



## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 149–157  
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2. P. 149–157  
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-149-157>

Научная статья  
УДК 535.361:610.849.19:618.723

### Угловые оптические характеристики стандартного твист-индикатора с фазовым компенсатором

Г. В. Симоненко

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Симоненко Георгий Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры оптики и биофотоники, [simonenkogv@sgu.ru](mailto:simonenkogv@sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6283-6335>

**Аннотация.** На основе компьютерного моделирования предложена оригинальная и простая конструкция жидкокристаллического (ЖК) твист-индикатора с фазовым компенсатором, имеющая улучшенные угловые оптические характеристики. Конструкция имеет сэндвич-структуру и состоит из последовательно расположенных друг за другом входного поляризатора, классической жидкокристаллической твист-ячейки, фазового компенсатора и выходного поляризатора. Фазовый компенсатор состоит из двух одинаковых одноосных анизотропных пленок, оптические оси которых составляют угол в  $90^\circ$ . Компьютерное моделирование позволило найти оптимальную конструкцию данного устройства, которая в отличие от других конструкций имеет более широкий угол обзора. При этом установлено, что для каждого ЖК материала существует оптимальный набор конструктивных параметров устройства (угол ориентации и толщина фазового компенсатора) и линейная взаимосвязь между толщиной ЖК слоя и толщиной фазового компенсатора, при которой полный угол обзора максимален. Кроме этого выявлена связь между управляющим напряжением и полным углом обзора устройства.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, жидкокристаллический индикатор, угловые характеристики

**Благодарности:** Автор приносит свою искреннюю благодарность старшему научному сотруднику Института физики Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского, кандидату физико-математических наук Д. А. Яковлеву за ценную и конструктивную критику результатов и предоставление литературных данных.

**Для цитирования:** Симоненко Г. В. Угловые оптические характеристики стандартного твист-индикатора с фазовым компенсатором // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 149–157. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-149-157>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

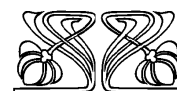
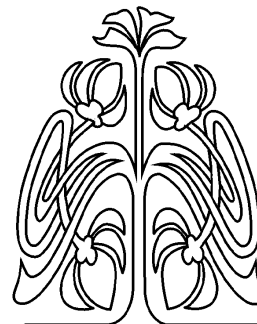
**Angular optical characteristics of a standard twist indicator with a phase compensator**

**G. V. Simonenko**

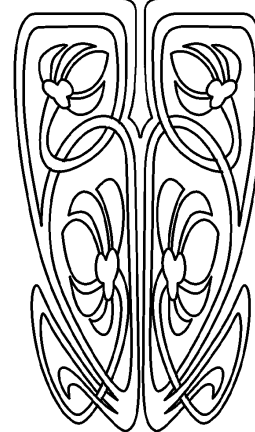
Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Georgy V. Simonenko, [simonenkogv@sgu.ru](mailto:simonenkogv@sgu.ru), <https://orcid.org/0000-000-6283-6335>

© Симоненко Г. В., 2022



**НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ**





**Abstract. Background and Objectives:** One of the disadvantages of a liquid crystal display device for information on the twist effect is its relatively narrow viewing angle. In this regard, an urgent task is to find ways to increase the viewing angle of such a device. **Materials and Methods:** Based on the computer simulation method, an original and simple design of a liquid crystal twist indicator with a phase compensator, which has improved angular optical characteristics, is proposed. **Results:** The design has a sandwich structure and consists of an input polarizer, a classic liquid crystal twist cell, a phase compensator and an output polarizer arranged in series one after another. The phase compensator consists of two identical uniaxial anisotropic films, the optical axes of which form an angle of  $90^\circ$ . Computer modeling made it possible to find the optimal design of this device, which, unlike other designs, has a wider viewing angle. It has been found that for each LC material there is an optimal set of design parameters of the device (orientation angle and phase compensator thickness) and there is a linear relationship between the thickness of the LC liquid crystal layer and the thickness of the phase compensator, at which the total viewing angle is maximum. In addition, a relationship has been found between the control voltage and the total viewing angle of the device. **Conclusion:** The proposed original design of a liquid crystal information display device based on the twist effect with a phase compensator can serve as the basis for the production of simple and technological liquid crystal displays with a wide viewing angle.

**Keywords:** computer simulation, liquid crystal display, angular characteristics

**Acknowledgements:** The author expresses his sincere gratitude to the senior researcher of the Institute of Physics of the SSU named after N. G. Chernyshevsky Ph.D. – m.s. Dmitry A. Yakovlev for valuable and constructive criticism of the results and for providing literature data.

**For citation:** Simonenko G. V. Angular optical characteristics of a standard twist indicator with a phase compensator. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-149-157>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

## Введение

Стандартные жидкокристаллические (ЖК) устройства отображения информации на основе твист-эффекта получили широкое распространение в дисплейной технике [1, 2]. Однако такие дисплеи имеют два существенных недостатка:

- 1) относительно большие времена срабатывания устройства (порядка единиц миллисекунд) [3];
- 2) относительно малые углы обзора устройства [4].

Первый из недостатков такого устройства связан с физическими свойствами самого ЖК [5] и решается существенным образом только путем синтеза новых материалов с низкой вязкостью или применением другого типа ЖК. В данном случае речь идет о сегнетоэлектрических ЖК, которые обычно используют в цветных микродисплеях и переключаемых 2D/3D телевизорах [6]. Однако по сравнению с ЖК устройствами на твист-эффекте дисплеи на основе сегнетоэлектрических ЖК имеют более дорогую технологию производства, поэтому до сих пор большое число ЖК экранов использует твист-эффект в качестве основного.

