

УДК 535.361; 610.849.19; 618.723

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

АХРОМАТИЧНОСТЬ ЖК-МОДУЛЯТОРА ДЛЯ 3D ПРИЛОЖЕНИЙ

¹Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, 410012 Саратов, Россия. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

²ООО Научно-производственное предприятие «Фотон»,
пр. 50-летия Октября, 101, 410052 Саратов, Россия

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, д. 38, 119991 Москва, Россия

На основе анализа цветовых характеристик различных ЖК-устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности черно-белого изображения. Для адекватного описания оптических свойств ЖК-затвора предложен минимальный набор характеристик: средний по спектру контраст затвора; среднее по спектру пропускание затвора для состояния «открыто»; ахроматичность затвора для состояния «открыто». Выполнено компьютерное моделирование оптических характеристик ЖК затвора различного типа для 3D очков и найдены значения его оптимальных параметров.

Ключевые слова: ЖК-затвор, оптические характеристики, компьютерное моделирование.

DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.82

G. V. Simonenko¹, S. A. Studentsov², V. A. Ezhov³

ACHROMATICITY OF THE LC MODULATOR FOR 3D APPLICATIONS

¹Saratov State University,
Astrakhanskay str., 83, 410012 Saratov, Russia. E-mail: gvsim1960@hotmail.com

²Scientific and production enterprise «Photon» Ltd.,
50 anniversaries of October avenue, 101, 410052 Saratov, Russia

³A. M. Prokhorova General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilov str., 38, 119991 Moscow, Russia

Basing on the analysis of colour characteristics of different liquid crystal (LC) display units a criterion for the assessment of black-and-white image achromaticity is introduced. To describe the optical characteristics of a LC lock adequately we propose the minimal set of characteristics, consisting of the lock contrast (averaged over the spectrum), the lock transmission in the «open» state (averaged over the spectrum), and the lock achromaticity in the «open» state. The computer modelling of optical characteristics of different types of LC locks for 3D glasses is performed and the optimal parameters are determined.

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

Введение

Сейчас рынок жидкокристаллических (ЖК) панелей удивительно разнообразен. Несмотря на то, что это очень дорогое и сложное производство, количество производителей постоянно увеличивается, и одновременно появляются всё новые и новые разработки. В то же время в секторе промышленных панелей в основном доминируют отработанные и надёжные технологии, проверенные долгим использованием в суровых условиях [1]. В настоящее время ЖК-панели нашли свое применение как в области устройств отображения информации (ЖК-мониторы) [1–3], так и в области устройств преобразования (например, стерео очки для 3D приложений) [4]. Если для дисплейных приложений наибольшее распространение получили TN-, IPS- и MVA-матрицы [5, 6], то для применения в качестве модуляторов светового излучения чаще используются панели на основе π -ячеек [4]. При этом TN-ячейки (или твист – ячейки) так же используются в 3D приложениях, но имеют несколько худшие динамические характеристики. Заметим, что в последнее время очень большое внимание уделяется 3D приложениям [4, 7–11], поэтому мы остановимся на ЖК-затворах, применяемых для этих целей.

Одним из самых распространенных ЖК-устройств модуляции оптического излучения является ЖК-затвор, выполненный на основе твист-ячейки [12]. Другим не менее известным устройством для этих целей является ЖК-затвор, состоящий из одной или двух одинаковых π -ячеек с взаимно перпендикулярным расположением молекул ЖК на смежных поверхностях, помещенных между двумя скрещенными поляризаторами [4]. Во всех случаях закрытое состояние затвора реализуется тогда, когда обе π -ячейки находятся в одном состоянии (на обе ячейки подано одинаковое управляющее напряжение). При этом одна из ячеек является фазовым компенсатором для другой. Открытое состояние затвора достигается путем переключения одной из ячеек в другое состояние. Такая конструкция позволяет получить за счет управления равные времена реакции и релаксации, величина которых определяется только временами реакции составляющих устройство ячеек. Вполне понятно, что оптические характеристики ЖК-затвора, такие как контраст и пропускание

