

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-38-52

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЖК МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО ЭФФЕКТА В СВЕРХЗАКРУЧЕННОЙ СТРУКТУРЕ НЕМАТИКА

Симоненко Г. В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

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

Аннотация.

Цель исследования – поиск конструкции ЖК модулятора света на основе нематика с минимальным временем срабатывания.

Процедура и методы. Методом исследования является компьютерное моделирование интегральных характеристик различных конструкций ЖК модулятора. Процедура исследования включала в себя сравнение интегральных характеристик различных конструкций модулятора.

Результаты. Обнаружена линейная регрессия в зависимости полного времени срабатывания ЖК модулятора от угла закрутки структуры нематика. Также показано, что оптимальными интегральными характеристиками обладает ЖК модулятор, выполненный на основе ЖК структуры с углом закрутки 270° при антисимметричных граничных условиях с малыми значениями углов преднаклона на ориентирующих подложках, работающий в волноводной моде и использующий фазовый пленочный компенсатор.

Теоретическая значимость работы заключается в обнаружении линейной регрессии в зависимости полного времени срабатывания ЖК модулятора от угла закрутки структуры нематика. **Практическая значимость** работы состоит в том, что найдена оптимальная конструкция ЖК модулятора, которая одновременно имеет малое полное время срабатывания (менее 4 мс) и приемлемый уровень контрастного отношения (не менее 300:1).

Ключевые слова: жидкий кристалл, моделирование, интегральные характеристики, технологические параметры

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

FAST LC MODULATOR BASED ON THE WAVEGUIDE EFFECT IN A SUPER-SWING NEMATIC STRUCTURE

G. Simonenko

Saratov State University

83 ulitsa Astrakhanskaya, Saratov 410012, Russian Federation

Abstract.

Aim. The aim of this article is to search for the design of an LC light modulator based on a nematic with minimal response time.

Methodology. The research method is computer simulation of the integral characteristics of various designs of the LC modulator. The research procedure included a comparison of the integral characteristics of various modulator designs.

Results. As a result of the studies, a linear regression was found depending on the total response time of the LC modulator on the twist angle of the nematic structure. It has also been shown that an LC modulator made on the basis of an LC structure with a swivel angle of 270° under antisymmetric boundary conditions with small pre-tilt angles on orienting substrates, operating in the waveguide mode and using a phase film compensator, has optimal integral characteristics.

Research implications is to detect linear regression as a function of the total response time of the LC modulator on the twist angle of the nematic structure. The practical significance of the work lies in the fact that the optimal design of the LCD modulator was found, which simultaneously has a small total response time (less than 4 milliseconds) and an acceptable level of contrast ratio (at least 300: 1).

Keywords: liquid crystal, modeling, integrated characteristics, technological parameters

Acknowledgments: This research was supported by an RFBR grant No. 19-07-01005.

Введение

В настоящее время жидкие кристаллы (ЖК) нашли своё применение в различных областях науки и техники: от систем управления с помощью оптических элементов [1] до систем обработки и отображения информации [2; 3]. Наиболее известными устройствами на основе ЖК являются всевозможные типы модуляторов светового потока: индикаторные системы [2; 3], дисплеи [2; 3]¹, затворы [4–7]². В связи с быстрым развитием 3D-систем для визуализации и систем управления оптическим потоком с помощью ЖК модуляторов [2–6]³ актуальной задачей является улучшение оптических и динамических характеристик [8]. В наиболее распространённых ЖК устройствах в качестве ЖК вещества используются нематике, основным недостатком которых является большое время срабатывания (не менее 4 мс [2; 3; 8]). В таких устройствах, как правило, используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления:

¹ Также см.: Патент № 2490818 С1 Российская Федерация, МПК H04N 13/04 (2006.01), G02B 27/26 (2006.01). Автостереоскопический дисплей с полноэкранным 3d-разрешением (варианты) и способ управления активным параллаксным барьером дисплея : заявл. 28.02.2012 : опубл. 20.08.2013 / Ежов В. А. – 38 с. : ил.

² Также см.: Патент № 2488150 С1 Российская Федерация, МПК G02C 7/00 (2006.01), G02B 27/22 (2006.01). Мультистандартные жидкокристаллические стереочки : заявл. 30.12.2011 : опубл. 20.07.2013 / Студенцов С. А., Ежов В. А. – 23 с. : ил.

³ Также см.: Патент № 2490818 С1 Российская Федерация, МПК H04N 13/04 (2006.01), G02B 27/26 (2006.01). Автостереоскопический дисплей с полноэкранным 3d-разрешением (варианты) и способ управления активным параллаксным барьером дисплея : заявл. 28.02.2012 : опубл. 20.08.2013 / Ежов В. А. – 38 с. : ил.; Патент № 2488150 С1 Российская Федерация, МПК G02C 7/00 (2006.01), G02B 27/22 (2006.01). Мультистандартные жидкокристаллические стереочки : заявл. 30.12.2011 : опубл. 20.07.2013 / Студенцов С. А., Ежов В. А. – 23 с. : ил.