Второй из перечисленных недостатков твист-индикатора связан с тем, что в основе его работы лежит эффект интерференции поляризованных лучей [7–9] и при увеличении угла падения света на него изменяется оптическая разность хода интерферирующих лучей, что приводит к нарушению оптимального режима работы твист-эффекта в ЖК. Данная проблема решается с помощью фазовых компенсаторов, которые представляют собой одноосные или

двуосные фазовые пластины, помещенные между ЖК ячейкой и выходным поляризатором [7–11]. Стоит отметить, что развитие фотополимерных материалов [12, 13] позволяет фазовые компенсаторы интегрировать непосредственно в саму рабочую ЖК ячейку и таким образом существенно улучшить угловые оптические характеристики ЖК экрана. Кроме вышеназванной технологии, для улучшения угловых характеристик твист ЖК устройств используется мультидоменная технология ориентации ЖК для одного элемента отображения информации [12]. Однако по сравнению с технологией фазовых компенсаторов мультидоменная ориентация более дорога в исполнении и имеет недостаток в виде дефекта ориентации ЖК малого размера в центре элемента отображения информации [12]. Поэтому с нашей точки зрения для улучшения угловых оптических характеристик выгоднее использовать технологию фазовых компенсаторов. Несмотря на то, что фазовые компенсаторы используются для улучшения оптических характеристик различных ЖК устройств достаточно давно [14], тем не менее, данные по зависимости угловых оптических характеристик от параметров конструкции компенсаторов автору не известны. В силу вышесказанного в данной статье предлагается простая конструкция ЖК экрана на основе твист-эффекта с фазовым компенсатором с улучшенными угловыми характеристиками, а также представлены результаты компьютерного моделирования угловых оптических характеристик этого устройства в зависимости от параметров его конструкции.



### Угловые оптические характеристики ЖК дисплея

Стандартные ЖК дисплеи на основе закрученного нематика описываются значительным числом оптических и электрооптических характеристик [9, 15]. К первым относят спектральные и интегральные пропускания устройства в состояниях «включено» и «выключено», цветовые координаты экрана для этих состояний и спектральное и интегральное контрастное отношение [9]. В число вторых входят крутизна вольт-контрастной характеристики, степень мультиплексирования устройства и времена реакции и релаксации экрана [9]. Дадим краткое определение основным оптическим характеристикам стандартного нематического ЖК экрана.

Работа всех ЖК экранов основана на том, что у него существуют два состояния, в одном из которых на управляющие электроды устройства подано напряжение  $U_{on}$  (это состояние «включено»/«on»), а в другом – значение управляющего напряжения  $U_{off}$  равно пороговому или ниже него (состояние «выключено»/«off»). Соответственно эти два состояния описываются различными значениями спектрального пропускания экрана  $T_{\lambda on}$  и  $T_{\lambda off}$  на длине волны света  $\lambda$ , прошедшего через устройство. Интегральным пропусканием ЖК устройства в состоянии «off» (или «on»)  $T_{off}$  ( $T_{on}$ ) называется среднее по спектру пропускание устройства с учетом кривой спектральной чувствительности глаза человека [16]. Спектральным контрастным отношением ЖК устройства  $C_\lambda$  называется отношение

$$C_\lambda = T_{\lambda off} / T_{\lambda on}.$$

Соответственно интегральным контрастным отношением ЖК экрана  $C$  называется следующее отношение:

$$C = T_{off} / T_{on}.$$

Все оптические характеристики ЖК дисплея сильно зависят от угла наблюдения [9, 14, 15], так как работа таких ЖК устройств преимущественно основана на эффекте интерференции поляризованных лучей. Поэтому для описания таких зависимостей введено понятие диаграммы направленности устройства, которая описывает оптические характеристики ЖК дисплея в зависимости от угла наблюдения изображения [15]. В технике ЖК дисплеев диаграмма направленности называется индикатрисой интегрального (спектрального) контрастного отношения или индикатрисой интегрального (спектрального) пропускания этого устройства. Индикатрисой интегрального контрастного отношения ЖК дисплея

называется зависимость интегрального контрастного отношения от угла падения ( $\alpha$ ) и азимута плоскости падения ( $\beta$ ) света при фиксированных значениях управляющего напряжения  $U_{on}$  и  $U_{off}$  [9]. Угловые характеристики ЖК индикатора можно описать одним параметром. Для этой цели введем понятие полного угла обзора ЖК экрана  $\Psi_{full}$ , которое можно сформулировать следующим образом. Пусть  $C_{min}$  – некоторое заданное критическое значение интегрального контрастного отношения  $C$ . Под полным углом обзора устройства  $\Psi_{full}$  будем понимать критическое значение угла падения света на ЖК устройство такое, что при всех значениях  $\alpha \leq \Psi_{full}$  и всех значениях  $\beta$  выполняется условие

$$C(\alpha, \beta) \geq C_{min},$$

а при  $\alpha > \Psi_{full}$  это условие нарушается, по крайней мере, при каких-то значениях  $\beta$ .

Как отмечалось выше, на все оптические характеристики ЖК устройства оказывает существенное влияние большое число параметров его конструкции. Поэтому для исследовательских целей применяется метод компьютерного моделирования, и в нашем случае для этого использовался программный комплекс MOUSE-LCD, который позволяет производить моделирование характеристик различных ЖК устройств с точностью в пределах 10% [16–18].