устройства сильно зависят от его реальной конструкции. Ранее были проведены исследования оптических характеристик твист – ячеек, одинарных и двойных π -ячеек с целью выявления основных причин, которые ограничивают максимально достижимые значения контраста и пропускания (см., например, [10, 11]). Однако стоит заметить, что в предшествующих исследованиях уделялось мало внимания такому важному вопросу как цветовые характеристики ЖК-затвора, хотя учет спектральных зависимостей был выполнен. В связи с этим нами выполнены исследования цветовых характеристик различных конструкций ЖК затвора с целью поиска устройства с максимально ахроматичным изображением. Ниже представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик ЖК-затвора для 3D приложений и выяснены основные факторы, ограничивающие максимально достижимые значения контраста, пропускания и ахроматичности изображения.

Оптические характеристики ЖК-затвора

Для адекватного описания характеристик ЖК-устройства отображения или обработки информации с целью выбора оптимальной его конструкции обычно используется следующий набор электрооптических и оптических характеристик [13–15]:

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

ЖК-затвор характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний: «выключено» – управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового; «включено» – управляющее напряжение 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:

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

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 так:

$$C = \frac{T_{off}}{T_{on}}.$$

Координаты цвета (x, y) определяются с помощью известных выражений [16]:

$$x = \frac{\int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{G}, \quad y = \frac{\int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{G},$$

$$G = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{z}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda,$$

где $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – 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.

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. Нами предлагается поход к анализу цветовых характеристик устройства основанный на понятии ахроматичности. Обычно под ахроматичностью понимается отсутствие цвета у исследуемого объекта [17], иными словами ахроматичность соответствует цветовой разности между точкой белого цвета на цветовом треугольнике и точкой цвета данного объекта [18]. Поэтому под ахроматичностью H мы будем понимать расстояние текущей цветовой точки устройства на цветовом треугольнике от точки белого цвета, например, источника D_{65} , то есть

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

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

В качестве источника излучения может быть выбран любой другой источник, тогда для определения ахроматичности необходимо использовать цветовые координаты соответствующего источника оптического излучения. Источник D_{65} нами выбран из-за того, что его спектр излучения соответствует спектру естественного солнечного света. Теперь определим условие, при выполнении которого устройство можно будет считать ахроматичным. На рис. 1 показан цветовой треугольник в системе МКО XVZ 1931 (рисунок взят из работы [19]). Построим около точки D_{65} окружность такого радиуса, чтобы она вся целиком оставалась в области белого цвета W (на рисунке область Ah). Тогда все точки, которые находятся внутри этой окружности, будут считаться белыми (т. е. ахроматичными). Из этого рисунка видно, что условием ахроматичности является

$$H \leq 0,05. \quad (1)$$

Поясним смысл введения условия (1) для ахроматичности H . В табл. 1 показаны оптические характеристики (средние по спектру пропускание в состоянии «выключено» (T_{off}) и контраст C , и контрасты для определенных длин волн, координаты цвета для состояния «выключено») для ЖК-затвора, использующего различные электрооптические эффекты и имеющие сравнимые оптические характеристики. Наша цель выбрать модулятор, который 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 условием (1), то достаточно ограничиться только сравнением значений среднего по спектру пропускания, среднего контраста и ахроматичности. В данном примере устройство с оптическими характеристиками, представленными во второй строке табл. 1, так как значение ахроматичности для него ниже.

Таким образом, для анализа цветowych характеристик черно-белого устройства нами предлагается использовать понятие ахроматичности совместно с условием ахроматичности (1). Исходя из этого, для анализа черно-белого ЖК-затвора нами предлагается использовать следующий набор оптических характеристик:

- среднее по спектру пропускание (отражение) ЖК-устройства в состоянии «открыто»;
- средний по спектру контраст изображения;
- ахроматичность устройства в состоянии «открыто» совместно с условием (1).

