УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-28-41

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ЖК ЯЧЕЕК С АНТИСИММЕТРИЧНЫМИ УГЛАМИ ПРЕДНАКЛОНА НА ОРИЕНТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ СЦЕПЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ЖК НА ГРАНИЦАХ

Симоненко Г. В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, Российская Федерация

Аннотация. Цель работы – проведение с помощью компьютерного моделирования исследования влияния значений углов преднаклона и энергии сцепления молекул ЖК в тонких ячейках с различными углами закрутки структуры при антисимметричных граничных условиях на их оптические и динамические характеристики. В результате показано, что увеличение значений углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ячеек приводит к незначительному росту контрастного отношения в ЖК ячейках с углами закрутки, равными 0° , 90° и 270° , при незначительном изменении полного времени срабатывания таких ячеек. В ЖК ячейках с углом закрутки структуры 180° увеличение значения угла преднаклона приводит к уменьшению контрастного отношения и одновременному росту полного времени срабатывания таких устройств. В то же время уменьшение энергии сцепления в тонких ЖК ячейках с антисимметричными граничными условиями приводит к увеличению полного времени срабатывания таких модуляторов для всех углов закрутки структуры ЖК. Однако для различных углов закрутки структуры ЖК контрастное отношение с уменьшением энергии сцепления молекул ЖК с подложками ведет себя другим образом. Так, для структур с углами закрутки 180° и 270° контрастное отношение тонких ЖК ячеек с уменьшением энергии сцепления существенно уменьшается, а для структур с углами закрутки 0° и 90° с уменьшением энергии сцепления контрастное отношение незначительно растет.

Ключевые слова: жидкий кристалл, моделирование, граничные условия

COMPUTER ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THIN LC CELLS WITH ANTISYMMETRIC ANGLES OF THE PRE-TILT ON THE ORIENTING SURFACES AT DIFFERENT ANCHORING ENERGIES OF LC MOLECULES AT BORDERS

G. Simonenko

*N. G. Chernyshevsky Saratov National Research State University
ul. Astrakhanskaya 83, 410004 Saratov, Russian Federation*

Abstract. The aim of the work is to carry out a computer simulation of the influence of the values of the pre-tilt angles and the anchoring energy of LC molecules in thin cells with different twist angles of the structure with antisymmetric boundary conditions on their optical and dynamic characteristics. It is shown that an increase in the values of the pretilt angles of the LC molecules on the orienting surfaces of the cells leads to a slight increase in the contrast ratio in the LC cells with spin angles of 0° , 90° and 270° , with a slight change in the total response time of such cells. In LC cells with a twist angle of the structure of 180° , an increase in the value of the pre-tilt angle leads to a decrease in the contrast ratio and a simultaneous increase in the total response time of such devices. At the same time, a decrease in the anchoring energy in thin LC cells with antisymmetric boundary conditions leads to an increase in the total response time of such modulators for all twist angles of the LC structure. However, for different twist angles of the LC structure, the contrast ratio with a decrease in the anchoring energy of LC molecules with substrates behaves in a different way. Thus, for structures with twist angles of 180° and 270° , the contrast ratio of thin LC cells decreases significantly with the anchoring energy, while for structures with twist angles of 0° and 90° , the contrast ratio increases slightly with decreasing the anchoring energy.

Keywords: *liquid* crystal, modeling, boundary conditions

Введение

Одной из проблем, которая до сих пор решена не полностью, является создание ЖК устройств с приемлемыми для быстродействующих приложений временами срабатывания [1]. Наиболее востребованными быстродействующими ЖК устройствами являются ЖК модуляторы для многочисленных 3D приложений [2]. В настоящее время существует масса ЖК модуляторов на основе ЖК ячеек с антисимметричными граничными условиями, в которых используются различные ЖК структуры, начиная от классических π -ячеек [3], до твист-структур с углами 90° [4], 180° [5], или 270° [6; 7]. В табл. 1 приведено сравнение их смоделированных характеристик, полученных с помощью компьютерного моделирования с использованием пакета программ MOUSE LCD [8–10].

Таблица 1.

