



- in vivo* под действием глюкозы // Квантовая электроника. 2006. Т. 36(12). С. 1119–1124.
16. Zaman R. T., Rajaram N., Nichols B. S., Rylander III H. G., Wang T., Tummell J. W., Welch A. J. Changes in morphology and optical properties of sclera and choroidal layers due to hyperosmotic agent // J. Biomed. Opt. 2011. Vol. 16 (7). 077008.
 17. Genina E. A., Bashkatov A. N., Kamenskikh I. D., Kolbenev I. O., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. OCT/LCT monitoring the drug effect on the human cornea structure *in vivo* // J. of Biomedical Photonics & Engineering. 2015. Vol. 1(1). P. 77–80.
 18. Larin K. V., Ghosn M. G., Bashkatov A. N., Genina E. A., Trumina N. A., Tuchin V. V. Optical clearing for OCT image enhancement and in-depth monitoring of molecular diffusion // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2012. Vol. 18(3). P. 1244–1259.
 19. Alekhin A. A., Ionin A. A., Kozhushko S. E., Kourlyyova I. M., Kudryashov S. I., Kuz'min K. K., Likhvansteva V. G., Samoylov M. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Zakharov S. D. *In vitro* femtosecond laser subsurface micro-disruption inside human cornea and pre-cleared sclera // Laser Physics Letters. 2010. Vol. 7(6). P. 463–466.
 20. Башкатов А. Н., Генина Э. А., Синичкин Ю. П., Кочубей В. И., Лакодина Н. А., Тучин В. В. Определение коэффициента диффузии глюкозы в склере глаза человека // Биофизика. 2003. Т. 48(2). С. 309–313.
 21. Genina E. A., Bashkatov A. N., Zubkova E. A., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. Measurement of Retinalamin diffusion coefficient in human sclera by optical spectroscopy // Optics and Lasers in Engineering. 2008. Vol. 46. P. 915–920.
 22. Генина Э. А., Башкатов А. Н., Тучин В. В., Гхоосн М. Г., Ларин К. В., Каменских Т. Г. Диффузия кортексина в склере глаза человека // Квантовая электроника. 2011. Т. 41(5). С. 407–413.
 23. Зубкина Е. А., Генина Э. А., Башкатов А. Н., Тучин В. В. Оптическое просветление тканей глаза // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2011. Т. 13(4). С. 588–594.
 24. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Lakodina N. A., Tuchin V. V. Study of osmotic liquids diffusion within sclera // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3908. P. 266–276.
 25. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Gavrilova A. A., Kamenskikh T. G., Galanzha V. A., Tuchin V. V. Optical clearing of human eye sclera under the action of glucose solution // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6535. 653515.
 26. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Kamenskikh T. G., Tuchin V. V. Optical clearing of human eye sclera // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7163. 71631R.
 27. Ghosn M. G., Tuchin V. V., Larin K. V. Nondestructive quantification of analyte diffusion in cornea and sclera using optical coherence tomography // Invest. Ophthalmol. & Vis. Sci. 2007. Vol. 48(6). P. 2726–2733.
 28. Ghosn M. G., Carbajal E. F., Befruj N. A., Tuchin V. V., Larin K. V. Differential permeability rate and percent clearing of glucose in different regions in rabbit sclera // J. Biomed. Opt. 2008. Vol. 13(2). 021110.
 29. Ghosn M. G., Carbajal E. F., Befruj N. A., Tuchin V. V., Larin K. V. Concentration effect on the diffusion of glucose in ocular tissues // Optics in Lasers in Engineering. 2008. Vol. 46. P. 911–914.
 30. Prahl S. A., van Gemert M. J. C., Welch A. J. Determining the optical properties of turbid media by using the adding-doubling method // Appl. Opt. 1993. Vol. 32(4). P. 559–568.
 31. Башкатов А. Н., Тучин В. В. Расчет фактора анизотропии склеры глаза человека в приближении скалярной теории дифракции // Проблемы оптической физики : материалы Междунар. молодежной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2000. С. 149–151.
 32. Tuchina D. K., Shi R., Bashkatov A. N., Genina E. A., Zhu D., Luo Q., Tuchin V. V. Ex vivo optical measurements of glucose diffusion kinetics in native and diabetic mouse skin // J. of Biophotonics. 2015. Vol. 8(4). P. 332–346.