### Конструкция ЖК устройства

Фундаментом устройства просветного типа является стандартная ЖК ячейка на основе твист-эффекта, которая дополняется фазовым пленочным компенсатором, расположенным за рабочей ячейкой перед выходным поляридом. Основными элементами этого устройства являются последовательно расположенные друг за другом следующие компоненты: входной поляриод, стандартная твист-ячейка, фазовый компенсатор, выходной поляриод. Фазовый компенсатор состоит из двух одинаковых одноосных полимерных пленок. Схематичное взаимное расположение оптических осей элементов ЖК устройства показано на рис. 1. Ориентация входного поляриода (направление 1-1') совпадает с направлением натирания на первой подложке ЖК ячейки, а выходной поляриод (направление 2-2') ориентирован по направлению натирания на второй подложке ЖК ячейки. Так как используется стандартная твист-ячейка, угол между осями 1-1' и 2-2' составляет 90°. Оптическая ось первой фазовой пластины (направление 3-3') компенсатора



ориентирована под углом  $\alpha_1$  к направлению 1-1', а оптическая ось второй фазовой пластины (направление 4-4') повернута относительно первой на угол  $\alpha_2$ . Стоит отметить, что роль фазового компенсатора состоит только в улучшении угловых оптических характеристик и его наличие не должно ухудшать оптические характеристики в нормальном направлении. Поэтому величина угла  $\alpha_2$  всегда должна быть равна  $90^\circ$ .

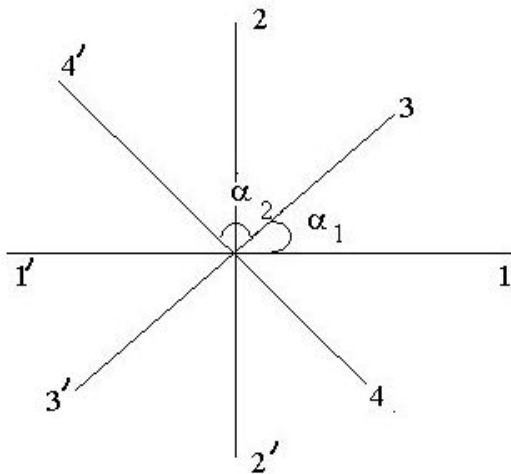


Рис. 1. Взаимное расположение оптических осей элементов устройства

Fig. 1. Mutual arrangement of the optical axes of the device elements

На рис. 2 представлены индикатрисы среднего по спектру контрастного отношения стандартного твист-индикатора и твист-индикатора с фазовым компенсатором, который описан выше. Как видно из этого рисунка, у ЖК устройства с фазовым компенсатором во всех направлениях среднее по спектру контрастное отношение выше чем 5:1, в то время как у устройства без фазового компенсатора существуют направления, в которых среднее по спектру контрастное отношение равно 1. При сравнении толщина твист-ячейки была одной и той же и соответствовала условию  $d_{LC} \cdot \Delta n_{LC} \approx 0.475$  мкм ( $d_{LC}$ ,  $\Delta n_{LC}$  – толщина ЖК слоя и оптическая анизотропия ЖК в твист-ячейке). Индикатрисы построены для следующих управляющих напряжений:  $U_{off} = 1.6$  В,  $U_{on} = 10$  В. Выбор столь высокого значения управляющего напряжения  $U_{on}$  обусловлен возможностью получения минимально возможного значения полного времени срабатывания ЖК устройства, так как полное время срабатывания ЖК устройства минимально при максимальном управляющем напряжении [9]. Отметим, что индикатриса среднего по спектру

контрастного отношения твист-индикатора без фазового компенсатора при этом управляющем напряжении имеет форму креста, а не трилистника, как при  $U_{on} \sim 5-7$  В. Это различие в индикатрисах для твист-индикатора без фазового компенсатора объясняется зависимостью их формы от значения управляющего напряжения [9].

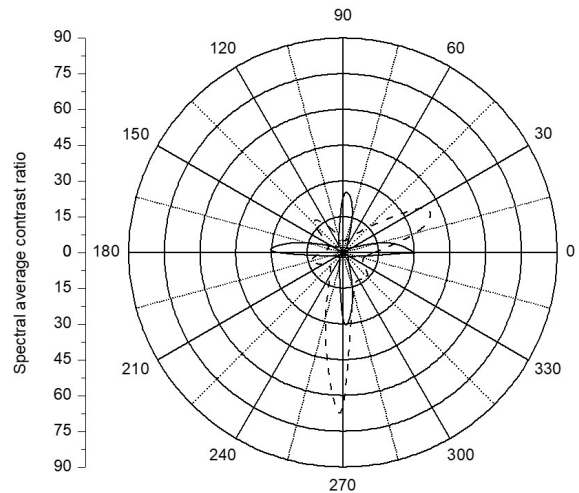


Рис. 2. Стандартная индикатриса среднего по спектру контрастного отношения твист-индикатора без фазового компенсатора (сплошная кривая) и с ним (прерывистая кривая). Угол падения света на ЖК устройство  $45^\circ$ , толщина твист-ячейки 5 мкм. Две одинаковых фазовых пленки с оптической толщиной 0.276 мкм каждая:  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$