Характеристики тонких ЖК-ячеек с антисимметричными граничными условиями на основе структур с различными углами закрутки

Характеристика	Угол закрутки антисимметричной структуры			
	0°	90°	180°	270°
Среднее по спектру пропускание ЖК устройства в состоянии «выключено» T_{off}	0,39	0,42	0,42	0,372
Среднее по спектру контрастное отношение ЖК устройства C	334	3500	1396	318
Полное время срабатывания ЖК устройства τ , ms	9	6	5	4,25
Ахроматичность ЖК устройства в состоянии «выключено» H_{off}	$H \leq 0,08$	$H \leq 0,05$	$H \leq 0,1$	$H \leq 0,05$

Стоит отметить, что на данный момент выполнено достаточно большое число исследований, посвящённых вопросу улучшения характеристик таких ЖК устройств (см. например, [5; 11–12]), однако за рамками этих исследований остался вопрос о влиянии граничных условий на характеристики этих ЖК модуляторов. Актуальность этого вопроса связана с тем, что в настоящий момент появились новые технологии ориентации ЖК на подложках, которые могут позволять создавать различные граничные условия [13; 14]. Стоит отметить, что недавно группой исследователей были выполнены основополагающие работы по измерению величины полярной и азимутальной энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими поверхностями [15] и разработана молекулярная теория взаимодействия ЖК с твёрдой поверхностью [16]. Однако влияние энергии сцепления ЖК с поверхностью на динамику перехода Фредерикса в тонких ячейках с различными граничными условиями не выяснено, что важно для практических применений ЖК ячеек в различных устройствах обработки и отображения информации. В связи с этим в данной работе методом компьютерного моделирования выполнено исследование влияния величин углов преднаклона и энергии сцепления молекул ЖК на ориентирующих подложках в тонких ячейках на характеристики модуляторов с антисимметричными граничными условиями и различными углами закрутки ЖК структуры.

Характеристики ЖК устройств и метод их исследования

Для описания свойств различных ЖК устройств отображения и обработки информации существует большой набор оптических (спектры пропускания или отражения для различных управляющих напряжений, контраст или контрастное отношение), электрооптических (крутизна вольт-контрастной характеристики) и динамических характеристик (времена включения и выключения) [17–19]. Однако для поиска оптимальной конструкции ЖК устройства достаточно использовать четыре интегральные характеристики [20–22]:

- среднее по спектру пропускание 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) [19];
- среднее по спектру контрастное отношение изображения C [19; 20];
- ахроматичность изображения H , величина которой определяется как расстояние на цветовом треугольнике текущей точки изображения от точки белого цвета D_{65} [21–23]. При этом для получения полноцветного изображения должно выполняться условие $H \leq 0,05$ [22];
- полное время срабатывания ЖК устройства τ , которое в данном случае определяется так [20]:

$$\tau = \tau_{reac} + \tau_{relax},$$

где τ_{reac} – время включения устройства; τ_{relax} – время выключения устройства.

Для описания характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК устройства чаще всего применяется метод компьютерного моделирования [17; 18].

Нами для этой цели использовался пакет программ *MOUSE-LCD* [8–10]. Отметим, что расхождение между экспериментальными и рассчитанными значениями оптических характеристик ЖК устройств, работающих на основе различных электрооптических эффектов (твист-эффекта, эффекта интерференции поляризованных лучей и эффекта «гость-хозяин»), находится в пределах погрешности эксперимента и в худшем случае не превышает 10% [9; 10]. Кроме этого заметим, что различие между вычисленной и экспериментальной зависимостью времени реакции оптического отклика от управляющего напряжения для ЖК устройства, работающего на основе интерференции оптических мод в ЖК структуре с углом закрутки 180° , не превышает 5% [24]. Поэтому можно считать, что система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD* количественно верно описывает все характеристики ЖК устройств отображения и обработки информации, а погрешность расчётов будет определяться точностью задания физических и конструктивных параметров модулятора.

Результаты и обсуждение

Нами исследовались характеристики ЖК устройств, выполненных на базе тонких ЖК ячеек с антисимметричными граничными условиями и различными углами закрутки структуры Φ_i (0° , 90° , 180° , 270°). Все ЖК устройства, кроме одного на основе структуры с углом закрутки 180° , состояли из ЖК ячейки, перед которой помещался входной поляризатор, а за ней друг за другом размещались фазовый компенсатор и выходной поляризатор. В устройстве с ячейкой со 180° -градусной структурой фазовый компенсатор отсутствовал. В табл. 2 приведены основные конструктивные параметры для исследуемых ЖК устройств.

