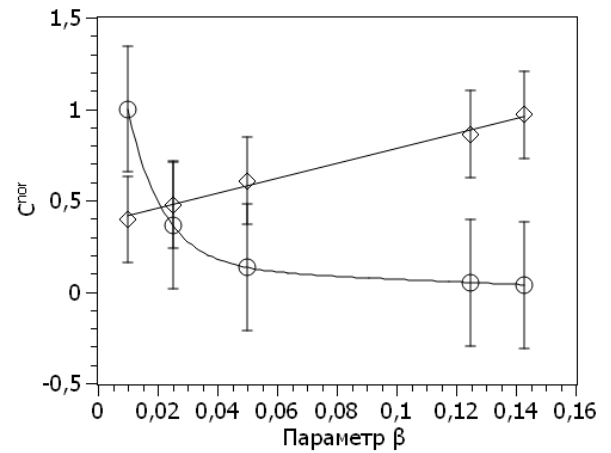


Рис. 2. Зависимость нормированного контрастного отношения ЖК-модулятора от параметра жесткости сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой \diamond – π -ячейка с углом закрутки структуры 0° , \circ – π -ячейка с углом закрутки структуры 180°

Fig. 2. Dependence of the normalized contrast ratio of the LCD modulator on the stiffness parameter of the LCD molecule adhesion to the orienting substrate \diamond – π -cell with the structure twist angle of 0° , \circ – π -cell with the structure twist angle of 180°

Рассмотрим влияние параметра жесткости β на полное время срабатывания ЖК-модулятора τ . В одной из первых работ, в которой рассмотрено влияние энергии сцепления на времена реакции и релаксации в планарных ЖК-ячейках, получена аналитическая связь между τ_{reac} , τ_{relax} и β для случая управляющих напряжений вблизи порога Фредерикса [30]. В нашем случае, когда управляющие напряжения существенно превышают напряжение порога Фредерикса, такая аналитическая зависимость не может быть получена, хотя тенденция в зависимости $\tau = \tau_{\text{reac}} + \tau_{\text{relax}} = \tau(\beta)$ должна быть сохранена. Поэтому в первую очередь проведем сравнение между результатами численного моделирования и аналитическими выражениями. На рис. 3 представлены результаты такого сравнения для ЖК-модулятора на основе классической π -ячейки. Под нормированным полным временем срабатывания τ^{nor} понимается следующее отношение:

$$\tau^{\text{nor}} = \tau / \tau_{\text{max}},$$

где τ – текущее значение полного времени срабатывания модулятора, τ_{max} – максимальное полное время срабатывания модулятора при изменении параметра жесткости β в пределах от 0 до 0,16.

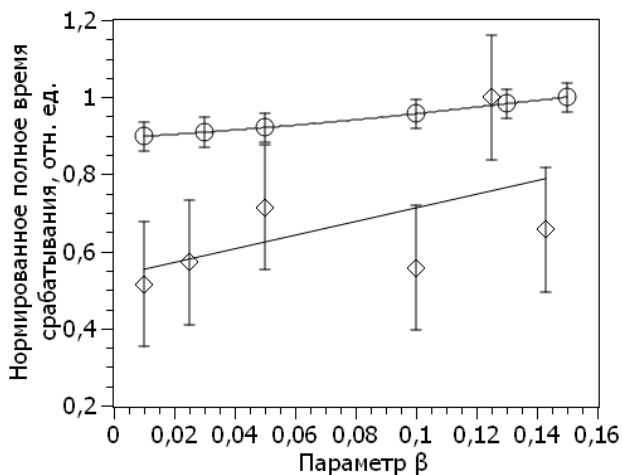


Рис. 3. Сравнение различных теоретических данных между собой: О – прямая, полученная с помощью аналитического выражения из работы [30], ◇ – прямая, полученная с помощью линейной аппроксимации результатов численного моделирования

Fig. 3. Comparison of various theoretical data among themselves: О – the straight line obtained using the analytical expression from [30], ◇ – straight line obtained using linear approximation of numerical simulation results

На этом рисунке обращает на себя внимание то, что функция $\tau^{\text{nor}} = \tau^{\text{nor}}(\beta)$ линейно растет в указанных пределах изменения параметра жесткости. Однако аналитическая зависимость имеет меньший угол наклона, чем линейная зависимость, построенная по результатам численного моделирования. Кроме этого дальнейшее увеличение параметра жесткости ($\beta > 0,2$) приводит к существенному отклонению от линейной зависимости и при ослаблении энергии сцепления приводит к бесконечному росту времени полного срабатывания ЖК-модулятора. На рис. 4 представлены зависимости $\tau^{\text{nor}} = \tau^{\text{nor}}(\beta)$ для ЖК-модуляторов на основе π -ячейки с углами закрутки ЖК-структуры 0° и 180° , которые наиболее востребованы в быстродействующих устройствах.