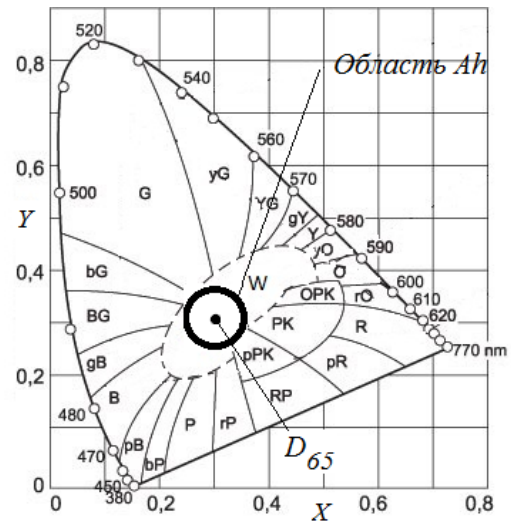


Рис. 1. Цветовой треугольник и понятие ахроматичности

Таблица 1. Оптические характеристики ЖК-затвора

T_{off}	C	x	y	$C(\lambda=450 \text{ нм})$	$C(\lambda=550 \text{ нм})$	$C(\lambda=460 \text{ нм})$	H
0,35	303	0,36	0,38	91	307	127	0,058
T_{off}	C	x	y	$C(\lambda=450 \text{ нм})$	$C(\lambda=550 \text{ нм})$	$C(\lambda=650 \text{ нм})$	H
0,38	371	0,34	0,35	132	371	137	0,023

Как известно [13, 14], существует большое число параметров ЖК-устройства, которые определяют его электрооптические и оптические характеристики, однако для ЖК-затвора характерно то, что у него 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 соответствует управляющему напряжению значительно выше порогового напряжения. Поэтому в этом случае большинство физических и технических параметров не оказывают влияние на оптические характеристики ЖК-затвора. Исключением являются четыре параметра, которые всегда определяют оптические характеристики затвора: толщина слоя ЖК (d); анизотропия показателя преломления ЖК (Δn); угол закрутки структуры ЖК

(Φ_T); угол ориентации входного (или выходного) поляризатора (θ). Нами рассмотрено влияние толщины слоя ЖК, величины оптической анизотропии ЖК и угла ориентации входного поляризатора на среднее по спектру пропускание ЖК-затвора в состоянии «выключено», средний по спектру контраст и ахроматичность ЖК-затвора. Для поиска оптимальной конструкции ЖК-затвора рассмотрены следующие устройства: одинарная π -ячейка с малым углом закрутки; двойная π -ячейка с малым углом закрутки при перпендикулярном расположении ЖК-ячеек; π -ячейка с большим углом закрутки; двойная π -ячейка с большим углом закрутки при перпендикулярном расположении ЖК-ячеек; двойная π -ячейка с малым и большим углами закрутки при угловом расположении ЖК-ячеек; стандартная твист-ячейка. В связи со сложностью натурального моделирования нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-затвора использовалась система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD* [20].

При моделировании электрооптических характеристик ЖК-устройства использовались данные для ЖКМ ZLI 4792 [21] ($K_{11} = 10,5 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$ дин, $K_{33} = 16,8 \cdot 10^{-6}$ дин, $\varepsilon_{\perp} = 4,88$, $\varepsilon_{\parallel} = 13,54$, Δn (436 нм) = 0,104; Δn (546 нм) = 0,1; Δn (633 нм) = 0,096). Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными. При исследовании влияния величины оптической анизотропии на электрооптические характеристики ЖК-устройства дисперсия была оставлена такой же как у ZLI 4792, а пропорционально изменялась только величина оптической анизотропии. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования.

