

УДК 535.51; 535.56; 681.7

В. А. Ежов¹, И. Н. Компанец²

МЕТОД ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ СЖК-ЗАТВОРОМ ПРИ НЕРАВНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЕГО ОТКРЫТОГО И ЗАКРЫТОГО СОСТОЯНИЙ

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук
ул. Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия. E-mail: ezhov@3dstereo.ru

²Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
Ленинский проспект, 53, 119991 Москва, Россия

Оптические затворы с сегнетоэлектрическим жидким кристаллом (СЖК) обладают малыми переходными временами и обеспечивают точную селекцию импульсных световых потоков миллисекундной длительности. Однако в случаях, когда СЖК-затвор должен работать с неравной длительностью открытого и закрытого оптических состояний, использование традиционного метода электронного управления затвором ведет к нарушению его работоспособности. В этом случае через СЖК-затвор протекает средний (за период управления) постоянный ток, создающий в СЖК-слое остаточный объемный ионный заряд, электрическое поле которого искажает действие управляющего электрического поля на СЖК-молекулы.

В статье описан предлагаемый авторами метод решения указанной проблемы. Сущность метода – управляющий электрический сигнал, соответствующий более длительному оптическому состоянию СЖК-затвора, составляется из последовательности коротких импульсов. Это обеспечивает взаимное выравнивание средней энергии положительных и отрицательных управляющих сигналов и, как следствие – минимизацию (обнуление) сквозного постоянного тока. Приведены соотношения между временными параметрами СЖК-затвора и последовательностью коротких импульсов, обеспечивающие требуемое действие последних с сохранением заданной (исходной) формы временного оптического отклика СЖК-затвора. Экспериментально проверена принципиальная работоспособность метода. Описаны физические свойства и субстанция СЖК-слоя затвора, использованного в экспериментах.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический жидкий кристалл, СЖК, оптический затвор, ионный заряд, управляющее напряжение.

DOI: 10.18083/LCAppl.2019.2.57

V. A. Ezhov¹, I. N. Kompanets²

ELECTRONIC CONTROL METHOD FOR OPTICAL FERROELECTRIC SHUTTER AT UNEQUAL DURATION OF ITS OPEN AND CLOSED STATES

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov St., Moscow, 119991, Russia. E-mail: ezhov@3dstereo.ru

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
53 Leninsky Prosp., Moscow, 119991, Russia

Optical shutters based on ferroelectric liquid crystal (FLC) possess small transition times and provide accurate selection of pulsed light fluxes of millisecond duration. However, when an optical FLC-shutter must work with unequal duration of the open and closed optical states, the use of the traditional method of electronic control causes dysfunction. In this case, an average (during the control period) direct current begins to flow through the FLC shutter creating a residual volumetric ion charge in the FLC layer. The electric field of this charge distorts the action of the control electric field on the FLC molecules.

The article describes the proposed method of solving the indicated problem. The essence of the method: the control electrical signal corresponding to the longer optical state of the FLC shutter is composed of a sequence of short pulses. This provides mutual equalization of the average energy of positive and negative control signals and, as a consequence - minimizing (zeroing) the direct current. The relations between the time parameters of the FLC shutter and the additional pulses, ensuring the required action of them with preservation of a given (initial) form of the temporal optical response of the FLC shutter are given. The principal operability of the method was experimentally tested. Physical properties and the substance of the FLC shutter layer used in the experiment are described.

Key words: ferroelectric liquid crystal, FLC, optical shutter, ion charge, control voltage.

Введение

СЖК-затворы с низким управляющим напряжением и высокой частотой переключения [1, 2] востребованы, например, в высокоскоростных стереоскопических очках [3] с малым энергопотреблением, для безочкового наблюдения стереоизображений с помощью дистанционного бинокулярного фильтра [4]. Однако во избежание нарушения работоспособности любого СЖК-затвора необходимо обеспечить минимальное (нулевое) значение среднего электрического тока, протекающего сквозь СЖК-слой за время периода электронного управления.