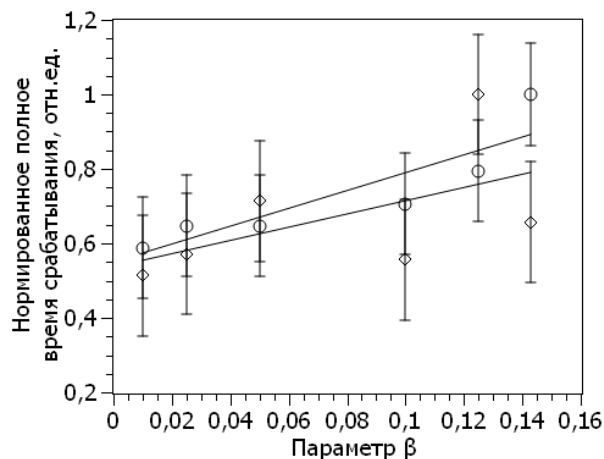


Рис. 4. Зависимость полного времени срабатывания ЖК-модулятора от параметра жесткости сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой: ◇ – π -ячейка с углом закрутки структуры 0° , О – π -ячейка с углом закрутки структуры 180°

Fig. 4. Dependence of the total response time of the LC modulator on the adhesion rigidity parameter of the LC molecules with the orienting substrate: ◇ – π -cell with a twist angle of structure 0° , О – π -cell with a twist angle of the structure 180°

Как следует из этого рисунка, обе зависимости хорошо описываются линейными функциями при изменении параметра жесткости в пределах от 0 до 0,2. При этом угол наклона линейной зависимости для ЖК-структуры с углом закрутки 180° больше, чем для ЖК-структуры с углом закрутки 0° .

Для обеих ориентационных ЖК-структур дальнейшее ослабление энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой, что соответствует случаю $\beta > 0,2$, приводит к резкому росту полного времени срабатывания. Аналогичный прогноз следует также из аналитических выражений для τ_{relax} и τ_{reac} , представленных в работе [30]. Стоит отметить, что резкий рост полного времени срабатывания ЖК-модулятора при изменении параметра жесткости β происходит только за счет увеличения времени релаксации τ_{relax} , в то время как τ_{reac} практически не изменяется. Резкий рост τ_{relax} при увеличении параметра жесткости β происходит потому, что при слабой энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей подложкой при высоких управляющих напряжениях молекулы ЖК принимают гомеотропную ориентацию и упругая сила, которая возвращает ЖК в исходное состояние при снятии напряжения, отсутствует.

Заключение

Таким образом, на основе выполненного компьютерного моделирования характеристик ЖК-модулятора на основе π -ячеек для 3D-приложений в зависимости от энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих поверхностях можно сделать следующие выводы. 1. Уменьшение энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих подложках для π -ячеек с углом закрутки структуры ЖК 0° приводит к существенному улучшению их интегральных оптических характеристик. Для π -ячеек с углом закрутки ЖК структуры 180° уменьшение энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими подложками приводит наоборот к ухудшению их интегральных оптических характеристик. 2. Для ЖК-модуляторов на основе π -ячеек как для ЖК-структуры с углом закрутки 0° , так и для структуры с углом закрутки 180° уменьшение энергии сцепления на ориентирующих подложках приводит к существенному увеличению полного времени срабатывания модулятора.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-07-01005.