ЖК модулятор на основе π -ячеек [7; 9]¹, твист-ячеек [10], супертвист-ячеек². На сегодня известны конструкции ЖК модуляторов, которые имеют меньшие времена срабатывания [11–14], однако они не получили широкого распространения. На данный момент существует ясное понимание связи между физико-техническими параметрами такого устройства и его характеристиками [15], однако вопрос об оптимальной конструкции ЖК модулятора на основе нематика остаётся открытым. В частности, необходимо выяснить, при каких граничных условиях в ЖК ячейке модулятор имеет оптимальный набор характеристик: максимальное пропускание в состоянии «открыто»; максимальное контрастное отношение между состояниями «открыто» и «закрыто»; минимальная ахроматичность устройства в состоянии «открыто»; минимальное время срабатывания устройства. К параметрам, которые однозначно определяют граничные условия, относятся угол закрутки структуры ЖК и углы преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках [16–19]. Поэтому нами выполнено компьютерное моделирование характеристик ЖК модулятора для 3D-приложений в зависимости от его конструктивных параметров: угла закрутки структуры ЖК в ячейке и углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ячейки. Статья состоит из нескольких разделов, в которых даётся краткое описание характеристик ЖК устройства и метода их моделирования и приведены результаты компьютерного моделирования оптических и динамических (временных) характеристик модуляторов.

Интегральные характеристики жк модулятора и их моделирование

С конца 90-х годов XX в. для поиска оптимальной конструкции ЖК устройства используется метод компьютерного моделирования [16; 17]. Поэтому для этой цели мы применяли пакет программ *MOUSE-LCD* [20], который позволяет производить моделирование характеристик различных ЖК устройств с точностью в пределах 10% [19; 20], что обычно не превышает погрешность эксперимента. В этом случае погрешность моделирования определяется в основном точностью задания физических и конструктивных параметров модулятора.

При моделировании ЖК модулятора нами использовался стандартный набор его четырёх характеристик [15; 21]:

¹ См. также: Патент № 2488150 С1 Российская Федерация, МПК G02С 7/00 (2006.01), G02В 27/22 (2006.01). Мультистандартные жидкокристаллические стереоочки : заявл. 30.12.2011 : опубл. 20.07.2013 / Студенцов С. А., Ежов В. А. – 23 с. : ил.; Патент № 2393517 С2 Российская Федерация, МПК G02F 1/00 (2006.01). Пассивно-матричный жидкокристаллический дисплей и способ его управления : заявл. 30.06.2008 : опубл. 27.06.2010 / Студенцов С. А., Брежнев В. А., Жуков Н. Д., Горфинкель Б. И. – 28 с. : ил.

² См.: Patent US 5327269. Fast switching 270o twist nematic liquid crystal device and eyewear incorporating the device. 05.07.1994 / Lipton L., Tilton M. [Электронный ресурс]. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/41/56/d10f69283db7b5/US5327269.pdf> (дата обращения: 20.01.2020); Патент № 2449333 С1 Российская Федерация. МПК G02F 1/13 (2006.01). Жидкокристаллический затвор : заявл. 11.02.2010 : опубл. 27.04.2012 / Студенцов С. А., Брежнев В. А., Горфинкель Б. И. – 16 с. : ил.

- максимальное среднее по спектру пропускание ЖК модулятора в состоянии «выключено» T_{off} ;
- среднее по спектру контрастное отношение устройства C ;
- ахроматичность устройства H_{off} в состоянии «выключено» совместно с условием условия $H_{off} \leq 0,05$;
- полное время срабатывания ЖК устройства τ :

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

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

Часто в состоянии «выключено» ЖК устройство имеет максимальное пропускание, поэтому это состояние называют ещё состоянием «открыто». В этом случае в состоянии «включено» устройство имеет минимальное пропускание и соответственно называется состоянием «закрыто».

Результаты компьютерного моделирования

Основными технологическими параметрами, существенным образом влияющими на характеристики ЖК устройства, являются граничные условия в рабочей ЖК ячейке [16; 17]. Поэтому мы исследовали характеристики ЖК устройств, выполненных на базе тонких ЖК ячеек с симметричными и антисимметричными граничными условиями и различными углами закрутки структуры Φ_T , а 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. Анизотропия показателей преломления ЖК $\Delta n = 0,2$ (на длине волны 550 нм), её дисперсия – слабая. Во всех расчётах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. В качестве поляризаторов использовалась плёнка *NPF – F 1205 DU*. Технологические параметры (толщины и показатели преломления) стеклянных подложек, электродных и ориентирующих слоёв были взяты из работы [22]. Чтобы исключить влияние величины управляющего напряжения на характеристики модулятора, во всех случаях считалось, что для состояния «выключено» $U_{off} \leq U_{Fred}$ (U_{Fred} – пороговое напряжение перехода Фредерикса), а для состояния «включено» $U_{on} = 12$ В. Для исключения влияния на характеристики ЖК модулятора толщины ЖК слоя, она для всех расчётов бралась равной 3,5 мкм. Для антисимметричных граничных условий угол преднаклона в отсутствие управляющего напряжения на одной ориентирующей подложке в ячейке θ_{01} , а на противоположной – $\theta_{02} = -\theta_{01}$. При симметричных граничных условиях значения углов преднаклона на обеих ориентирующих поверхностях были одинаковы ($\theta_{02} = \theta_{01}$).