Таблица 2.

Конструктивные параметры ЖК устройств на основе тонких ЖК-ячеек с антисимметричными граничными условиями и различными углами закрутки структуры ЖК

Конструктивный параметр	Угол закрутки антисимметричной структуры			
	0°	90°	180°	270°
Угол ориентации входного поляризатора α_{in} , град.	45	0	45	0
Угол ориентации выходного поляризатора α_{out} , град.	–45	90	–45	90
Фазовая задержка ЖК ($\Delta n \times L$) на длине волны 550 нм, мкм	0,35	0,7	0,35	0,7
Угол ориентации фазового компенсатора β , град.	20	38	–	28
Фазовая задержка компенсатора на длине волны 550 нм, мкм	0,0345	0,023	–	0,0345

При моделировании электрооптических характеристик ЖК устройства считалось, что ЖК ячейка заполнена смесью со следующими физическими параметрами: $K_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\epsilon_{\perp} = 4,88$, $\epsilon_{\parallel} = 13,54$, вращательная вязкость $\gamma_1 = 0,15$ единиц СГС. При этом предполагалось, что дисперсия анизотропии показателей преломления ЖК (Δn) слабая. Во всех расчётах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. В качестве поляризаторов использовалась плёнка *NPF – F 1205 DU*. При моделировании значения остальных конструктивных параметров ЖК устройства считались равными средним технологическим величинам [11]. С целью исключения влияния значения управляющего напряжения на характеристики ЖК устройства были выбраны одинаковыми для всех граничных условий ЖК на подложках (для состояния «выключено» $U_{off} = 0$ В, а для состояния «включено» $U_{on} = 12$ В). Кроме этого, во всех случаях толщина слоя ЖК L в рабочей ячейке всегда бралась равной 3,5 мкм. Для антисимметричных граничных условий угол преднаклона в отсутствии управляющего напряжения на одной ориентирующей подложке в ячейке θ_{01} , а на противоположной – $\theta_{02} = -\theta_{01}$. Сцепление молекул ЖК в азимутальном направлении считалось жёстким, а в полярном направлении энергия сцепления выбиралась в виде потенциала Рапины [25]:

- $W = W_{01} \sin^2(\theta_1 - \theta_{01})/2$ 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 расчётах считается $W_{01} = W_{02} = W_0$. Введём безразмерный параметр жёсткости $\beta = \pi K_{11}/W_0 L$ [26], 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 значения угла преднаклона молекул ЖК с ориентирующей подложкой ($\theta_{01} = -\theta_{02}$). Как показало моделирование, пропускание ЖК модулятора в состоянии «выключено» практически не зависит значения угла θ_{01} . Это является следствием того, что все эти состояния слабо различимы при $U_{off} = 0$. По этой же причине ахроматичность изображения в этом состоянии H_{off} ЖК модулятора также не зависит от величины угла преднаклона. Значения этих характеристик для различных типов ЖК модуляторов представлены в табл. 1. Единственной интегральной оптической характеристикой ЖК модулятора на основе ЖК структур с различными углами закрутки Φ , которая зависит от угла преднаклона ЖК с ориентирующей подложкой, является среднее по спектру контрастное отношение S . На рис. 1 представлена зависимость нормированного среднего по спектру контрастного отношения S^{nor} для ЖК модулятора от значения угла преднаклона ЖК с ориентирующей подложкой с антисимметричными граничными условиями ($\theta_{01} = -\theta_{02}$). При этом

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

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

Как видно из этого рисунка, значение среднего по спектру контрастного отношения для ЖК модулятора на основе структуры с углом закрутки 180° падает с ростом значения угла преднаклона θ_{01} . В тоже время для ЖК модулятора на основе антисимметричных ячеек, в которых используется структура с углом закрутки 0° , значение среднего по спектру контрастного отношения устройства с ростом угла преднаклона молекул ЖК незначительно растёт. Это связано с тем, что при одних и тех же значениях управляющих напряжений деформация монослоя ЖК в структуре с углом закрутки 180° меньше при больших углах преднаклона молекул ЖК на подложках, а в структуре с $\Phi_t = 0^\circ$ наоборот.