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО РЕЖИМА В ТВИСТ-СТРУКТУРЕ С БОЛЬШИМ УГЛОМ ЗАКРУТКИ

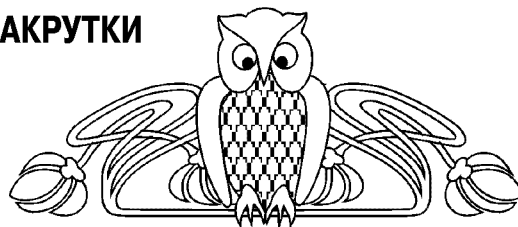
Г. В. Симоненко¹, С. А. Студенцов², В. А. Ежов³

¹Саратовский государственный университет

²ООО Научно-производственное предприятие «Фотон», Саратов

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: gvsim1960@hotmail.com



На основе анализа цветовых характеристик различных ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности черно-белого изображения. Для адекватного описания оптических свойств ЖК модулятора предложен необ-

ходимый набор трех характеристик: средний по спектру контраст модулятора; среднее по спектру пропускание модулятора для состояния «открыто»; ахроматичность модулятора для состояния «открыто». Выполнено компьютерное моделирование оптических



характеристик ЖК модулятора, работающего в волноводном режиме на основе ЖК структуры с углом закрутки 270° . Для подобного ЖК устройства найдены значения оптимальных параметров. **Ключевые слова:** ЖК модулятор, оптические характеристики, компьютерное моделирование.

The Liquid Crystal Modulator on the Basis of the Waveguide Mode in the Twist Structure with the High Twist Angle

G. V. Simonenko, S. A. Studentsov, V. A. Ehzov

On the basis of the analysis of color characteristics of different LC display units the criterion for an assessment of an unchromaticity of black-and-white images is entered. For the adequate description of the optical properties of the LC modulator the necessary set of three characteristics is offered: contrast of the modulator, average on a range; the average on a range passage of the modulator for a status «is opened»; a modulator achromatichnost is «open» for a status. Computer simulation of optical characteristics of LC modulator working in the waveguide mode on the basis of LC structure with twist angle 270° is executed. For this LC device values of optimum parameters are found.

Key words: LC modulator, optical characteristics, computer simulation.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-24-30

Введение

В настоящее время большинство мониторов используют жидкокристаллическую (ЖК) панель, работающую на основе электрооптического твист-эффекта с углом закрутки структуры 90° [1–4]. Преимущество этой жидкокристаллической технологии состоит в том, что ее стоимость невелика, а электрооптические характеристики ЖК устройств имеют высокие показатели. Поэтому подобные ЖК дисплеи сегодня являются самыми популярными. Заметим, что панели на твист-эффекте главным образом широко используются на рынке настольных дисплеев с размерами экрана от 15 до 28 дюймов [2]. Другой разновидностью ЖК панелей, получивших наиболее широкое применение, являются ЖК устройства небольшого размера (например, 190×54 мм), использующие явление интерференции поляризованных лучей в ЖК структурах с углами закрутки более 90° [5]. Как правило, такие устройства не являются черно-белыми или полноцветными, что ограничивает область их применения. С другой стороны, в литературе отсутствуют данные об использовании ЖК структур с большими углами закрутки, которые работают в волноводном режиме. Речь идет о структурах ЖК с углом закрутки 270° , которые используются обычно в режиме интерференции поляризованных лучей [6]. Под волноводным режимом в закрученной

структуре ЖК понимается явление вращения плоскости поляризации поляризованного света слоем ЖК, при котором угол поворота плоскости поляризации света равен углу закрутки структуры ЖК. Такая ориентационная структура ЖК по сравнению с «классической» твист-структурой отличается высокой степенью мультиплексирования при прочих равных параметрах [7], что позволяет использовать подобные ЖК панели для создания простых и дешевых полноцветных устройств малого и среднего размера. Поэтому целью данной работы является исследование оптических характеристик ЖК устройства типа оптического затвора, работа которых основана на использовании волноводного режима в ЖК структуре с углом закрутки 270° в зависимости от его конструктивных параметров. В задачи исследования входило определение минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК устройства для адекватного описания его оптических свойств, а также поиск оптимальных значений конструктивных параметров ЖК устройства. Для решения поставленных задач нами был применен метод компьютерного моделирования, который в силу сложности натурного эксперимента в технике ЖК устройств отображения информации является стандартным средством для этих целей [8, 9].