В первую очередь заметим, что полное время срабатывания ЖК устройства не может быть меньше, чем постоянная времени η , связанная с ориентационными эффектами [23]:

$$\eta = \frac{\mu d^2}{\pi^2 K},$$

где μ – средняя вязкость ЖК, K – средний коэффициент упругости ЖК.

Поэтому время срабатывания ЖК модулятора в наших условиях не может быть меньше 100 мкс, и это является принципиальным ограничением быстродействия данных ЖК устройств. Однако в настоящем минимальное время срабатывания ЖК модуляторов на основе нематиков составляет единицы миллисекунд [3; 8], и, следовательно, существует принципиальная возможность уменьшить время срабатывания ЖК модулятора путём выбора его оптимальной конструкции.

Известно [15–17], что из всех конструктивных параметров ЖК модулятора (кроме толщины ЖК слоя d) максимальное влияние на его оптические и динамические характеристики оказывает угол закрутки ЖК структуры в ячейке. На основе ЖК структур с различными углами закрутки существует большое количество устройств отображения и обработки информации, которые для своей работы используют волноводный или интерференционный режим [16; 17]. Однако, для исследования динамики перехода Фредерикса из одного состояния в другое обычно используют эффект интерференции поляризованных лучей (интерференционный режим) в ЖК структуре, так как в этом случае изменение оптического отклика точно следует за деформационным искажением директора ЖК без временных задержек. Поэтому для исследования влияния угла закрутки структуры ЖК на полное время срабатывания ЖК модулятора мы приняли, что угол ориентации входного поляризатора (α_{in}) составлял 45° к направлению ориентации молекул ЖК на первой подложке, а угол ориентации выходного поляризатора (α_{out}) равнялся -45° к тому же направлению.

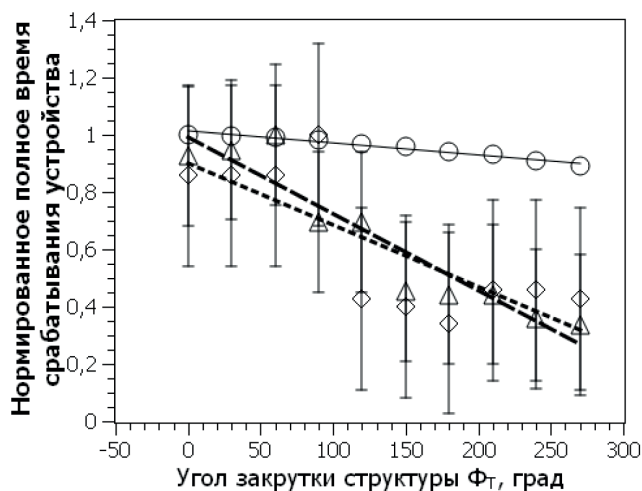


Рис. 1. / Fig. 1. Зависимость времени срабатывания ЖК модулятора от угла закрутки структуры для симметричных (\diamond , \circ) и антисимметричных (Δ) граничных условий. /

Dependence of the response time of the LC modulator on the twist angle of the structure for symmetric (\diamond , \circ) and antisymmetric (Δ) boundary conditions.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

На рис. 1 показаны зависимости нормированного полного времени срабатывания ЖК модулятора от угла закрутки структуры ЖК. Нормировка полного

времени срабатывания ЖК модулятора была произведена на время полного срабатывания τ^{\max} при $\Phi_T = 0^\circ$, причём для симметричных граничных условий $\tau^{\max} = 22$ мс, а для антисимметричных граничных условий $\tau^{\max} = 15$ мс.

Как видно из рис. 1 с ростом Φ_T τ падает, причём зависимость $\tau = \tau(\Phi_T)$ с погрешностью не более чем 13% является линейной, как для симметричных граничных условий, так и для антисимметричных граничных условий. Скорость изменения функции $\tau(\Phi_T)$ для антисимметричных граничных условий выше, чем для симметричных граничных условий. Для того, чтобы объяснить поведение функции $\tau = \tau(\Phi_T)$, используем известные зависимости времён реакции и релаксации от управляющего напряжения [15; 16]:

$$\tau_{\text{reac}} \approx \frac{\Omega}{U_{\text{on}}^2 - U_{\text{off}}^2}, \quad \tau_{\text{relax}} \approx \sigma(U_{\text{on}} - U_{\text{off}})^\alpha, \quad (1)$$

где величины параметров σ , α и Ω определяются значениями физических постоянных ЖК вещества, используемого в модуляторе.