Это приводит к тому, что пропускание в состоянии «включено» для ЖК структуры с $\Phi_t = 180^\circ$ при малых значениях θ_{01} меньше, чем при больших. Поэтому с увеличением величины угла θ_{01} среднее по спектру контрастное отношение изображения C падает. Для структуры с $\Phi_t = 0^\circ$ ситуация обратная. С ростом угла θ_{01} значение T_{on} из-за большей деформации монослоя ЖК падает, и, как следствие, среднее по спектру контрастное отношение изображения C растёт. Стоит отметить, что для модулятора на основе антисимметричных ЖК ячеек с углами закрутки структуры 90° и 270° среднее по спектру контрастное отношение зависит очень слабо от значений угла θ_{01} .

Рис. 1. Зависимость нормированного контрастного отношения ЖК модулятора от величины угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках при антисимметричных граничных условиях

Рис. 2. Зависимость полного времени срабатывания ЖК модулятора от величины угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках при антисимметричных граничных условиях

На рис. 2 показана зависимость полного времени срабатывания τ модулятора на основе антисимметричных ЖК ячеек с различными углами закрутки структуры от значения угла преднаклона молекул ЖК θ_{01} на подложках. Как и в предыдущем случае, для структур с углами закрутки 90° и 270° зависимость $\tau = \tau(\theta_{01})$ слабая. В то же время для модулятора с $\Phi_t = 0^\circ$ зависимость $\tau = \tau(\theta_{01})$ линейно убывающая, а для модулятора с $\Phi_t = 180^\circ$ слабо линейно возрастающая. Это объясняется также как и зависимость $C^{\text{нор}} = C^{\text{нор}}(\theta_{01})$ для этих же углов закрутки структуры ЖК. А именно, при одних и тех же значениях управляющих напряжений деформация монослоя ЖК в структуре с углом закрутки 180° меньше при больших углах преднаклона молекул ЖК на подложках, а в структуре с $\Phi_t = 0^\circ$ наоборот. Это приводит к тому, что полное время срабатывания больше для ЖК структуры с $\Phi_t = 180^\circ$ при малых значениях θ_{01} и меньше, чем при больших. Для структуры с $\Phi_t = 0^\circ$ ситуация обратная.

На рис. 3 представлена зависимость нормированного среднего по спектру контрастного отношения для модулятора на основе антисимметричной ЖК ячейки с различными углами закрутки ЖК структуры от параметра жёсткости сцепления молекул ЖК с подложками.

Для ЖК модулятора на основе ячейки с углом закрутки структуры 180° ситуация следующая. При жёстких граничных условиях высокие значения контрастного отношения для таких устройств обусловлены эффектом самокомпенсации [5]. Эффект самокомпенсации состоит в том, что в состоянии «включено» п-ячейку с углом закрутки структуры 180° можно представить в виде двух пла-

нарных ячеек, ориентированных друг относительно друга на 90° . Это позволяет компенсировать разницу фаз световых волн, прошедших через ЖК, почти до π .

Рис. 3. Зависимость нормированного контрастного отношения ЖК модулятора от параметра жёсткости молекул ЖК на ориентирующих поверхностях при антисимметричных граничных условиях

Рис. 4. Зависимость полного времени срабатывания ЖК модулятора от параметра жёсткости молекул ЖК на ориентирующих поверхностях при антисимметричных граничных условиях

Для мягких граничных условий с уменьшением энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими подложками в состоянии «включено» нарушается эффект фазовой самокомпенсации.

Это приводит к тому, что с ростом β , растёт и T_{on} , а так как T_{off} от β не зависит, то контрастное отношение падает. Для модулятора на основе ЖК ячейки с нулевым углом закрутки ситуация иная. Так, при уменьшении энергии сцепления деформация ЖК становится более сильной и в предельном случае стремится к гомеотропной, что приводит к уменьшению T_{on} с ростом β , поэтому контрастное отношение возрастает. Для модуляторов на основе ЖК структуры с $\Phi_t = 90^\circ$ контрастное отношение практически не зависит от параметра жёсткости, в то время как для ячеек со структурой закрученной на 270° ситуация аналогичная со 180° -градусной ячейкой. Это объясняется тем, что для этой структуры, работающей в волноводном режиме, этот режим сохраняется для более высоких уровней деформации ЖК, так как мягкие граничные условия в полярном направлении не позволяют существенным образом развернуть закрученную структуру.