Fig. 2. Standard indicatrix of the contrast ratio of the twist indicator, averaged over the spectrum, without a phase compensator (solid curve) and with it (dashed curve). The angle of incidence of light on the LCD device is  $45^\circ$ , the thickness of the twist-cell is 5  $\mu\text{m}$ . Two identical phase films with an optical thickness of 0.276  $\mu\text{m}$  each:  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$

Стоит отметить, что описанная конструкция ЖК дисплея на основе стандартной твист-ячейки с фазовым компенсатором имеет существенные преимущества:

- 1) базируется на хорошо известной и простой технологии изготовления ЖК индикатора;
- 2) фазовый компенсатор прост в изготовлении и технология его производства давно известна.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим влияние различных параметров ЖК устройства отображения информации на основе твист-эффекта с фазовым компенсатором на его индикатрису среднего по спектру контрастного отношения. Для решения этой задачи использовался метод компьютерного моделирования характеристик ЖК устройства с помощью комплекса MOUSE-LCD [16–18]. Стоит отметить, что физические постоянные ЖК вещества



в рабочей ячейке (упругие постоянные и диэлектрические проницаемости) могут оказывать на угловые оптические характеристики существенное влияние, так как от их величин зависит оптимальное значение управляющего напряжения в состоянии «включено». Однако определяющее значение в этом случае имеет условие Гуч – Терри [8], которое накладывается на величину  $(d_{LC} \cdot \Delta n_{LC})$ . Поэтому везде далее считалось, что ячейка заполнена ЖК смесью со следующими физическими параметрами:  $k_{11} = 13.2 \cdot 10^{-7}$  дин,  $k_{22} = 6.5 \cdot 10^{-7}$  дин,  $k_{33} = 13.8 \cdot 10^{-7}$  дин,  $\epsilon_{\perp} = 3.1$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 8.3$ ,  $\Delta n$  ( $\lambda = 436$  нм) = 0.1048,  $\Delta n$  ( $\lambda = 546$  нм) = 0.099,  $\Delta n$  ( $\lambda = 633$  нм) = 0.096. Во всех расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. В качестве поляризаторов использовалась пленка *NPF – F 1205 DU*. Технологические параметры (толщины и показатели преломления) стеклянных подложек, электродных и ориентирующих слоев были взяты из работы [19]. Оптическая анизотропия фазовой пленки  $\Delta n_{ph}$  в зависимости от длины волны света  $\lambda$  считалась по формуле Коши [20] с учетом следующих базовых точек:  $\Delta n_{ph}$  ( $\lambda = 405$  нм) = 0.0095,  $\Delta n_{ph}$  ( $\lambda = 589$  нм) = 0.0092,  $\Delta n_{ph}$  ( $\lambda = 707$  нм) = 0.009. Рассмотрим влияние оптических параметров ЖК индикатора (толщины ЖК слоя  $d_{LC}$ , анизотропии показателей преломления ЖК  $\Delta n_{LC}$ , толщин фазовых пластин компенсатора  $d_{ph1}$  и  $d_{ph2}$ , углов ориентации фазовых пластин компенсатора  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и управляющего напряжения  $U_{on}$  на полный угол обзора  $\Psi_{full}$  твист-индикатора с фазовым компенсатором. Обычно при определении угла обзора ЖК устройства за основу берут значение среднего по спектру контрастного отношения, равного 10 : 1 [7, 9]. Для практических целей предлагаем использовать значение контрастного отношения под углом, которое кратно отличается от среднего по спектру контрастного отношения в нормальном направлении. В нашем случае среднее по спектру контрастное отношение при указанных выше значениях конструктивных и физических параметров устройства в нормальном направлении составляет более 300 : 1. Если рассматривать углы наблюдения ЖК экрана, отличные от нормального, то уменьшение значения среднего по спектру контрастного отношения в 10 раз соответствует требованиям, предъявляемым к ЖК устройствам отображения информации [15]. В силу этого при определении полного угла обзора такого ЖК экрана мы задались уровнем контрастного отношения

$C_{min} = 30 : 1$ , и все дальнейшие результаты приведены для этого значения. При исследовании влияния углов ориентации фазовых пластин и на угловые характеристики ЖК устройства считалось, что изменяется только угол  $\alpha_1$ , а  $\alpha_2 = 90^\circ$ , так как это гарантирует неизменность оптических характеристик устройства в нормальном направлении. По этой же причине первая и вторая фазовые пластины всегда должны иметь одинаковую оптическую толщину, т. е.  $(\Delta n \times d_{ph1}) = (\Delta n \cdot d_{ph2}) = (\Delta n \cdot d_{ph})$ .

На рис. 3 показана зависимость полного угла обзора твист-индикатора с фазовым компенсатором от величины оптической анизотропии ЖК материала. Как видно из этого рисунка, зависимость  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(\Delta n_{LC})$  имеет максимум, который говорит о наличии оптимального значения  $\Delta n_{LC}$ , при котором угол обзора устройства максимален. Максимум в этой зависимости объясняется тем, что у твист-ячейки существует первый максимум в зависимости  $C = C(d_{LC} \times \Delta n_{LC})$ , для которого  $(d_{LC} \cdot \Delta n_{LC}) = 0.475$  мкм [8].