Учитывая то, что в нашем случае $U_{\text{off}} = U_{\text{Fred}}$ и

$$U_{\text{Fred}} = 2\pi \sqrt{\frac{\pi k_{11}}{\epsilon_{//}} \left(1 + \left(\frac{\Phi_T}{\pi} \right)^2 \left(\frac{k_{33}}{k_{11}} - \frac{2k_{22}}{k_{11}} \left(1 - \frac{2\pi d}{p_0 \Phi_T} \right) \right) \right) \frac{\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}}{\epsilon_{//}}}, \quad (2)$$

а также, что $U_{\text{on}} \gg U_{\text{off}}$ путём несложных преобразований получим выражение для $\tau = \tau(\Phi_T)$ в следующем виде:

$$\tau = \Gamma_1 \left(1 + \frac{\Gamma_2 \left(1 + \left(\frac{\Phi_T}{\pi} \right)^2 \Gamma_3 \right)}{U_{\text{on}}^2} \right) + \Gamma_4 \left(1 - \Gamma_5 \frac{\left(\frac{\Phi_T}{\pi} \right)}{U_{\text{on}}} \right), \quad (3)$$

где коэффициенты $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ – являются комбинацией физических параметров ЖК вещества, используемого в модуляторе.

На рис. 1 зависимость $\tau = \tau(\Phi_T)$, полученная с помощью выражения (3), отмечена кружками. Из рисунка видно, что функция $\tau = \tau(\Phi_T)$ имеет линейный характер, однако скорость её изменения существенно ниже, чем у аналогичных линейных функций, полученных без допущений прямым численным методом. Линейный характер функции $\tau = \tau(\Phi_T)$ связан с тем, что управляющее напряжение U_{on} имеет высокое значение, и поэтому первое слагаемое в формуле (3) практически не зависит от Φ_T и вся зависимость τ от Φ_T скрыта во втором слагаемом, которое линейно зависит от величины угла закрутки структуры ЖК. Различие в скоростях изменения $\tau = \tau(\Phi_T)$ можно объяснить тем, что выражение (3) получено с помощью большого числа допущений и для случая нулевого угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях ЖК ячейки. Тем не менее, это выражение объясняет линейный характер зависимости $\tau = \tau(\Phi_T)$. Следовательно, можно сделать вывод, что для получения малых

значений полного времени срабатывания ЖК модулятора при высоких управляющих напряжениях необходимо использовать структуры с углом закрутки $\Phi_T = 270^\circ$.

Основываясь на предыдущем выводе, остановимся на рассмотрении различных конструкций ЖК модуляторов на основе структуры ЖК с углом закрутки 270° . Таких конструкций может быть восемь, которые различаются по типу граничных условий, оптической моде, используемой для реализации модуляции излучения, и наличию фазового компенсатора. Как отмечено выше, тип граничных условий делится на симметричные граничные условия и антисимметричные граничные условия. Для любого типа граничных условий оптическая мода, которая используется для получения модуляции излучения, делится на волноводную и интерференционную. В интерференционной моде используется эффект интерференции поляризованных лучей в рабочей ЖК ячейке, поэтому входной поляризатор ориентирован под 45° к направлению натирания на первой подложке ячейки ($\alpha_{in} = 45^\circ$), а выходной поляризатор – под -45° к тому же направлению ($\alpha_{out} = -45^\circ$) [16; 17]. В волноводной моде используется эффект поворота плоскости поляризации света, распространяющегося через ЖК ячейку, отслеживающего поворот молекул ЖК в закрученной структуре ровно на угол закрутки. В этом случае входной поляризатор ориентирован под углом 0° к направлению натирания на первой подложке ячейки ($\alpha_{in} = 0^\circ$), а выходной поляризатор – под 90° к тому же направлению ($\alpha_{out} = 90^\circ$). Кроме этого для реализации волноводного режима для ЖК ячейки необходимо выполнение условия $\Delta n \cdot d \geq \lambda$ (λ – длина волны видимого диапазона) [16; 17]. Для улучшения оптических характеристик любого типа модулятора применяется фазовый компенсатор. Он представляет из себя анизотропную полимерную, как правило, одноосную плёнку [18]. В табл. 1 приведены основные интегральные характеристики различных ЖК модуляторов, работающих на основе ЖК структуры с $\Phi_T = 270^\circ$. Как видно из этой таблицы, наилучшие интегральные характеристики имеют ЖК модуляторы на основе волноводной моды в ячейках с симметричными и антисимметричными граничными условиями с фазовым компенсатором. При этом для достижения оптимальных характеристик ЖК модулятора необходимо использовать одноосный фазовый компенсатор со следующими параметрами: угол ориентации оптической оси фазового компенсатора относительно направления натирания на первой подложке ЖК ячейки равен 28° , оптическая разность хода фазового компенсатора составляет $0,0345$ мкм. Заметим, что модуляторы с симметричными граничными условиями имеют 10%-ый выигрыш по контрастному отношению, но в 2,5 раза проигрывают модуляторам с антисимметричными граничными условиями по величине полного времени срабатывания. Исходя из этого можно считать, что ЖК модулятор на основе волноводной моды в ячейках с антисимметричными граничными условиями и с фазовым компенсатором имеет оптимальный набор интегральных характеристик, а именно: максимально возможные значения T_{off} и C , и минимально возможные значения τ и H_{off} .