Список литературы / References

1. Беляев В. В., Островский Б. И., Пикина Е. С. 14-я Европейская конференция по жидким кристаллам (ECLC-2017), 25–30 июня 2017, Москва // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2018. Т. 18, № 1. С. 84–94. [Belyaev V.V., Ostrovsky B.I., Pikina E.S. The 14th European Conference on Liquid Crystals (ECLC 2017), June 25–30, 2017, Moscow. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (1), 84–94 (in Russ.)].
2. Woods A.J. Crosstalk in stereoscopic displays: a Review. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, **21** (4), 040902.
3. Патент России № RU 2490818. Авто-стереоскопический дисплей с полноэкранным 3d-разрешением (варианты) и способ управления активным параллаксным барьером дисплея / Ежов В. А.; заявл. 2012. [Russian patent № RU 2490818. Auto-stereoscopic display with full-screen 3d resolution (options) and a way to control the active parallax display barrier / Ezhov V.A.; заявлен 2012. Right holders Ezhov V.A. (in Russ.)].
4. Патент РФ № 2604110. Наблюдательно-регистрирующее устройство с локально-адаптивной оптической защитой / Ежов В. А.; опублик. 10.12.2016. [Russian patent № 2604110. Observation-recording device with locally adaptive optical protection / Ezhov V.A.; publ. 10.12.2016. Right holders Ezhov V.A. (in Russ.)].
5. Патент России № RU 2488150. Мультистандартные жидкокристаллические стереочки / Студенцов С. А., Ежов В. А.; опублик. 2011. [Russian patent № RU 2488150. Multi-standard liquid crystal glasses / Studentsov S.A., Ezhov V.A.; publ. 2011. Right holders Studentsov S.A., Ezhov V.A. (in Russ.)].
6. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Выбор оптимальной конструкции оптического затвора на π -ячейке // *Опт. журн.* 2013. Т. 80, № 9, С. 18–22. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Ezhov V.A. Choosing the optimum design for an optical shutter based on a π -cell. *J. Opt. Technol.*, 2013, **80** (9), 537–541. DOI: 10.1364/JOT.80.000537].
7. Симоненко Г. В. Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора // *Опт. журн.* 2014. Т. 81, № 10. С. 50–55. [Simonenko G.V. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs. *J. Opt. Technol.*, 2014, **81** (10), 594–598. DOI: 10.1364/JOT.81.000594].
8. Deng-Ke, Wu Y.S.T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester: John Wiley & Sons, 2014, 592 p.
9. Cheng H., Bhowmik A., Bos P.J. Fast-response liquid crystal variable optical retarder and multilevel attenuator. *Optical Engineering*, 2013, **52** (10), 105–107.
10. Komitov L., Hegde G., Kolev D. Fast liquid crystal light shutter. *Journal of Physics D: Applied physics* 2011, **44** (2), 442002–442006.
11. Geis M.W., Molnar R.J., Turner G.W., Lyszczarz T.M., Osgood R.M., Kimball B.R. 30 to 50 ns Liquid-Crystal Optical Switches. *Emerging Liquid Crystal Technologies V* / ed. by Liang-Chy Chien. *Proc. of SPIE*, 2010, **7618**, 7618 0J. DOI: 10.1117/12.840281.