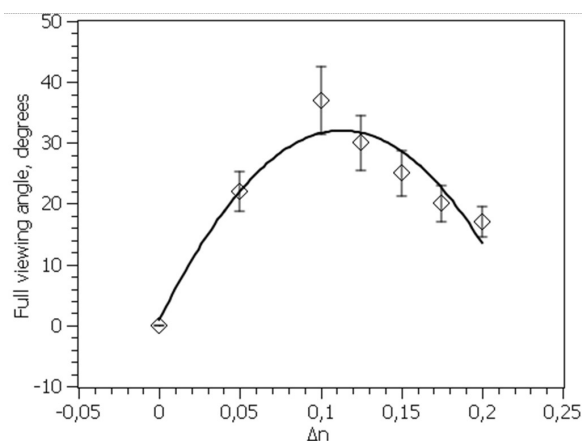


Рис. 3. Зависимость полного угла обзора  $\Psi_{full}$  устройства от величины оптической анизотропии ЖК материала. Конструктивные параметры ЖК устройства:  $d_{LC} = 4$  мкм,  $d_{ph} = 30$  мкм,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6$  В,  $U_{on} = 10$  В

Fig. 3. Dependence of the total viewing angle  $\Psi_{full}$  of the device on the value of the optical anisotropy of the LCD material. Design parameters of the LCD device:  $d_{LC} = 4$   $\mu\text{m}$ ,  $d_{ph} = 30$   $\mu\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6$  V,  $U_{on} = 10$  V

На рис. 4, а представлены зависимости  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(d_{ph})$  для различных значений толщин ЖК слоя  $d_{LC}$ . Все зависимости имеют вид кривых с максимумом, что говорит о наличии оптимальной толщины фазового компенсатора  $d_{ph-Opt}$ , при котором устройство имеет наибольший полный угол обзора ЖК экрана. Значение этой оптимальной толщины связано с величиной толщины ЖК твист-индикатора (рис. 4, б). При

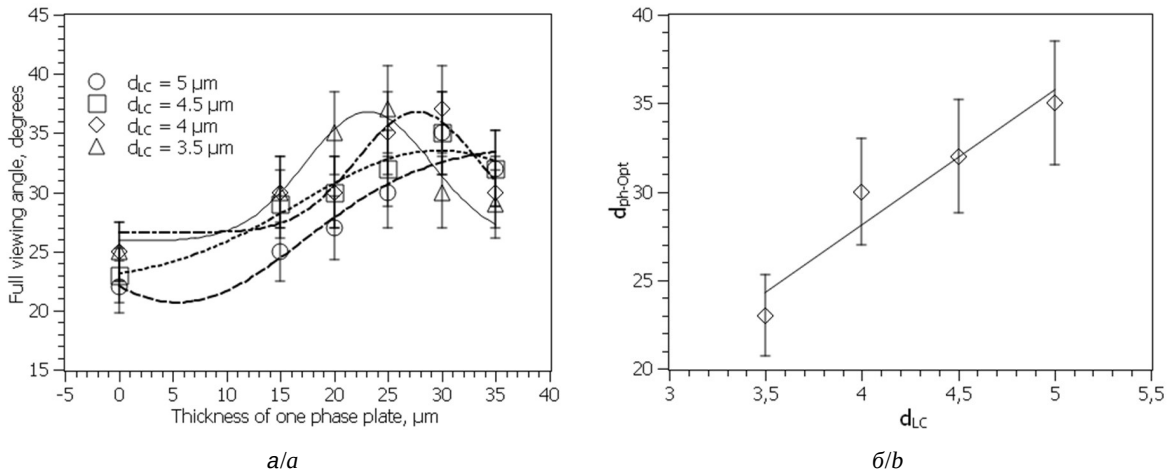


Рис. 4. Зависимость полного угла обзора  $\Psi_{full}$  ЖК устройства от толщины фазовой пластины  $d_{ph}$  для различных толщин ЖК слоя  $d_{LC}$  (а) и оптимальной толщины фазового компенсатора от толщины ЖК слоя устройства (б). Конструктивные параметры ЖК устройства:  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6 \text{ В}$ ,  $U_{on} = 10 \text{ В}$

Fig. 4. Dependence of the total viewing angle  $\Psi_{full}$  of the LC device on the thickness of the phase plate  $d_{ph}$  for different thicknesses of the LC layer  $d_{LC}$  (a). Dependence of the optimal thickness of the phase compensator on the thickness of the LC layer of the device (b). Design parameters of the LCD device:  $d_{LC} = 4 \mu\text{m}$ ,  $d_{ph} = 30 \mu\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6 \text{ V}$ ,  $U_{on} = 10 \text{ V}$

этом зависимость  $d_{ph-opt} = d_{ph-opt}(d_{LC})$  с ошибкой 7% является линейной. Наличие максимума в зависимости  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(d_{ph})$  объясняется тем, что в основе работы устройства лежит эффект интерференции поляризованных лучей и в этом случае контрастное отношение имеет гармоническую зависимость от толщины объекта, в котором наблюдается это явление [9]. В силу того, что изменения величины  $d_{ph}$  происходят в малом интервале, мы наблюдаем только один максимум этой зависимости.

На рис. 5 показана зависимость полного угла обзора твист-индикатора с фазовым компенсатором от угла ориентации фазового компенсатора  $\alpha_1$ . Заметим, что все дальнейшие исследования были выполнены для толщины ЖК слоя, вычисленной из условия  $(d_{LC} \cdot \Delta n_{LC}) = 0.475 \text{ мкм}$ . Зависимость  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(\alpha_1)$ , как и представленные выше зависимости, имеет форму кривой с максимумом, что говорит о наличии оптимального значения угла ориентации фазового компенсатора. Наличие максимума в зависимости  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(\alpha_1)$ , как и в предыдущем случае, объясняется тем, что в основе работы устройства лежит эффект интерференции поляризованных лучей. Этот эффект имеет максимальное проявление при условии равенства амплитуд интерферирующих волн, а это достигается при условии  $\alpha_1 = 45^\circ$ . Стоит отметить, что погрешность в ориентации фазового компенсатора не столь критически отражается на величине

полного угла обзора ЖК устройства и может составлять  $\pm 1^\circ$ .