Таблица 1 / Table 1

Характеристики ЖК модулятора на основе структуры с углом закрутки 270° при симметричных и антисимметричных граничных условиях / Characteristics of an LC modulator based on a structure with a twist angle of 270° under symmetric and antisymmetric boundary conditions

	$\alpha_{in} = 0^\circ, \alpha_{out} = 90^\circ$ без фазового компенсатора		$\alpha_{in} = 0^\circ, \alpha_{out} = 90^\circ$ с фазовым компенсатором		$\alpha_{in} = 45^\circ, \alpha_{out} = -45^\circ$ без фазового компенсатора		$\alpha_{in} = 45^\circ, \alpha_{out} = -45^\circ$ с фазовым компенсатором	
	$\theta_{02} = \theta_{01}$	$\theta_{02} = -\theta_{01}$	$\theta_{02} = \theta_{01}$	$\theta_{02} = -\theta_{01}$	$\theta_{02} = \theta_{01}$	$\theta_{02} = -\theta_{01}$	$\theta_{02} = \theta_{01}$	$\theta_{02} = -\theta_{01}$
T_{off}	0,387	0,387	0,386	0,38	0,385	0,385	–	0,385
C	355	29	427	384	423	287	–	292
τ	9	5,25	9	3,75	9	4,5	–	4,75
H_{off}	0,0324	0,0324	0,033	0,032	0,057	0,057	–	0,056

Источник: по данным автора.

Рассмотрим влияние технологических параметров на интегральные характеристики граничных условий ЖК модулятора на основе волноводной моды в ячейках с антисимметричными граничными условиями и с фазовым компенсатором. К технологическим параметрам относятся граничные условия: величина угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях, величина энергии сцепления молекул ЖК с ориентирующей поверхностью, величина отношения d/p_0 (p_0 – шаг хиральной добавки) ЖК смеси. Остановимся на изучении зависимости интегральных характеристик ЖК модулятора от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках ($\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{01} = -\theta_{02}$) и величины d/p_0 .

Заметим, что в состоянии «выключено» для всех углов преднаклона молекул ЖК в ячейке для нарушения волноводного режима требуется сильная деформация слоя ЖК [16], а этого на самом деле не происходит. Поэтому среднее по спектру пропускание устройства T_{off} и его ахроматичность H_{off} в состоянии «выключено» не зависят от углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях в пределах их изменения от 2° до 14°. Зависимости среднего по спектру контрастного отношения и полного срабатывания времени от величин углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках представлены на рис. 2. На рис. 2а показана зависимость нормированного среднего по спектру контрастного отношения C^{nor} от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках θ_{01} ($\theta_{02} = -\theta_{01}$). Нормировка среднего по спектру контрастного отношения была произведена на максимальное значение $C^{max} = 384$, то есть $C^{nor} = C/C^{max}$ (C – текущее значение среднего по спектру контрастного отношения). Из этого рисунка видно, что с ростом θ_{01} C^{nor} падает. Отметим, что зависимость $C^{nor} = C^{nor}(\theta_{01})$ с погрешностью не более чем 15% носит линейный характер.