Оптические характеристики ЖК устройства

1. Стандартные оптические характеристики

Для адекватного описания характеристик ЖК устройства отображения или обработки информации с целью выбора оптимальной его конструкции обычно используется следующий набор оптических характеристик [7–9]:

- среднее по спектру или для определенных длин волн пропускание (отражение) ЖК устройства в состоянии «включено» или «выключено»;
- координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения для состояний «включено» или «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения или контраст для определенных длин волн;
- индикатриса среднего или на определенной длине волны контраста изображения.

Обычно [7] ЖК устройство характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний:

- 1) «выключено» – управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового;
- 2) «включено» – на затвор подано напряжение выше порогового значения.



Между этими двумя состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. В этом случае среднее по спектру пропускание устройства T_{off} для состояния «выключено» («включено» T_{on}) определим следующим образом [8, 9]:

$$T_{off} = \frac{\int_{400}^{800} T_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad T_{on} = \frac{\int_{400}^{800} T_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad (1)$$

где $T_{off(on)\lambda}$ – пропускание устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны λ ; I_{λ} – спектральное распределение источника излучения D_{65} (или какого-либо другого источника излучения); K_{λ} – спектральная чувствительность глаза.

Тогда средний по спектру контраст изображения C вычисляется [8, 9]:

$$C = \frac{T_{off}}{T_{on}}. \quad (2)$$

Координаты цвета (x, y) определяются с помощью известных выражений [10]:

$$\begin{aligned} x &= \int_{400}^{800} x(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad y = \\ &= \int_{400}^{800} y(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad (3) \\ G &= \int_{400}^{800} x(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} y(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \\ &+ \int_{400}^{800} z(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda, \end{aligned}$$

где $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ – кривые смещения трех основных цветов в цветовой системе координат (x, y, z) .

Индикатриса контраста – зависимость контраста изображения от угла падения φ и азимута ζ плоскости падения света. При этом азимут плоскости падения света обычно отсчитывается от направления ориентации молекул ЖК на фронтальной поверхности ЖК ячейки по часовой стрелке. Часто для характеристики угловой зависимости контраста вводят понятие угла обзора устройства Ψ . В нашем случае углом обзора ЖК устройства называется угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле падения света, для которых контраст изображения C не ниже определенного уровня [9].

2. Ахроматичность

Как правило, для характеристики цвета устройства применяются спектры пропускания и вычисленные на их основе цветовые координаты. Однако такой набор усложняет анализ влияния различных конструктивных параметров на оптические характеристики устройства. Известно, что для получения полноцветного изображения необходимо, чтобы во всем видимом диапазоне устройство имело одинаковый контраст. Поэтому нами предлагается поход к анализу цветовых характеристик устройства, основанный на понятии ахроматичности.

Обычно под ахроматичностью понимается отсутствие цвета у исследуемого объекта [11]; иными словами, ахроматичность соответствует цветовой разности между точкой белого цвета на цветовом треугольнике и точкой цвета данного объекта. Поэтому под ахроматичностью H мы будем понимать расстояние текущей цветовой точки устройства на цветовом треугольнике от точки белого цвета, например источника D_{65} , т.е.

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}, \quad (4)$$

где (x, y) – координаты цвета устройства, (x_{65}, y_{65}) – координаты источника D_{65} .

Источник D_{65} нами выбран из-за того, что его спектр излучения соответствует спектру естественного солнечного света. В качестве источника излучения может быть выбран любой другой источник, тогда для определения ахроматичности необходимо использовать цветовые координаты соответствующего источника оптического излучения. Теперь определим условие, при выполнении которого устройство можно будет считать ахроматичным. На рис. 1 показан цветовой треугольник в системе МКО XYZ 1931. Построим около точки D_{65} окружность такого радиуса, чтобы она вся целиком оставалась в области белого цвета W (на рис. 1 область Ah). Тогда все точки, которые находятся внутри этой окружности, будут считаться белыми (т.е. ахроматичными).