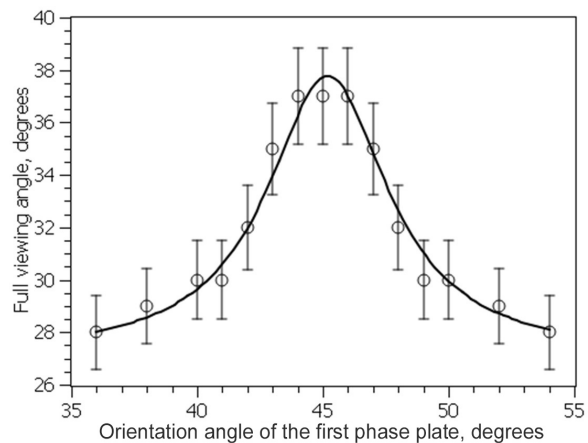


Рис. 5. Зависимость полного угла обзора  $\Psi_{full}$  ЖК устройства от угла ориентации фазового компенсатора  $\alpha_1$ . Конструктивные параметры ЖК устройства:  $d_{LC} = 4 \text{ мкм}$ ,  $d_{ph} = 30 \text{ мкм}$ ,  $U_{off} = 1.6 \text{ В}$ ,  $U_{on} = 10 \text{ В}$

Fig. 5. Dependence of the full viewing angle  $\Psi_{full}$  of the LCD device on the orientation angle of the phase compensator  $\alpha_1$ . Design parameters of the LCD device:  $d_{LC} = 4 \mu\text{m}$ ,  $d_{ph} = 30 \mu\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6 \text{ V}$ ,  $U_{on} = 10 \text{ V}$

На рис. 6 представлена зависимость величины полного угла обзора твист-индикатора с фазовым компенсатором от значения управляющего напряжения в состоянии «включено». Видно, что с увеличением значения  $U_{on}$  величина полного угла обзора растет и до определенного значения, после которого эта зависимость выходит на плато. Такое поведение зависимости  $\Psi_{full} = \Psi_{full}(U_{on})$  говорит о том, что для каждого управляющего



напряжения в состоянии «включено» существует свое оптимальное значение толщины фазового компенсатора, при котором угол обзора максимален. Однако при достижении некоторого значения управляющего напряжения  $U_{on}$  дальнейшее его увеличение не приводит к изменению величины полного угла обзора устройства. Это связано с тем, что при этом значении управляющего напряжения искажение ЖК структуры стало максимальным и дальнейшее его увеличение практически не приводит к изменению фазового сдвига в структуре ЖК. При этом отметим, что увеличение значения управляющего напряжения  $U_{on}$  ведет к увеличению полного угла обзора ЖК устройства. Таким образом, выбор величины управляющего напряжения  $U_{on}$  наряду с фазовым компенсатором является еще одним фактором, определяющим полный угол обзора ЖК устройства.

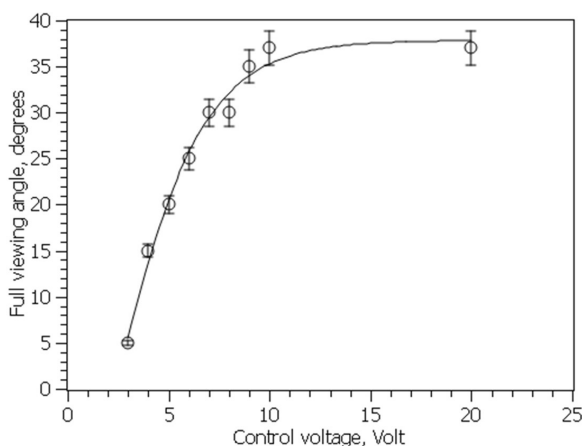


Рис. 6. Зависимость полного угла обзора  $\Psi_{full}$  ЖК устройства от значения управляющего напряжения  $U_{on}$ . Конструктивные параметры ЖК устройства:  $d_{LC} = 4$  мкм,  $d_{ph} = 30$  мкм,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6$  В

Fig. 6. Dependence of the total viewing angle  $\Psi_{full}$  of the LCD device on the value of the control voltage  $U_{on}$ . Design parameters of the LCD device:  $d_{LC} = 4$   $\mu\text{m}$ ,  $d_{ph} = 30$   $\mu\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $U_{off} = 1.6$  V

Отметим, что представленные результаты являются модельными, поэтому для практических целей интересно провести их сравнение с опубликованными данными. Наиболее полные результаты исследований как теоретические, так и экспериментальные, представлены в работе Т. Серган с соавторами [21], которые были взяты нами за основу. В таблице представлены результаты сравнения.