На рис. 4 представлены зависимости $\tau = \tau(\beta)$ для модуляторов на основе антисимметричных ЖК ячеек с различными углами закрутки, которые наиболее востребованы в быстродействующих устройствах. Как видно из этого рисунка, зависимости хорошо описываются линейными функциями при изменении параметра жёсткости в пределах от 0 до 0,2. Этот факт хорошо согласуется с аналитической зависимостью $\tau = \tau(\beta)$, полученной ранее [26]. Для всех 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 [26]. Стоит отметить, что резкий рост полного времени срабатывания ЖК модулятора при изменении параметра жёсткости β происходит только за счёт увеличения времени релаксации τ_{relax} , в то время как τ_{reac} практически не изменяется. Резкий рост τ_{relax} при увеличении параметра жёсткости 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

Методом компьютерного моделирования проведено исследование зависимости характеристик модуляторов на основе тонких антисимметричных ячеек с различными углами закрутки структуры ЖК в зависимости от граничных условий на ориентирующих подложках. В результате выполненных численных экспериментов установлено, что:

- 1) увеличение угла преднаклона (от 2° до 14°) молекул ЖК на ориентирующих подложках ячейки модулятора приводит к ухудшению оптических характеристик и одновременному уменьшению полного времени срабатывания устройств, работающих на основе планарных антисимметричных ЖК ячеек. Для модулято-

ров, выполненных на основе тонких антисимметричных ячеек с углами закрутки структуры 90° , 180° и 270° , увеличение угла преднаклона (от 2° до 14°) молекул ЖК на ориентирующих подложках не оказывает существенного влияния на оптические и динамические характеристики устройства;

2) уменьшение энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующими поверхностями в модуляторах на основе тонких антисимметричных ячеек с различными углами закрутки структуры ЖК не способствует одновременному улучшению оптических и динамических характеристик таких устройств.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 19-07-01005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В. В., Островский Б. И., Пикина Е. С. 14-я Европейская конференция по жидким кристаллам (ECLC-2017), 25–30 июня 2017, Москва // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2018. Т. 18. № 1. С. 84–94.
2. Display Search: 3D Display Technology and Market Forecast Report, January 2010 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/48202518/3d-display-technology-and-market-forecast-report-displaysearch> (дата обращения: 20.05.2019)
3. Bos P. J., Koehler/Beran K. R. The π -cell: A fast liquid-crystal optical-switching device // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1984. Vol. 113. P. 329–339.
4. Симоненко Г. В. Жидкокристаллический модулятор на основе твист-ячейки с антисимметричными граничными условиями. Заявка на полезную модель № 2019106704. Приор. от 11.03.2019 [Электронный ресурс]. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU191765U1_20190821.pdf (дата обращения: 20.05.2019).
5. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Выбор оптимальной конструкции оптического затвора на π -ячейке // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 9. С. 18–22.
6. Lipton L., Tilton M. Fast switching 270° twist nematic liquid crystal device and eyewear incorporating the device. Patent US 5327269, 1994 [Электронный ресурс]. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/41/56/d10f69283db7b5/US5327269.pdf> (дата обращения: 20.05.2019).
7. Студенцов С. А., Брежнев В. А., Ежов М. А. Артефакты в быстродействующих ЖК-затворах на STN эффекте для активных 3D очков и их устранение коррекцией режима управления // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика–математика. 2015. № 2. С. 132–137.
8. LCD-design: universal system for computer simulation and optimization of electrooptical devices on the base of liquid crystal / Yakovlev D. A., Simonenko G. V., Tsoy V. I., Chigrinov V. G., Khokhlov N. A., Pdyachev Yu. B. // *Proceedings of SPIE*. Vol. 4705. Saratov Fall Meeting 2001: Coherent Optics of Ordered and Random Media II (Saratov, 2–5 October, 2011) / ed. D. A. Zimnyakov. SPIE, 2011. P. 255–263.