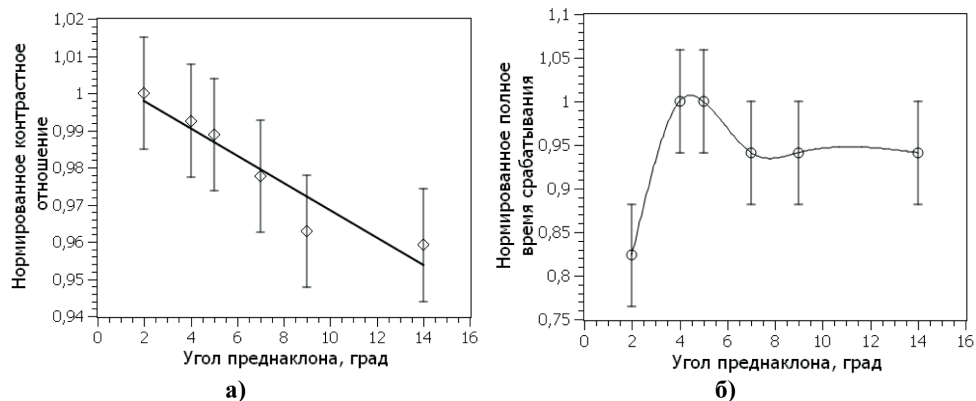


Рис. 2. / Fig. 2. Интегральные характеристики ЖК модулятора в зависимости от угла преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках: а – нормированное контрастное отношение; б – нормированное полное время срабатывания. / Integral characteristics of the LC modulator as a function of the pre-tilt angle of the LC molecules on orienting substrates: а – normalized contrast ratio; б – normalized total response time.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Уменьшение контрастного отношения не превышает 5% при изменении угла преднаклона на ориентирующих подложках от 2° до 14° . Следовательно, можно сказать о слабом влиянии этого технологического параметра на контрастное отношение. На рис. 2б показана зависимость нормированного полного времени срабатывания ЖК модулятора $\tau^{\text{нор}}$ от технологического параметра θ_{01} ($\theta_{02} = -2^\circ$). Нормировка полного времени срабатывания производилась на максимальное значение $\tau^{\text{max}} = 4.25$ мс, то есть $\tau^{\text{нор}} = \tau/\tau^{\text{max}}$ (τ – текущее полное время срабатывания ЖК модулятора). Зависимость $\tau^{\text{нор}} = \tau^{\text{нор}}(\theta_{01})$ имеет характер кривой с максимумом, положение которого определяется физическими параметрами ЖК смеси в ячейке. Минимальное значение полного времени срабатывания достигается при $\theta_{01} = 2$ ($\theta_{02} = -2^\circ$), а максимальное изменение $\tau^{\text{нор}}$ не превышает 20% при вариации θ_{01} от 2° до 14° . Таким образом, можно сделать вывод о том, что с точки зрения интегральных характеристик ЖК модулятора оптимальным значением технологического параметра θ_{01} является 2° , что обеспечивается стандартной технологией ориентации нематического ЖК, известной с середины 1970-х гг. [16].

Результаты нашего моделирования показали, что технологический параметр d/p_0 не оказывает влияния на величины T_{off} и H_{off} . Это объясняется так же, как и для случая зависимости этих характеристик от углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках. Стоит отметить, что изменения этого параметра должны происходить в пределах одной зоны Гранжана, то есть $0.5 \leq d/p_0 \leq 1$. При этом во избежание появления нежелательных диэлектрических доменов следует использовать только левую часть зоны Гранжана ($0.5 \leq d/p_0 \leq 0.75$) [16]. Узкий диапазон изменения параметра d/p_0 приводит к тому, что значение полного

времени срабатывания ЖК модулятора не зависит от него, а на его контрастное отношение этот параметр влияет только в пределах 5% (рис. 3).

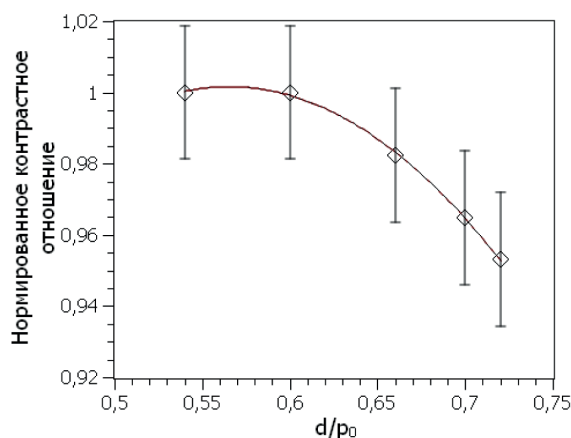


Рис. 3. / Fig. 3. Зависимость нормированного среднего по спектру контрастного отношения от параметра d/p_0 . / Dependence of the normalized mean over the spectrum of the contrast ratio on the parameter d/p_0 .

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Заключение

В данной работе выполнен компьютерный анализ интегральных характеристик различных конструкций ЖК модулятора и приведено сравнение их интегральных характеристик. В результате анализа интегральных характеристик ЖК модулятора показано, что полное время срабатывания ЖК модулятора является линейной регрессией в зависимости от угла закрутки структуры нематика. Для примера в табл. 2 представлены интегральные характеристики основных конструкций быстродействующих ЖК модуляторов на основе структур с различными углами закрутки.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики ЖК модулятора на базе тонких ячеек с антисимметричными граничными условиями на основе структур с различными углами закрутки / Characteristics of an LC modulator based on thin cells with antisymmetric boundary conditions based on structures with different twist angles

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 С	334	3500	1396	387

Характеристика	Угол закрутки антисимметричной структуры			
	0°	90°	180°	270°
Полное время срабатывания ЖК устройства τ , мкс	9	6	5	3,75
Ахроматичность ЖК устройства в состоянии «выключено» H_{off}	$\geq 0,05$	$\leq 0,05$	$\geq 0,05$	$\leq 0,05$