Из рис. 1 видно, что условием ахроматичности является

$$H \leq 0,05. \quad (5)$$

Поясним на примере смысл введения условия (5) для ахроматичности H . В таблице показаны оптические характеристики (средние по спектру пропускание в состоянии «выключено» (T_{off}) и контраст C , а также контрасты для определенных



длин волн, координаты цвета для состояния «выключено») для ЖК устройства, использующего различные электрооптические эффекты и имеющие сравнимые оптические характеристики. Наша цель – выбрать устройство, которое имеет одинаковую глубину модуляции во всем видимом диапазоне. Обычно для этой цели используется весь набор оптических характеристик ЖК затвора, перечисленный выше. Однако если ввести в рассмотрение понятие ахроматичности с соотношением (5), то достаточно ограничиться только сравнением значений среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» (или «включено»), среднего по спектру контраста и ахроматичности устройства для состояния «выключено» (или «включено»). В данном примере должно быть выбрано устройство с оптическими характеристиками, представленными во второй строке таблицы, так как значение ахроматичности для него существенно ниже и удовлетворяет соотношению (5).

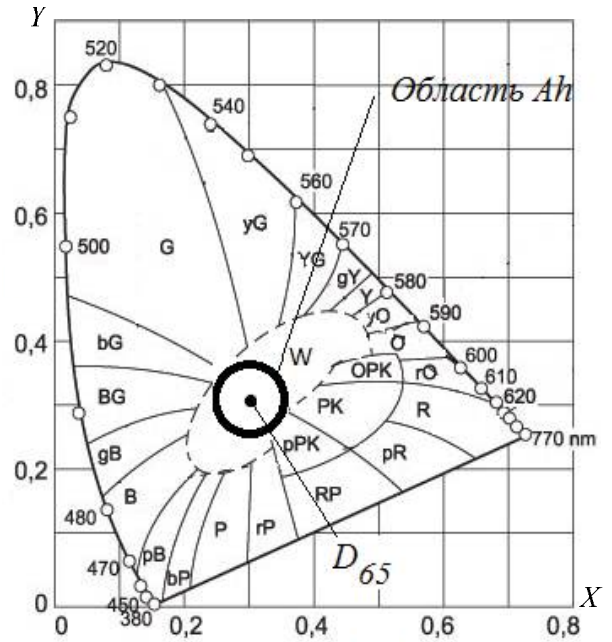


Рис. 1. Цветовой треугольник и понятие ахроматичности (рисунок взят из работы [12])

Оптические характеристики ЖК затвора

T_{off}	C	x	y	$C(\lambda = 450 \text{ нм})$	$C(\lambda = 550 \text{ нм})$	$C(\lambda = 660 \text{ нм})$	H
0.35	303	0.36	0.38	91	307	127	0.058
0.38	371	0.34	0.35	132	371	137	0.023

3. Необходимый набор характеристик

Исходя из вышеизложенного, для анализа цветowych характеристик чёрно-белого устройства (или полноцветного) нами предлагается использовать понятие ахроматичности совместно с соотношением (5). Отметим, что состояние устройства «выключено» или «включено», для которого вычисляются перечисленные выше характеристики, определяется тем, пропускает свет в этом состоянии устройство или нет. Для большинства ЖК устройств состояние «выключено» соответствует максимальному пропусканию, и контраст изображения в этом случае положительный. Исходя из этого, для анализа чёрно-белого ЖК устройства нами предлагается использовать следующий набор оптических характеристик:

- среднее по спектру пропускание ЖК устройства в состоянии «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения;
- ахроматичность устройства в состоянии «выключено» совместно с соотношением (5).

Отметим, что соотношение (5) для ахроматичности введено только для цветовой системы

координат XYZ МКО 1931, для других цветowych систем это условие должно быть изменено.