9. Проектирование ЖК – устройств отображения информации / Финкель А. Г., Цой В. И., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А. // Электронная промышленность. 2000. №2. С. 11–16.
10. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE-LCD software / Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Podjachev Yu. B. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2000. Vol. 351. P. 17–25.
11. Experimental and theoretical study of optical characteristics of LC shutter on π -cells / Sevostianov V. P., Simonenko G. V., Brezhnev V. A., Studentsov S. A., Yakovlev D. A. // *Photonics and Optoelectronics*. 1997. Vol. 4. No. 4. P. 139–146.
12. Симоненко Г. В. Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81. № 10. С. 50–55.
13. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. Photoalignment of liquid crystalline materials: Physics and applications. Great Britain: John Wiley & Sons, 2008. 248 p.
14. One Methylene Group in the Side Chain Can Alter by 90 Degrees the Orientation of a Main-Chain Liquid Crystal on a Unidirectional Substrate / Odarchenko Ya., Defaux M., Rosenthal M., Akhkiamova A., Bovsunovskaya P., Melnikov A., Rodygin A., Rychkov A., Gerasimov K., Anokhin D. V., Zhu X., Ivanov D. I. // *ACS Macro Letters*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. P. 453–458.
15. Dadivanyan A. K., Noah O. V., Pashinina Yu. M. Anchoring Energy of Liquid Crystals // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2012. Vol. 560. P. 108–114.
16. Влияние параметра порядка на энергию сцепления жидких кристаллов / Дадиванян А. К., Чаусов Д. Н., Ноа О. В., Беляев В. В., Чигринов В. Г., Пашинина Ю. М. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2012. Т. 142. № 6. С. 1253–1257.
17. Сухариер А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь, 1991. 256 с.
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. Leipzig: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010. 210 с.
20. Симоненко Г. В. Влияние углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках на характеристики ЖК модулятора на основе π -ячеек // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2018. Т. 18. № 3. С. 26–36.
21. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Ахроматичность ЖК-модулятора для 3D приложений // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2015. Т. 15. № 3. С. 82–90.
22. Симоненко Г. В. Оптические характеристики жидкокристаллических модуляторов на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных планарных структурах малой толщины // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. № 1. С. 3–11.
23. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники. М.: МГУП, 2002. 278 с.
24. 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 // *Оптический журнал*. 2003. Т. 70. № 7. С. 42–45.
25. Rapini A., Papoula M. J. Distorsion d'une lamelle nйmatique sous champ magnйtique conditions d'ancrage aux parois // *Journal de Physique Colloques*. 1969. Vol. 30. No. C4. P. 11–12.

26. Tsoy V. I. Fredericisz Transition Dynamics in a Nematic Layer with a Surface Viscosity // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1995. Vol. 264. P. 51–56.

REFERENCES

1. Belyaev V. V., Ostrovskii B. I., Pikina E. S. [The 14th European Conference on Liquid Crystals (ECLC-2017), June 25–30, 2017, Moscow]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 84–94.
2. Display Search: 3D Display Technology and Market Forecast Report, January 2010. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/48202518/3d-display-technology-and-market-forecast-report-displaysearch> (accessed: 20.05.2019).
3. Bos P. J., Koehler/Beran K. R. The π -cell: A fast liquid-crystal optical-switching device. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1984, vol. 113, pp. 329–339.
4. Simonenko G. V. *Zhidkokristallicheskiy modulyator na osnove tvist-yacheiki s antisimmetrichnymi granichnymi usloviyami. Zayavka na poleznuyu model' №2019106704. Prior. ot 11.03.2019* [Liquid crystal modulator based on twist-cell with antisymmetric boundary conditions. The application for useful model №2019106704. Priority from 11.03.2019]. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU191765U1_20190821.pdf (accessed: 20.05.2019).
5. Simonenko G. V., Studentsov S. A., Ezhov V. A. [Choosing the optimum design for an optical shutter based on a π -cell]. In: *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 9, pp. 18–22.
6. Lipton L., Tilton M. Fast switching 270° twist nematic liquid crystal device and eyewear incorporating the device. Patent US 5327269, 1994. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/41/56/d10f69283db7b5/US5327269.pdf> (accessed: 20.05.2019).
7. Studentsov S. A., Brezhnev V. A., Ezhov M. A. [Artifacts in fast-switching, supertwisted neumatic liquid-crystal shutters for active 3D-glasses and their elimination by driving mode]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2015, no. 2, pp. 132–137.
8. 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. In: *Proceedings of SPIE. Vol. 4705. Saratov Fall Meeting 2001: Coherent Optics of Ordered and Random Media II (Saratov, 2–5 October, 2011)*. SPIE, 2011. pp. 255–263.
9. Finkel' A. G., Tsoi V. I., Simonenko G. V., Yakovlev D. A. [Design of LCD display devices]. In: *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry, 2000, no. 2, pp. 11–16.
10. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Podjachev Yu. B. The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE-LCD software. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2000, vol. 351, pp. 17–25.
11. 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. In: *Photonics and Optoelectronics*, 1997, vol. 4, no. 4, pp. 139–146.
12. Simonenko G. V. [Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs]. In: *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2014, vol. 81, no. 10, pp. 50–55.
13. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. Photoalignment of liquid crystalline materials: Physics and applications. Great Britain: John Wiley & Sons, 2008. 248 p.
14. Odarchenko Ya., Defaux M., Rosenthal M., Akhkiamova A., Bovsunovskaya P., Melnikov A., Rodygin A., Rychkov A., Gerasimov K., Anokhin D. V., Zhu X., Ivanov D. I. One Methylene