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Как показывает анализ этих данных, безусловным лидером по оптическим интегральным характеристикам (T_{off} , C , H_{off}) является твист-индикатор, однако по динамике переключения из одного состояния в другое и обратно он только на 3-ем месте из 4-х. Весьма неплохой набор всех интегральных характеристик имеет ЖК модулятор на основе π -ячейки с углом закрутки структуры ЖК 180°, основным недостатком которого является слабо окрашенное состояние с максимальным пропусканием. Это является некоторым ограничением для использования такого модулятора во всём видимом диапазоне длин волн света. С другой стороны, самым малым полным временем срабатывания обладает модулятор на основе структуры с углом закрутки 270°, но это устройство имеет достаточно низкое значение контрастного отношения. Если основным требованием, которое предъявляется к ЖК модулятору, является минимальное полное время срабатывания τ , при посредственных значениях оптических характеристик, то следует выбирать устройство на основе этой структуры ЖК. Например, для большинства ЖК устройств требуемый уровень контрастного отношения составляет 300:1 при ахроматичности $H \leq 0.05$. В то же время полное время срабатывания такого устройства должно быть как можно меньше, в идеале не более 3–5 миллисекунд (лучше меньше). Поэтому при таких требованиях к интегральным характеристикам следует выбрать модулятор на основе структуры с углом закрутки 270°.

Таким образом, в статье выполнен компьютерный анализ различных конструкций ЖК модуляторов света и на основе его интегральных характеристик найдена оптимальная конструкция подобного устройства. Показано, что оптимальными интегральными характеристиками обладает ЖК модулятор, выполненный на основе ЖК структуры с углом закрутки 270° при антисимметричных граничных условиях с малыми значениями углов преднаклона на ориентирующих подложках, работающих в волноводной моде и использующий фазовый плёночный компенсатор.

Статья поступила в редакцию 21.09.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Jaroszewicz L. R., Bennis N. Liquid Crystal Optical Devices // Crystals. 2019. Vol. 9. Iss. 10. P. 523. DOI: 10.3390/cryst9100523.
- Obayya S., Hameed M. F. O., Areed N. F. F. Computational Liquid Crystal Photonics: Fundamentals, Modelling and Applications. Great Britain: John Wiley & Sons, 2016. 272 P. DOI: 10.1002/9781119041993.

3. 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. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.84.
4. Wittenbecher L, Zigmantas D. Correction of Fabry-Pérot interference effects in phase and amplitude pulse shapers based on liquid crystal spatial light modulators // Optics Express. 2019. Vol. 27. Iss. 16. P. 22970–22982. DOI: 10.1364/OE.27.022970.
5. Котова С. П., Майорова А. М., Самагин С. А. Возможность формирования двухлепестковых вихревых световых полей с помощью модифицированного ЖК фокусатора // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 1. С. 18–23. DOI: 10.21883/OS.2019.01.47047.256-18.
6. Woods A. J. Crosstalk in stereoscopic displays: a Review // Journal of Electronic Imaging. 2012. Vol. 21. Iss. 4. P. 040902. DOI: 10.1117/1.JEI.21.4.040902.
7. Зинчик А. А. Применение пространственных модуляторов света для формирования лазерных пучков со спиральным распределением фазы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 817–824. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-817-824.
8. Беляев В. В. Перспективные применения и технологии жидкокристаллических устройств отображения информации и фотоники // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2015. Т. 15. № 3. С. 7–27. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7.
9. 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. Iss. 1. P. 329–339. DOI: 10.1080/00268948408071693.
10. Schadt M., Helfrich W. Voltage Dependent Optical Activity of a Twisted Nematic Liquid Crystal // Applied Physics Letters. 1971. Vol. 18. Iss. 4. P. 127–128. DOI: 10.1063/1.1653593.
11. Cheng H., Bhowmik A. K., Bos P. J. Fast-response liquid crystal variable optical retarder and multilevel attenuator // Optical Engineering. 2013. Vol. 52. Iss. 10. P. 107105. DOI: 10.1117/1.OE.52.10.107105.
12. Komitov L., Hegde G., Kolev D. Fast liquid crystal light shutter // Journal of Physics D: Applied physics. 2011. Vol. 44. No. 44. P. 442002–442006. DOI: 10.1088/0022-3727/44/44/442002.
13. 30 to 50 ns Liquid-Crystal Optical Switches / Geis M. W., Molnar R. J., Turner G. W., Lyszczarz T. M., Osgood R. M., Kimball B. R. // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7618. Emerging Liquid Crystal Technologies V (12 February 2010). P. 76180J. DOI: 10.1117/12.840281.
14. Microsecond-range optical shutter for unpolarized light with chiral nematic liquid crystal / Mohammadimasoudi M., Shin J., Lee K., Neyts K., Beeckman J. // AIP Advances. 2015. Vol. 5. Iss. 4. P. 047122–047125. DOI: 10.1063/1.4918303.
15. Симоненко Г. В. Компьютерное моделирование характеристик быстродействующих классических модуляторов на основе жидких кристаллов. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2018. 136 с.
16. Сухариер А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь, 1991. 256 с.
17. Chigrinov V. G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London: Artech House Publishing, 1999. 359 p.
18. 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. DOI: 10.1002/9780470751800.
19. 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. DOI: 10.1021/acsmacrolett.8b00044.
20. 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. DOI: 10.1080/10587250008023248
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. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.82.
22. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах: дисс. ... докт. хим. наук. Саратов, 2001. 290 с.
23. де Жен П.-Ж. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 404 с.