4. Конструктивные параметры ЖК затвора, влияющие его на оптические характеристики

Как известно [8–9, 13], существует большое число параметров ЖК устройства, которые определяют его электрооптические и оптические характеристики. Однако для большинства ЖК устройств характерно то, что у ЖК модулятора существует только два рабочих состояния: закрытое, когда излучение сквозь него не проходит; открытое, когда излучение должно проходить сквозь него с максимальным коэффициентом пропускания. Часто открытое состояние соответствует нулевому управляющему напряжению (или напряжению ниже порога Фредерикса), а закрытое состояние – управляющему напряжению значительно выше порогового напряжения. В этом случае открытое состояние соответствует состоянию «выключено», закрытое – «включено». В силу этого большинство физических и технических параметров не оказывают влияния на оптические характеристики ЖК затвора. Ис-



ключением являются четыре параметра, которые всегда определяют оптические характеристики затвора: толщина ЖК слоя (d); анизотропия показателя преломления ЖК (Δn); угол закрутки структуры ЖК (Φ_T); угол ориентации входного (или выходного) поляризатора (θ). Влияние величин углов Φ_T и θ на оптические характеристики в волноводном режиме обычно не учитывается, так как используются углы закрутки ЖК структуры, кратные нечетному числу 90° , а ориентации входного и выходного поляризаторов в этом случае всегда совпадают с направлением натирания на первой и второй подложках ЖК ячейки [7–8]. Кроме того, на оптические характеристики серьезное влияние оказывает отношение толщины ЖК слоя (d) к величине шага спирали ЖК структуры (p), что рассмотрено в данной работе.

В статье приведены данные по влиянию величин d , Δn и d/p на среднее по спектру пропускание в состоянии «выключено» T_{off} ЖК устройства, средний по спектру контраст и ахроматичность ЖК устройства в состоянии «выключено» H . В связи со сложностью натурального моделирования нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК затвора использовалась система компьютерного

моделирования *MOUSE-LCD* [14]. При моделировании электрооптических характеристик ЖК устройства использовались данные для ЖКМ ZLI 4792 [15] ($K_{11} = 10.5 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{22} = 6.9 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{33} = 16.8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\varepsilon_{\perp} = 4.88$, $\varepsilon_{\parallel} = 13.54$, $\Delta n(436 \text{ нм}) = 0.104$, $\Delta n(546 \text{ нм}) = 0.1$, $\Delta n(633 \text{ нм}) = 0.096$). Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными. При исследовании влияния величины оптической анизотропии на оптические характеристики ЖК устройства дисперсия показателей преломления принималась такой же, как у ЖК ZLI 4792. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° в зависимости от толщины ЖК слоя и оптической анизотропии. Зависимости $T_{off} = T_{off}(d)$ (см. рис. 2, а) и $C = C(d)$ (см. рис. 2, б) имеют вид кривых с максимумами, что объясняется тем, что условие волноводного режима для этой структуры выполняется только при условии $\Delta n \cdot d \approx 0.6$ мкм. Отклонение от этого