Результаты и обсуждение

Зависимости средних по спектру контраста и пропускания в состоянии «выключено» от толщины слоя ЖК и оптической анизотропии ЖК для всех типов ЖК-затворов имеют один и тот же вид. Если для ЖК-затворов на основе π -ячеек все зависимости ($C = C(d)$ и $C = C(\Delta n)$, а так же $T_{off} = T_{off}(d)$ и $T_{off} = T_{off}(\Delta n)$) имеет вид функции с одним максимумом, то для ЖК-затворов на основе твист-ячеек зависимости $C = C(d)$ и $C = C(\Delta n)$ являются функциями с одним максимумом, а среднее по

спектру пропускание в состоянии «выключено» не зависит от толщины ЖК и его оптической анизотропии. На самом деле данные оптические характеристики ЖК-затворов определяются не отдельными величинами d или Δn , а их произведением, то есть величиной $(\Delta n \cdot d)$, которая называется оптической толщиной ЖК-слоя [13, 14]. В табл. 2 представлены оптические характеристики различных ЖК-затворов для оптимального набора параметров устройств.

Разделение одной зависимости оптических характеристик от оптической толщины на две от толщины ЖК-слоя и его оптической анизотропии объясняется технологией производства ЖК-ячеек, так как выбор ЖК-вещества ограничен, а толщину ЖК-слоя можно всегда сделать такой, которая необходима для реализации той или иной задачи. Для обеспечения минимальных времен реакции и релаксации используются тонкие ($\approx 2-3$ мкм) слои ЖК [12, 14, 22]. Поэтому для достижения оптимальных значений оптических характеристик ЖК-затворов, необходимо использовать ЖК с малой величиной оптической анизотропии для π -ячеек с $\Phi_T = 0^\circ$, в то время как для π -ячеек с $\Phi_T = 180^\circ$ необходимо применять ЖК с высокой оптической анизотропией, а для твист-ячеек с промежуточным значением Δn .

Таблица 2. Оптические характеристики различных конструкций ЖК-затвора

	π -ячейка с $\Phi_T \approx 0^\circ$		π -ячейка с $\Phi_T \approx 180^\circ$		Твист-ячейка
	Одинарная	Двойная	Одинарная	Двойная	
$T_{max}, \%$	>35	>35	>35	>35	>37
C	25:1	320:1	300:1	350:1	375:1
H	0,04	0,055	0,12	0,085	0,035
Оптимальная величина $(\Delta n \cdot d)$, мкм	0,225	0,225	0,6	0,6	0,525

На рис. 2 и 3 представлены зависимости ахроматичности ЖК-затвора различной конструкции в состоянии «выключено» от толщины ЖК и его оптической анизотропии. На рисунках не показаны данные для устройств на базе двойных π -ячеек, так как зависимости $H = H(d)$ и $H = H(\Delta n)$ слабые, а величина ахроматичности для двойных π -ячеек (как с $\Phi_T = 0^\circ$, так и с $\Phi_T = 180^\circ$) меньше ахроматичности одинарных ячеек. Кроме того значения ахроматичности для ЖК-затворов на основе твист-ячейки и двойных

π -ячеек во всех диапазонах изменения параметров d и Δn удовлетворяют условию $H \leq 0,05$. Для твист-ячейки это объясняется тем, что для нее выполняется условия режима Могена [12–14, 22], и в этом случае ахроматичность не зависит от толщины ЖК и его оптической анизотропии, а определяется только оптическими свойствами поляризаторов. Для ЖК-затворов на базе двойных π -ячеек это объясняется фазовой компенсацией, которая обеспечивается наличием второй идентичной ячейки в конструкции затвора.