В таблице конструкции № 1 и № 2 – это конструкции, описанные в работе [20]. Конструкция № 1 состоит из двух сложных фазовых компенсаторов, которые расположены один до твист-

ячейки, а второй – после. Каждый из компенсаторов состоит из трех анизотропных элементов, включающих в себя фазовые пленки и ЖК полимер. Конструкция № 2 также состоит из двух сложных фазовых компенсаторов, которые расположены один до твист-ячейки, а второй – после. Первый фазовый компенсатор состоит из трех анизотропных элементов, включая ЖК материал, а второй – из четырех анизотропных элементов. Конструкция № 3 – это предложенная конструкция, в которой есть только один фазовый компенсатор, состоящий из двух одинаковых фазовых анизотропных пленок. Сравнение этих конструкций показывает, что конструкция № 3 имеет более высокое значение  $\Psi_{full}$ , чем конструкция № 1, но существенно более низкое значение  $\Psi_{full}$ , чем конструкция № 2. Однако стоит отметить, что если для конструкции № 1 теоретические и экспериментальные данные практически не различаются, то для конструкции № 2 это различие составляет примерно 100%. Отметим, что у конструкции № 3 управляющее напряжение в состоянии «включено» имеет высокое значение, что также способствует достижению более широко угла обзора ЖК устройства. Поэтому можно сделать вывод о том, что предложенная конструкция № 3, отличающаяся простотой и технологичностью, имеет хорошие практические перспективы.

Таблица/Table

**Сравнение различных конструкций твист-индикатора с фазовым компенсатором**

**Comparison of various twist indicator designs with a phase compensator**

Номер конструкции/ Design number	$\Psi_{full}, ^\circ$	
	Теория/Theory	Эксперимент/ Experiment
№ 1	30	30
№ 2	60	30
№ 3	37	–

Подытоживая, заметим, что найденные конкретные оптимальные значения конструктивных параметров ЖК устройства получены для одного набора значений физических параметров ЖК вещества. Если ЖК вещество будет другим, то оптимальные значения конструктивных параметров скорее всего будут иными, а процесс оптимизации конструкции ЖК устройства будет необходимо повторить.



## Заключение

На основе компьютерного моделирования предложена простая конструкция ЖК твист-индикатора с фазовым компенсатором, имеющая улучшенные угловые оптические характеристики. Отличие предложенной конструкции ЖК устройства отображения информации от известных состоит в том, что фазовый компенсатор выполнен в виде двух одинаковых одноосных полимерных пластин, оптические оси которых составляют друг с другом  $90^\circ$ , а оптическая ось первой фазовой пластины ориентирована под  $45^\circ$  к направлению натирания на входной подложке ЖК ячейки. Выполненное моделирование позволило установить следующее:

- 1) для каждого ЖК материала существует оптимальный набор конструктивных параметров устройства (углы ориентации и толщина фазового компенсатора);
- 2) существует линейная взаимосвязь между толщиной слоя ЖК и толщиной фазового компенсатора, при которой полный угол обзора максимален;
- 3) существует связь между управляющим напряжением и полным углом обзора ЖК устройства.

## Список литературы

1. He Z., Gou F., Chen R., Yin K., Zhan T., Wu S.-T. Liquid Crystal Beam Steering Devices : Principles, Recent Advances, and Future Developments // Crystals. 2019. Vol. 99, № 6. P. 292–300. <https://doi.org/10.3390/cryst9060292>
2. Wang C. T., Yang C. S., Guo Q. Liquid crystal optics and physics : Recent advances and prospects // Crystals. 2019. Vol. 99, № 12. P. 670. <https://doi.org/10.3390/cryst9120670>
3. 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. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2015.3.7>
4. Беляев В. В., Островский Б. И., Пикина Е. С. 14-я Европейская конференция по жидким кристаллам (ECLC-2017) (Москва, 25–30 июня 2017 г.) // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2018. Т. 18, № 1. С. 84–94. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2018.1.84>
5. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 404 с.
6. Qi Guo, Kexin Yan, Vladimir Chigrinov, Huijie Zhao, Michael Tribelsky. Ferroelectric Liquid Crystals : Physics and Applications // Crystals. 2019. Vol. 99, № 9. P. 470–492. <https://doi.org/10.3390/cryst9090470>
7. Yang Deng-Ke, Wu Shin-Tson. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. The Atrium, Southern Gate, Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2006. 378 p.
8. Yakovlev Dmitry A., Chigrinov Vladimir G., Kwok Hoi-Sing. Modeling and Optimization of LCD Optical Performance. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2015. 554 p.
9. Сухаруев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с.
10. Kang Chihtsung, Hai Bo. Liquid crystal display and method of optical compensation therefor WO 2015/003371 A1, Essen Patent & Trademark Agency, Chine, January 15, 2015
11. Komoto Sogo. Viewing angle expansion film, polarizing plate, and liquid crystal display device US 2018/0173045 A1, June 21, 2018.
12. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. Photoalignment of Liquid Crystalline Materials. Physics and Applications. Series in Display Technologies. Wiley, 2008. 248 p.
13. Odarchenko Yaroslav, Defaux Matthieu, Rosenthal Martin, Akhkiamova Azaliia, Bovsunovskaya Polina, Melnikov Alexey, Rodygin Alexander, Rychkov Andrey, Gerasimov Kirill, Anokhin Denis V., Zhu Xiaomin, Ivanov Dimitri 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 Lett. 2018. Vol. 97, № 4. P. 453–458. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.8b00044>
14. Самарин А. В. Технология ЖК – дисплеев с управляемым углом обзора // Компоненты и технологии. 2008. № 8. С. 15–22.
15. Display devices / ed. J. I. Pankove. Berlin : Springer-Verlag, 1980. 316 p.
16. Чигринов В. Г., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А., Цой В. И., Хохлов Н. А., Подъячев Ю. Б. Универсальный комплекс ЭВМ программ для оптимизации проектирования жидкокристаллических дисплеев // Информатика. Сер. Средства отображения информации / ВНИИ межотрасл. инф. 1993. № 2. С. 90–94.
17. Финкель А. Г., Цой В. И., Симоненко Г. В., Яковлев Д. А. Проектирование ЖК-устройств отображения информации // Электронная промышленность. 2000. № 2. С. 11–16.
18. 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. Vol. 9351. P. 17–25. <https://doi.org/10.1080/10587250008023248>
19. Курчаткин С. П. Поверхностные явления и структура термотропных жидких кристаллов в капиллярных объемах : дис. ... д-ра хим. наук. Саратов, 2001. 290 с.
20. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М. : Наука, 1970, 856 с.
21. Sergan T. A., Lavrentovich M. D., Kelly J. R., Kameyama T. Application of commercially available liquid crystal polymer films for the improvement of color and viewing angle performance of twisted nematic devices // Japanese Journal of Applied Physics. 2010.