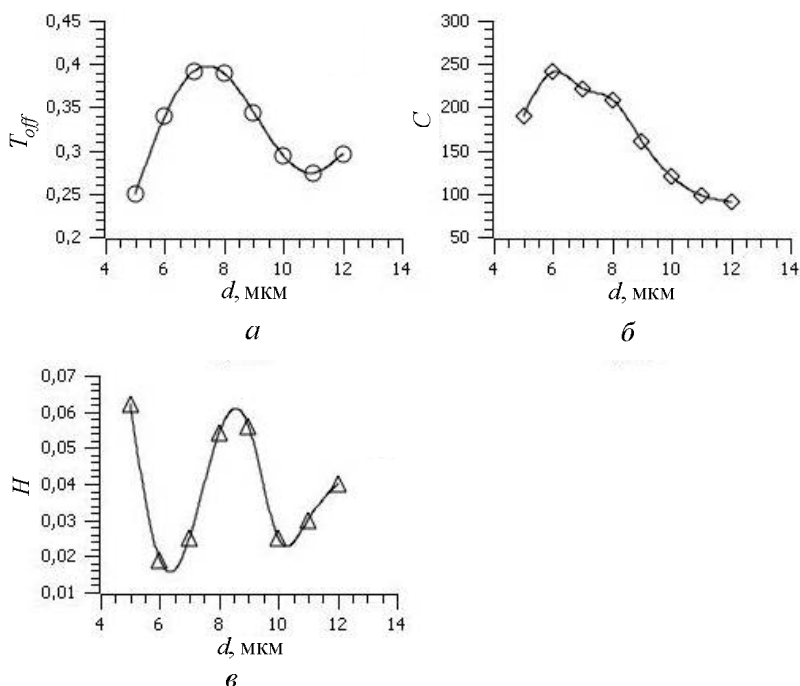


Рис. 2. Зависимость оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от толщины ЖК слоя: а – зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя; б – зависимость среднего по спектру контраста от толщины ЖК слоя; в – зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя

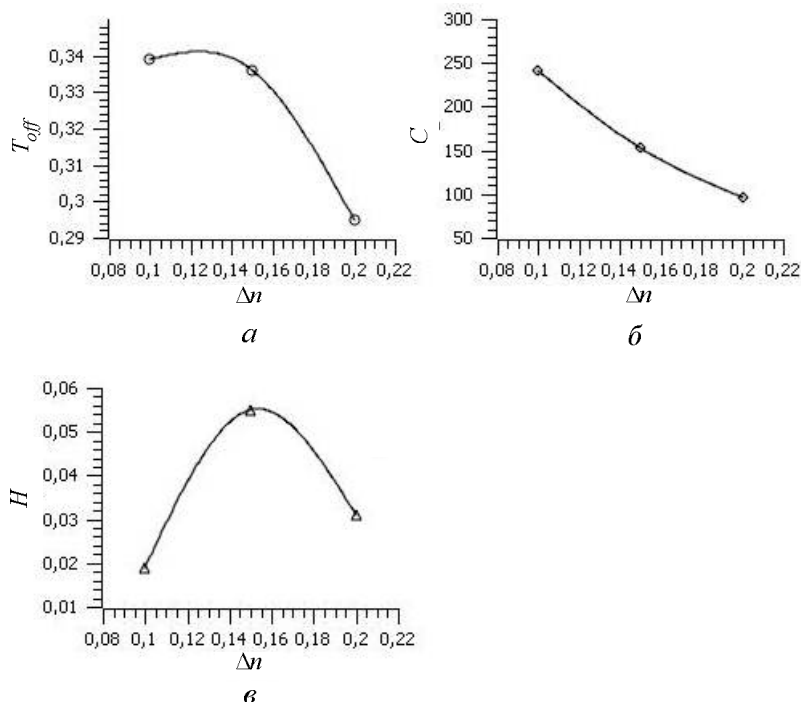


Рис. 3. Зависимость оптических характеристик твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от оптической анизотропии ЖК Δn : *а* – зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК; *б* – зависимость среднего по спектру контраста от оптической анизотропии ЖК; *в* – зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК

условия приводит как к уменьшению пропускания в состоянии «выключено», так и к падению контраста. Условие волноводного режима в этом случае не так критично к толщине ЖК слоя, как для классического твист-эффекта с 90° углом закрутки структуры. Отклонение толщины ЖК слоя от оптимального значения может составлять до ± 1 мкм. Ахроматичность устройства в состоянии «выключено» также не сильно зависит от d , и почти во всем диапазоне изменения толщины $H = 0.05 \pm 0.01$ (см. рис. 2, в).

Аналогичные выводы можно сделать относительно зависимости оптических характеристик такого модулятора от оптической анизотропии ЖК Δn . Отличие состоит в том, что интервал изменения Δn гораздо уже (см. рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость контраста твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от отношения толщины ЖК слоя d к шагу спирали p . Пропускание T_{off} и ахроматичность H от величины d/p не зависят, так как в состоянии «выключено» определяются только величиной $\Delta n \cdot d$, которая в данном случае постоянна. Зависимость контраста имеет вид кривой с мак-