Ахроматичность ЖК-затвора на основе одинарной π -ячейки (как с $\Phi_T = 0^\circ$, так и с $\Phi_T = 180^\circ$) достаточно сильно зависит как от d , так и от Δn . Это объясняется тем, что в этом случае ЖК-затвор работает в режиме интерференции поляризованных лучей, для которого

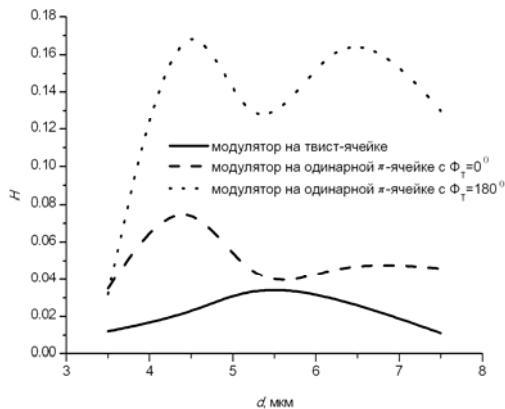


Рис. 2. Зависимость ахроматичности H ЖК-затвора от толщины слоя ЖК

В ЖК-затворах на π -ячейках используются структуры с различными углами закрутки, поэтому нами было рассмотрено влияние отклонения угла закрутки от первоначального значения в котором диапазоне. Оказалось, что изменение угла закрутки структуры ЖК Φ_T в пределах от 0° до $\pm 10^\circ$ не сильно (в пределах $\pm 5\%$) влияют на значения всех оптических характеристик ЖК-затвора (как для одинарной ячейки, так и для двойной ячейки). При этом оптимальной ЖК-структурой является ориентации при 0° угле закрутки. Отметим, что влияние на оптические характеристики устройства такого параметра как отношение шага (p) спирали ЖК к толщине слоя крайне мало и его можно считать несущественным. Для затворов на π -ячейках с $\Phi_T = 180^\circ$ изменение угла закрутки структуры ЖК Φ_T в пределах $180^\circ \pm 5^\circ$ также не сильно влияют на значения всех оптических характеристик ЖК-затвора (как для одинарной ячейки, так и для двойной ячейки). При этом оптимальной ЖК-структурой является ориентации при 180° угле закрутки. Вместе с этим влияние на оптические характеристики устройства такого параметра как отношение шага (p) спирали ЖК к толщине слоя

зависимость оптических характеристик, включая цветовые, от этих параметров является определяющей [12–14, 22]. Тем не менее, существуют области изменения d и Δn , для которых величина ахроматичности не превышает 0,05.

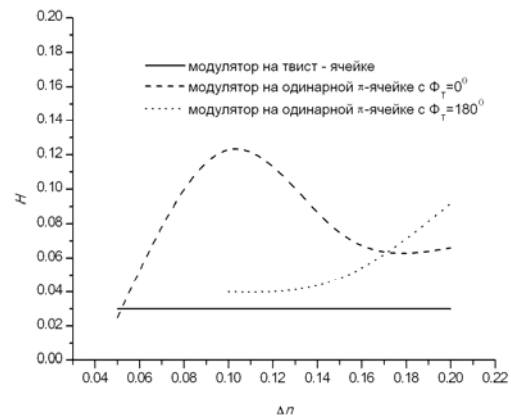


Рис. 3. Зависимость ахроматичности H ЖК-затвора от оптической анизотропии ЖК

крайне мало и его можно считать несущественным. Однако с точки зрения получения оптимальных значений оптических характеристик ЖК-затвора наиболее выгодна ЖК-структура с $\Phi_T = 180^\circ$ и $d/p = 0,3$.

Влияние отклонения угла ориентации входного поляризатора θ ЖК-затвора от его стандартной ориентации на его оптические характеристики показано на рис. 4 и 5. Напомним, что стандартной ориентацией входного поляризатора для твист-ячейки считается, когда направление ориентации на входной подложке совпадает с направлением поляризации входного поляроида ($\theta = 0^\circ$) [13]. Для затвора на π -ячейке стандартной ориентацией входного поляроида является $\pm 45^\circ$ к направлению натирания на входной подложке [12]. Отметим, что самым существенным образом величина угла ориентации поляризации входного поляризатора влияет на контраст изображения, при этом зависимость $C = C(\theta)$ хорошо описывается функцией Лоренца (рис. 4):

$$C(\theta) = C_0 + \frac{2\theta_M}{\pi} \cdot \frac{\theta_2}{4(\theta - \theta_c)^2 + \theta_2^2},$$

где параметры C_0 , θ_M , θ_c , θ_2 определяют форму и полуширину кривой.