- Group in the Side Chain Can Alter by 90 Degrees the Orientation of a Main-Chain Liquid Crystal on a Unidirectional Substrate. In: *ACS Macro Letters*, 2018, vol. 7, iss. 4, pp. 453–458.
15. Dadivanyan A. K., Noah O. V., Pashinina Yu. M. Anchoring Energy of Liquid Crystals In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, vol. 560, pp. 108–114.
16. Dadivanyan A. K., Chaurov D. N., Noah O. V., Belyaev V. V., Chigrinov V. G., Pashinina Yu. M. [Influence of the order parameter on the anchoring energy of liquid crystals]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2012, vol. 142, no. 6, pp. 1253–1257.
17. Sukhariev A. S. *Zhidkokristallicheskie indikatorы* [Liquid crystal displays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 256 p.
18. Chigrinov V. G. *Liquid crystal devices: Physics and applications*. Boston-London: Artech House, 1999. 359 p.
19. Simonenko G., Tuchin V., Zimnyakov D. *Opticheskie kharakteristiki zhidkokristallicheskikh i biologicheskikh sred* [Optical characteristics of liquid crystalline and biological environments]. Leipzig, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG. Publ, 2010. 210 p.
20. Simonenko G. V. [Influence of pretilt angles of liquid crystalline molecules placed onto orienting substrates on characteristics of liquid crystalline modulators based on π -cells]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 26–36.
21. Simonenko G. V., Studentsov S. A., Ezhov V. A. [Achromaticity of the LC modulator for 3D applications]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 82–90.
22. Simonenko G. V. [Optical characteristics of liquid-crystal modulators based on electric-field-controlled birefringence in various low-thickness planar structures]. In: *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2018, vol. 85, no. 1, pp. 3–11.
23. Shashlov A. B., Uvarova R. M., Churkin A. V. *Osnovy svetotekhniki* [The basics of lighting technology]. Moscow, Moscow State University of Printing Arts Publ., 2002. 278 p.
24. Simonenko G. V., Brezhnev V. A., Studentsov S. A. [Computer simulation of the optical response of a liquid crystal display at high control voltages. Part 1. Dynamics of the optical response depending on the design parameters of the display]. In: *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2003, vol. 70, no. 7, pp. 42–45.
25. Rapini A., Papoula M. J. Distorsion d'une lamelle nématique sous champ magnétique conditions d'ancrage aux parois. In: *Journal de Physique Colloques*, 1969, vol. 30, no. C4, pp. 11–12.
26. Tsou V. I. Fredericksz Transition Dynamics in a Nematic Layer with a Surface Viscosity. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1995, vol. 264, pp. 51–56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Симоненко Георгий Валентинович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского;
e-mail: gvsim1960@hotmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Georgy V. Simonenko – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Optics and Biophotonics, N. G. Chernyshevsky Saratov State University;
e-mail: gvsim1960@hotmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Симоненко Г. В. Компьютерный анализ характеристик тонких ЖК ячеек с антисимметричными углами преднаклона на ориентирующих поверхностях при различных энергиях сцепления молекул ЖК на границах // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика–математика. 2019. № 3. С. 28–41.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-28-41

FOR CITATION

Simonenko G. V. Computer analysis of the characteristics of thin LC cells with antisymmetric angles of the principle on the orienting surfaces at different energy of clutters molecules of the LC on borders. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*. 2019, no. 3, pp. 28–41.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-28-41