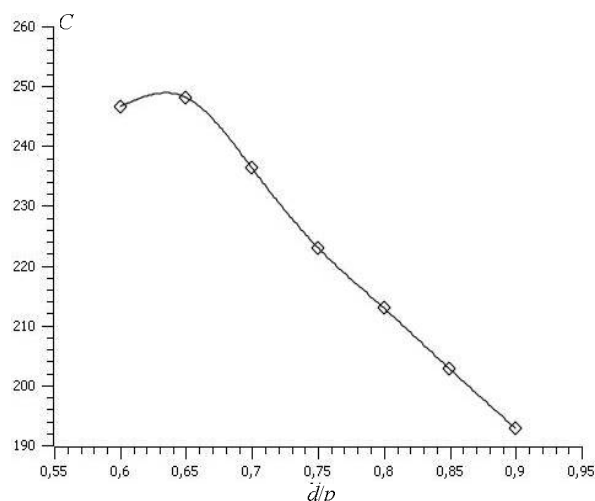


Рис. 4. Зависимость контраста твист-ячейки с углом закрутки структуры 270° от отношения толщины ЖК к шагу спирали структуры d/p

симумом, наличие которого объясняется тем, что при больших значениях d/p крутизна вольт-контрастной кривой меньше, чем при малых значениях указанного отношения. Поэтому слой ЖК более искажен при малых значениях d/p , то есть пропускание в состоянии «включено» имеет



меньшую величину. С другой стороны, изменение d/p до значений, соответствующих левой границе зоны Гранжана, приводит к появлению гистерезиса в вольт-контрастной кривой [7], поэтому в состоянии «включено» пропускание начинает расти. Поэтому кривая $C = C(d/p)$ имеет максимум.

Основные выводы

Выполненное исследование оптических характеристик ЖК затвора, работающего на основе волноводного режима в структуре ЖК с углом закрутки 270° , позволяет сделать следующие выводы.

1. На основе анализа цветовых характеристик ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности H черно-белого изображения.

2. Для различных конструкций ЖК устройств модуляции света предложен необходимый набор его оптических характеристик: среднее по спектру пропускание ЖК модулятора в состоянии «открыто»; средний по спектру контраст изображения; ахроматичность модулятора в состоянии «открыто» совместно с соотношением $H \leq 0,05$.

3. С помощью программного комплекса *MOUSE-LCD* выполнено компьютерное моделирование оптических характеристик ЖК устройства модуляции света, работающего на основе волноводного режима в ЖК структуре с углом закрутки 270° . Показано, что подобный ЖК модулятор имеет сравнимые с «классическим» твист-индикатором оптические характеристики, однако имеет более высокие значения степени мультиплексирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № RFMEFI60414X0032).

Список литературы

1. TN Panel Information. URL: <http://www.tnpanel.com/>
2. Simon Baker, Panel Technologies updated 17 March 2015. URL: http://www.tftcentral.co.uk/articles/panel_technologies.htm (дата обращения: 20.05.2015).
3. Пахомов С. Современные ЖК-мониторы // КомпьютерПресс. 2004. № 12. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688> (дата обращения: 20.05.2015).
4. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов. URL: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/> (дата обращения: 20.05.2015).
5. Каталог группы компаний ПРОМЭЛЕКТРОНИКА. URL: <http://www.promelec.ru/catalog/409/454/472/1> (дата обращения: 20.05.2015).
6. Deng-Ke, Wu Y. S. T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester : John Wiley & Sons, 2014. 592 p.
7. Сухариев А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М. : Радио и связь, 1991. 256 с.
8. Yakovlev D. A., Chigrinov V. G. Kwok Hoi-Sing Modeling and optimization of LCD optical performance. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2015. 578 p.
9. Simonenko G. V. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs // J. Optical Technology. 2014. Vol. 81, № 10. P. 594–598. Doi 10.1364/JOT81.000594.
10. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники : учебник для вузов. М. : Изд-во МГУПИ, 2002. 280 с.
11. Артюшин Л. Ф. Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии. М. : Искусство, 1970. 548 с.
12. Буданова А. Управление цветом комбинированного светодиодного RGB-источника света // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 32–35.
13. Симоненко Г., Тучин В., Зимняков Д. Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010. 210 с.
14. 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. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283> (дата обращения: 20.05.2015).
15. Merck prospect : Liquid Crystal Mixtures for Electro-Optic Displays . Darmstadt : Merck & Co, 1994. 54 p.