В таблице 3 показаны параметры функции Лоренца $C = C(\theta)$ для ЖК-затвора различной конструкции. На рис. 5 показана зависимость $H = H(\theta)$. Влияние угла отклонения ориентации входного поляроида на

ахроматичность также велико, но не столь критично, так как изменение этого угла в пределах полуширины кривой Лоренца $C = C(\theta)$, не приводят к фатальным изменениям ахроматичности изображения.

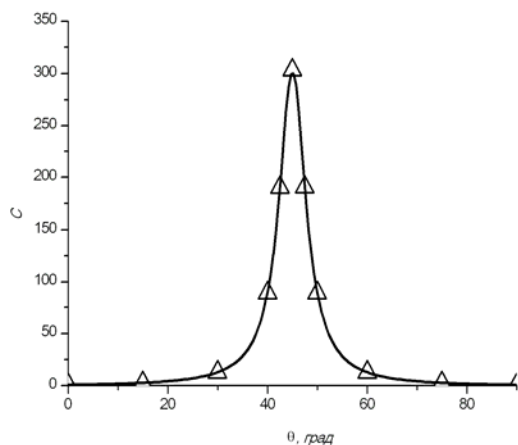


Рис. 4. Типичная зависимость среднего по спектру контраста изображения ЖК-затвора на π -ячейке от угла ориентации входного поляризатора

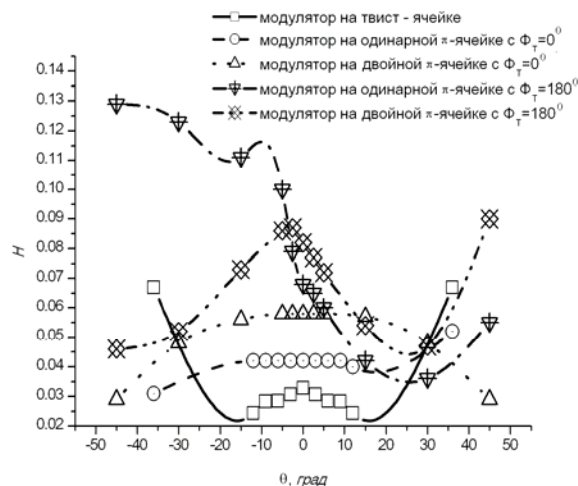


Рис. 5. Зависимость ахроматичности H ЖК-затвора от угла ориентации входного поляризатора

Таблица 3. Параметры функции Лоренца для различных конструкций ЖК-модулятора

	C_0	θ_c	θ_2	θ_M
Твист-ячейка	$-1,83 \pm 0,14$	$0 \pm 0,006$	$5,68 \pm 0,01$	$2892 \pm 6,8$
одинарная π -ячейка с $\Phi_T = 0^0$	$0,68 \pm 0,05$	$45 \pm 0,03$	$24 \pm 0,14$	$927 \pm 6,3$
двойная π -ячейка с $\Phi_T = 0^0$	$-0,6 \pm 0,013$	$45 \pm 0,003$	$6,58 \pm 0,001$	$3100 \pm 0,5$
одинарная π -ячейка с $\Phi_T = 180^0$	$-0,34 \pm 0,27$	$45 \pm 0,006$	$5,93 \pm 0,019$	$3209 \pm 9,5$
двойная π -ячейка с $\Phi_T = 180^0$	$-0,59 \pm 0,01$	$45 \pm 0,003$	$6,48 \pm 0,001$	$3100 \pm 0,46$