Vol. 49, № 6. Article number 061702. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.061702>

## References

1. He Z., Gou F., Chen R., Yin K., Zhan T., Wu S.-T. Liquid Crystal Beam Steering Devices : Principles, Recent Advances, and Future Developments. *Crystals*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 292–300. <https://doi.org/10.3390/cryst9060292>
2. Wang C. T., Yang C. S., Guo Q. Liquid crystal optics and physics : Recent advances and prospects. *Crystals*, 2019, vol. 9, no. 12, pp. 670. <https://doi.org/10.3390/cryst9120670>
3. Belyaev V. V. Promising applications and technologies of liquid crystal display devices and photonics. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 7–27. (in Russian). <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2015.3.7>
4. 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, vol. 18, no. 1, pp. 84–94 (in Russian) <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2018.1.84>
5. Gennes P. G. de. *Phizika zhidkikh kristallov* [The Physics of Liquid Crystal]. Moscow, Mir Publ., 1977. 404 p. (in Russian).
6. Qi Guo, Kexin Yan, Vladimir Chigrinov, Huijie Zhao, Michael Tribelsky. Ferroelectric Liquid Crystals : Physics and Applications. *Crystals*, 2019, vol. 9, no. 9, pp. 470–492. <https://doi.org/10.3390/cryst9090470>
7. Yang Deng-Ke, Wu Shin-Tson. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2006. 378 p.
8. Yakovlev Dmitry A., Chigrinov Vladimir G., Kwok Hoi-Sing. *Modeling and Optimization of LCD Optical Performance*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2015. 554 p.
9. Sukharier A. S. *Zhidkokristallicheskie indikatory* [Liquid Crystal Indicators]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 256 p. (in Russian).
10. Kang Chihtsung, Hai Bo. *Liquid crystal display and method of optical compensation therefor* WO 2015/003371 A1, Essen Patent & Trademark Agency, Chine.
11. Komoto Sogo. *Viewing angle expansion film, polarizing plate, and liquid crystal display device* US 2018 / 0173045 A1.
12. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials. Physics and Applications*. Series in Display Technologies. Wiley, 2008. 248 p.
13. Odarchenko Yaroslav, Defaux Matthieu, Rosenthal Martin, Akhkiamova Azaliia, Bovsunovskaya Polina, Melnikov Alexey, Rodygin Alexander, Rychkov Andrey, Gerasimov Kirill, Anokhin Denis V., Zhu Xiaomin, Ivanov Dimitri 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 Lett.*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 453–458. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.8b00044>
14. Samarin A. V. Technology of LC displays with controlled viewing angle. *Components and Technologies*, 2008, no. 8, pp. 15–22 (in Russian).
15. Pankove J. I., ed. *Display Devices*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 316 p.
16. Chigrinov V. G., Simonenko G. V., Yakovlev D. A., Tsoy V. I., Khokhlov N. A., Podyachev Yu. B. Universal complex of computer programs for optimizing the design of liquid crystal displays. *Informatika. Ser. Sredstva otobrazheniya informatsii* [Informatics. Ser. Means of Information Display]. VNIi interindustry information, 1993, no. 2, pp. 90–94 (in Russian).
17. Finkel A. G., Tsoi V. I., Simonenko G. V., Yakovlev D. A. Designing LCD-devices for displaying information. *Electronic Industry*, 2000, no. 2, pp. 11–16 (in Russian).
18. 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, vol. 351, pp. 17–25. <https://doi.org/10.1080/10587250008023248>
19. Kurchatkin S. P. *Surface phenomena and structure of thermotropic liquid crystals in capillary volumes*. Diss. Dr. Sci. (Phys.). Saratov, 2001. 290 p. (in Russian).
20. Born Max, Wolf Emil. *Principles of Optics*. London, Pergamon press, 1964. 854 p. (Russ. ed. : Moscow, Nauka Publ., 1970. 856 p.).
21. Sergan T. A., Lavrentovich M. D., Kelly J. R., Kameyama T. Application of commercially available liquid crystal polymer films for the improvement of color and viewing angle performance of twisted nematic devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, no. 6, article no. 061702. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.061702>

Поступила в редакцию 30.03.2022; одобрена после рецензирования 27.04.2022; принята к публикации 06.05.2022  
The article was submitted 30.03.2022; approved after reviewing 27.04.2022; accepted for publication 06.05.2022