12. Mohammadimasoudi M., Shin J., Lee K., Neyts K., Beeckman J. Microsecond-range optical shutter for unpolarized light with chiral nematic liquid crystal. *AIP Advances*, 2015, **5**, 047122–047125.
13. Симоненко Г. В. Влияние углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках на характеристики жидкокристаллических модуляторов на основе π -ячеек // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2018. Т. 18, № 3. С. 26–36. [Simonenko G.V. Influence of pre-tilt angles of liquid crystalline molecules placed onto orienting substrates on characteristics of liquid crystalline modulators based on π -cells. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, **18** (3), 26–36. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.3.26 (in Russ.)].
14. Невская Г. Е., Томилин М. Г., Чигринов В. Г. Достижения в ориентации жидких кристаллов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2009. Вып. 1. С. 5–23 [Nevskaya G.E., Tomilin M.G., Chigrinov V.G. Achievements in liquid crystals orientation. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2009, 1, 5–23 (in Russ.)].
15. Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S. Photoalignment of liquid crystalline materials. Physics and applications. Wiley: Series in Display technologies. Wiley, 2008, 248 p.
16. Odarchenko Ya., Defaux M., Rosenthal M., Akhiamova A., Bovsunovskaya P., Melnikov A., Rodygin A., Rychkov A., Gerasimov K., Anokhin D.V., Xiaomin Zhu, Ivanov D.A. One Methylene Group in the Side Chain Can Alter by 90 Degrees the Orientation of a Main-Chain Liquid Crystal on a Unidirectional Substrate. *ACS Macro Letters*, 2018, **7** (4), 453–458. DOI: 10.1021/acsmacrolett.8b00044.
17. Сухарьер А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukharier A.S. Liquid crystal indicators. Moscow : Radio i svyaz, 1991, 256 p. (in Russ.)].
18. Chigrinov V.G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London : Artech House, 1999, 359 p.
19. Симоненко Г., Тучин В., Зимняков Д. Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010, 210 с. [Simonenko G., Tuchin V., Zimnyakov D. Optical characteristics of liquid crystal and biological media. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010, 210 с.].
20. Симоненко Г. В. Оптические характеристики жидкокристаллических модуляторов на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных планарных структурах малой толщины // *Опт. журн.* 2018. Т. 85, № 1. С. 3–11. [Simonenko G.V. Optical characteristics of liquid-crystal modulators based on electric-field-controlled birefringence in various low-thickness planar structures. *J. Opt. Technol.* 2018, **85** (1), 1–7. DOI: 10.1364/JOT.85.000001].
21. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Ахроматичность ЖК-модулятора для 3D-приложений // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Т. 15, № 3. С. 82–90. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Ezhov V.A. Achromaticity of the LCD modulator for 3D applications. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2015, **15** (3), 82–90 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.82].
22. Пашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники: учебник для вузов. М. : Изд-во МГУП, 2002. 280 с. [Shashlov A.B., Uvarova R.M., Churkin A.V. Basics of lighting: textbook for high schools. Moscow : MGUP Publisher, 2002, 280 p. (in Russ.)].
23. Yakovlev D.A., Simonenko G.V., Tsoy V.I., Chigrinov V.G., Khokhlov N.A., Pdyachev Yu.B. LCD-design: universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal. *Proc. SPIE: Saratov Fall Meeting 2001: Coherent Optics of Ordered and Random Media II*, 2002, **4705**, 255–263. DOI: 10.1117/12.469020.
24. Чигринов В. Г., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А., Цой В. И., Хохлов Н. А., Подьячев Ю. Б. Универсальный комплекс ЭВМ программ для оптимизации проектирования жидкокристаллических дисплеев // *Информат. Сер.: Средства отображения информации ВНИИ межотрасл. инф.* 1993. № 2. С. 90–94. [Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Khokholov N.A., Podyachev Yu.B. Universal computer complex programs for optimizing the design of liquid crystal displays. *Informat. Ser. Sredstva otobrazheniya informatsii VNII mezhotrasl. inf.* 1993, 2, 90–94 (in Russ.)].
25. Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Podjachev Yu.B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2000, **351**, 17–25.
26. Симоненко Г. В., Брежнев В. А., Студенцов С. А. Компьютерное моделирование оптического отклика жидкокристаллического дисплея при высоких управляющих напряжениях. Часть 1 Динамика оптического отклика в зависимости от конструктивных параметров дисплея // *Опт. журн.* 2003. Т. 70, № 7. С. 42–45. [Simonenko G.V., Studentsov S.A., Brezhnev V.A. Computer modelling of the optical response of a liquid-crystal display at high control voltages. Part 1. Dynamics of the optical response as a function of the displays design parameters. *J. Opt. Technol.*, 2003, **70** (7), 485–488].
27. Sevostianov V.P., Simonenko G.V., Brezhnev V.A., Studentsov S.A., Yakovlev D.A. Experimental and theoretical study of optical characteristics of LC shutter on π -cells. *Photonics and Optoelectronics*, 1997, **4** (4), 139–146.

-
-
28. Bos P.J., Beran K.R. The π -cell: A fast liquid-crystal optical-switching device. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1984, **113**, 329–339.
29. Rapini A., Papoular M.J. Distorsion d'une lamelle nématique sous champ magnétique conditions d'ancrage aux parois. *J. de Phys. (Paris) Colloq.*, 1969, **30** (C4), C4-54–C4-56.
DOI: 10.1051/jphyscol:1969413.
30. Tsoy V.I. Fredericksz Transition Dynamics in a Nematic Layer with a Surface Viscosity. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1995, **264**, 51–56.

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.
Received 25 March 2019