REFERENCES

1. Jaroszewicz L. R., Bennis N. Liquid Crystal Optical Devices. In: *Crystals*, 2019, vol. 9, iss. 10, pp. 523. DOI: 10.3390/cryst9100523.
2. Obayya S., Hameed M. F. O., Areed N. F. F. Computational Liquid Crystal Photonics: Fundamentals, Modelling and Applications. Great Britain, John Wiley & Sons Publ., 2016. 272 P. DOI: 10.1002/9781119041993.
3. 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. Russian Journal], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 84–94. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.84.
4. Wittenbecher L, Zigmantas D. Correction of Fabry-Pйrot interference effects in phase and amplitude pulse shapers based on liquid crystal spatial light modulators. In: *Optics Express*, 2019, vol. 2, iss. 16, pp. 22970–22982. DOI: 10.1364/OE.27.022970.
5. Kotova S. P., Maiorova A. M., Samagin S. A. [The possibility of forming two-lobe vortex light fields using a modified liquid-crystal focusator]. In: *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2019, vol. 126, no. 1, pp. 18–23. DOI: 10.21883/OS.2019.01.47047.256-18.
6. Woods A. J. Crosstalk in stereoscopic displays: a Review. In: *Journal of Electronic Imaging*, 2012, vol. 21, iss. 4, pp. 040902. DOI: 10.1117/1.JEI.21.4.040902.
7. Zinchik A. A. [Application of spatial light modulators for generation of laser beams with a spiral phase distribution]. In: *Nauchno-tekhnikeskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2015, vol. 15, no. 5, pp. 817–824. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-817-824.
8. Belyaev V. V. [Promising Applications and Technologies of Liquid Crystal Displays and Photonics Devices]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application. Russian Journal], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 7–27. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7.
9. 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, iss. 1, pp. 329–339. DOI: 10.1080/00268948408071693.
10. Schadt M., Helfrich W. Voltage Dependent Optical Activity of a Twisted Nematic Liquid Crystal. In: *Applied Physics Letters*, 1971, vol. 18, iss. 4, pp. 127–128. DOI: 10.1063/1.1653593.
11. Cheng H., Bhowmik A. K., Bos P. J. Fast-response liquid crystal variable optical retarder and multilevel attenuator. In: *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, iss. 10, pp. 107105. DOI: 10.1117/1.OE.52.10.107105.

12. Komitov L., Hegde G., Kolev D. Fast liquid crystal light shutter. In: *Journal of Physics D: Applied physics*, 2011, vol. 44, no. 44, pp. 442002–442006. DOI: 10.1088/0022-3727/44/44/442002.
13. 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. In: *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7618. Emerging Liquid Crystal Technologies V (12 February 2010), pp. 76180J. DOI: 10.1117/12.840281.
14. Mohammadimasoudi M., Shin J., Lee K., Neyts K., Beeckman J. Microsecond-range optical shutter for unpolarized light with chiral nematic liquid crystal. In: *AIP Advances*, 2015, vol. 5, iss. 4, pp. 047122–047125. DOI: 10.1063/1.4918303.
15. Simonenko G. V. *Komp'yuternoe modelirovanie kharakteristik bystrodeistvuyushchikh klassicheskikh modulyatorov na osnove zhidkikh kristallov* [Computer simulation of characteristics of high-speed classical modulators based on liquid crystals]. Saratov, Saratov University Publ., 2018. 136 p.
16. Sukhariy A. S. *Zhidkokristallicheskie indikatory* [Liquid crystal displays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 256 p.
17. Chigrinov V. G. *Liquid crystal devices. Physics and applications*. Boston-London, Artech House Publishing, 1999. 359 p.
18. 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. DOI: 10.1002/9780470751800.
19. 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. DOI: 10.1021/acsmacrolett.8b00044.
20. 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. DOI: 10.1080/10587250008023248
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. Russian Journal], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 82–90. DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.82.
22. Kurchatkin S. P. *Poverkhnostrnye yavleniya i struktura termotropnykh zhidkikh kristallov v kapillyarnykh ob'emakh: diss. ... dokt. khim. nauk* [Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes: D. thesis in Chemical Sciences]. Saratov, 2001. 290 p.
23. de Gennes P.-G. *Fizika zhidkikh kristallov* [Physics of liquid crystals]. Moscow, Mir Publ., 1977. 404 p.

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 – Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Department of Optics and Biophotonics, Saratov State University;
e-mail: gvsim1960@hotmail.com.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Симоненко Г. В. Быстродействующий ЖК модулятор на основе волноводного эффекта в сверхзакрученной структуре нематика // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 3. С. 38-52.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-38-52

FOR CITATION

Simonenko G. V. Computer analysis of the influence of technological parameters of a high-speed liquid crystal modulator on its integral characteristics. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 3, pp. 38–52.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-38-52