Заключение

На основе анализа цветовых характеристик различных ЖК-устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности H черно-белого изображения. Кроме этого для различных конструкций ЖК-затвора предложен минимальный набор его оптических характеристик: среднее по спектру пропускание ЖК-устройства в состоянии «открыто»; средний по спектру контраст изображения; ахроматичность устройства в состоянии «открыто» совместно с условием $H \leq 0,05$. С помощью программного комплекса *MOUSE-LCD* выполнено компьютерное

моделирование оптических характеристик ЖК-затворов различного типа для 3D очков и найдены значения их оптимальных параметров. Показано, что ЖК-затвор, выполненный на основе «стандартной» твист-ячейки, имеет наилучшие оптические характеристики. Однако если принимать во внимание динамику переключения ЖК-затвора, то наилучшей является конструкция на основе π -ячейки с углом закрутки структуры в 180° .

Данная работа осуществлялась при финансовой поддержке Министерства Образования и науки Российской Федерации (грант № RFMEFI60414X0032).

Список литературы / References

1. Матешев И., Туркин А. Обзор современных технологий производства ЖК-матриц // Современная электроника. 2014. № 8. С. 16–19 [Mateshev I., Turkin A. Obzor sovremennih technologyi proizvodstva ZhK-matrits (Review of the modern production technologies of LCD matrixes) // Sovremennaya elektronika (Modern electronics). 2014. № 8. P. 16–19 (in Russian)].
2. Туркин А. ЖК-панели Sharp для промышленного применения: основные особенности и обзор продукции // Компоненты и технологии. 2012. № 3. С. 80–82 [Turkin A. ZhK-paneley Sharp dlya promyshlennogo primeneniya: osnovnie osobennosti i obzor produktsii (Sharp LCD panels for industrial application: main features and review of production) // Komponenti i tehnologii (Components and technologies). 2012. №3. P. 80–82 (in Russian)].
3. Матешев И., Туркин А. Обзор новых ЖК-панелей Sharp для промышленного применения // Современная электроника. 2014. № 5. С. 22–25 [Mateshev I., Turkin A. Obzor novih ZhK-paneley Sharp dlya promyshlennogo proizvodstva (The review of new LCD panels of Sharp for industrial application) // Sovremennaya elektronika (Modern electronics). 2014. № 5. P. 22–25 (in Russian)].
4. Самарин А. Лучшие дисплейные продукты 2008 года // Компоненты и технологии. 2008. № 8. С. 10–13 [Samarin A. Luchie displaynie produkti 2008 goda (The best display products of 2008) // Komponenti i tehnologii (Components and technologies). 2008. № 8. P. 10–13 (in Russian)].
5. Пахомов С. Современные ЖК-мониторы. КомпьютерПресс. 2004. № 12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688> [Pakhomov S. Sovremennie ZhK-monitory (The modern LCD monitors). KomputerPress (Computerpress). 2004. № 12. Available at: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688> (in Russian)].
6. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/> [Vyalkov D. Sravnenie tipov matrits ZhK (LCD-, TFT-) monitorov (Comparison of types of matrixes of LC (LCD-, TFT-) monitors. Available at: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/> (in Russian)].
7. Woods A. J. Crosstalk in stereoscopic displays: a Review // Journal of Electronic Imaging. 2012. Vol. 21, Iss. 4. P. 040902 – 04.
8. Пат. № RU 2490818 Российская Федерация. Автостереоскопический дисплей с полноэкранным 3d разрешением (варианты) и способ управления активным параллаксным барьером дисплея / Ежов В. А.; М., 2012 [Russian patent RU 2490818. Avtostereoskopicheskiy diplay s polnoekranim 3d razresheniem (vaianti) i sposob upravleniya aktivnim paralaksnim bar'erom display (The autothree-dimensional display with the full-screen 3d permission (options) and a way of management of an active parallax barrier of the display) / Ezhov V.A.; M., 2012 (in Russian)].
9. Пат. № RU 2488150 Российская Федерация. Мультистандартные жидкокристаллические стереочки / Студенцов С. А., Ежов В. А.; М., 2011 [Russian patent № RU 2488150. Mul'tistandartnie zhidokristallicheskie ochki (Multistandard liquid crystal stereo glasses) / Studetsov S.A., Ezhov V.A.; M., 2011 (in Russian)].
10. Симоненко Г. В., Студенцов С. А., Ежов В. А. Выбор оптимальной конструкции оптического затвора на π -ячейке // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 9. С. 18–22 [Simonenko G. V., Studentsov S. A., Ezhov V. A. Choosing the optimum design for an optical shutter based on a π -cell // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80, № 9. P. 537–541. Doi: 10.1364/JOT.80.000537].
11. Симоненко Г. В. Анализ различных конструкций оптического жидкокристаллического затвора // Оптический журнал 2014. Т. 81, № 10. С. 50–55 [Simonenko G. V. Analysis of various liquid-crystal optical-shutter designs // Journal of Optical Technology. 2014. Vol. 81, № 10. P. 594–598. Doi: 10.1364/JOT.81.000594].
12. Deng-Ke, Wu Y.S.T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 592 p.
13. Сухарьер А. С. Жидкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь, 1991. 256 с. [Sukharier A. S. Zhidkokristallicheskie indicatory (Liquid crystal displays). Moscow: Radio i Svyaz, 1991. 256 p. (in Russian)].
14. Chigrinov V. G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Boston-London: Artech House, 1999. 359 p.
15. Симоненко Г., Тучин В., Зимняков Д. Оптические характеристики жидкокристаллических и биологических сред. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2010. 210 с. [Simonenko G., Tuchin V., Zimnyakov D. Opticheskie kharakteristiki zhidkokristallicheskih i biologicheskikh sred (Optical characteristics of the liquid crystal and biological medias). LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2010. 210 p. (in Russian)].
16. Шашлов А. Б., Уварова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники: учебник для вузов. М.: МГУП, 2002. 280 с. [Shashlov A. B., Uvarova R. M., Churkin A. V. Osnovy svetotekhniki: Uchebnik dlya vuzov (Lighting engineering bases: The textbook for higher education institutions). Moscow: MGUP Publisher, 2002. 280 p. (in Russian)].

-
-
17. *Артюшин Л. Ф.* Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии. М. : Искусство, 1970. 548 с. [*Artuyashin L. F.* Osnovy vosproizvedeniya tsveta v photographii, kino i poligraphii (Bases of reproduction of color in the photo, cinema and polygraphy). Moscow : Iskusstvo, 1970. 548 p. (in Russian)].
 18. *Мешков В. В.* Основы светотехники. Часть 2. М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. 399 с. [*Meshkov V. V.* Osnovy svetotekhniki. Chast 2. (Lighting engineering bases. Part 2.). Moscow – Leningrad : Gosenergoizdat, 1961. 399 p. (in Russian)].
 19. *Буданова А.* Управление цветом комбинированного светодиодного RGB-источника света // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 32–35 [*Budanova A.* Upravlenie tsvetom kombinirovannogo RGB-istochnika sveta (Management of color of the combined LED RGB light source) // Poluprovodnikovaya svetotekhnika (Semiconductor lighting engineering). 2010. № 3. P. 32–35 (in Russian)].
 20. *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. Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=884283>.
 21. Merck prospect: Liquid Crystal Mixtures for Electro-Optic Displays. Darmstadt : Merck & Co, 1994. 54 p.
 22. *Lueder E.* Liquid Crystal Displays : Addressing Schemes and Electro-Optical Effects. Chichester : John Wiley & Sons, 2010. 516 p.

Поступила в редакцию 22.06.2015 г.