В общем случае электрический ток сквозь СЖК-затвор состоит из четырех основных частей [5]. Первая часть сквозного тока обусловлена зарядкой и разрядкой электрического конденсатора, в котором СЖК-слой является диэлектриком, а обкладками конденсатора служат прозрачные электроды на поверхностях стеклянных подложек. Вторая часть тока (часто скрытая внутри первой) вызвана

электроклинным эффектом в СЖК-слое [6]. Третья часть тока обусловлена периодическим изменением направления спонтанной сегнетоэлектрической поляризации при переключении затвора. Четвертая часть тока связана с электролитическими процессами в СЖК-слое. Растворенные в СЖК-веществе заряженные примеси перемещаются от одного электрода к другому под действием управляющих электрических полей и могут участвовать в приэлектродных реакциях.

Основной причиной нарушения работоспособности СЖК-затвора являются паразитные электрические поля от ионов, накопленных в слое СЖК-вещества [7]. Любые ЖК-слои практически всегда содержат некоторую концентрацию ионных частиц. Даже в случае очень чистого исходного ЖК-материала ионы могут появиться в нем из примыкающих к ЖК-слою изолирующих и ориентирующих слоев в результате, например, процесса механического натирания ориентирующих слоев, а также вследствие воздействия на слои электрического напряжения или ультрафиолетового излучения.

Проблема возникновения сквозного тока возникает при использовании традиционного метода электронного управления любым СЖК-затвором в случае неравной длительности его открытого и закрытого оптических состояний, например, при узких импульсах открытого состояния и широких импульсах закрытого состояния (рис. 1).

Для получения открытого состояния СЖК-затвора необходимо прикладывать (средняя диаграмма) узкие импульсы управляющего напряжения одной полярности (для определенности, напряжение $+U_c$ положительной полярности), а

для получения закрытого состояния – широкие импульсы управляющего напряжения – U_c отрицательной полярности. Поскольку средняя (за период T электронного управления) энергия узких положительных управляющих импульсов существенно меньше средней энергии широких отрицательных управляющих импульсов, то сквозь СЖК-слой будет протекать средний (за период T) ток одного и того же направления с величиной, пропорциональной разнице в величинах средней энергии положительных и отрицательных импульсов.

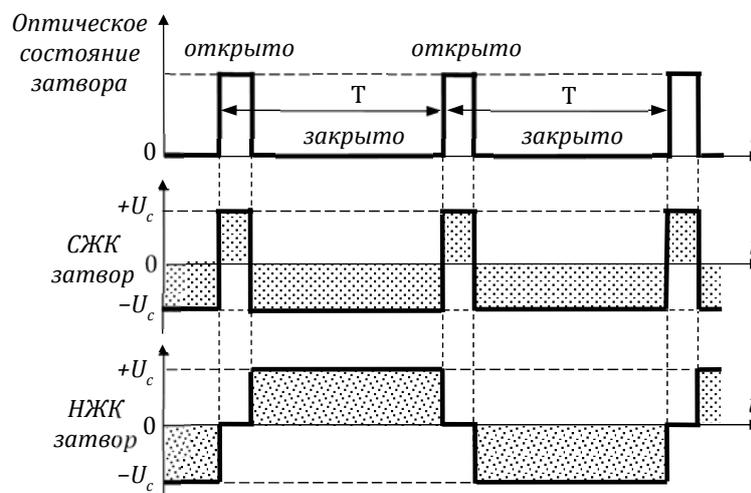


Рис. 1. Электронное управление СЖК и НЖК затворами при неодинаковой длительности открытого и закрытого состояний затворов

Fig. 1. Electronic control of FLC and NLC shutters at unequal durations of the open and closed states of shutters

В отличие от СЖК-затвора оптическое пропускание затвора на нематических жидких кристаллах (НЖК) определяется только абсолютным значением (модулем) $|U_c|$ управляющего напряжения. Как правило, низкое (или нулевое) абсолютное значение управляющего напряжения задает открытое, а высокий уровень напряжения – закрытое состояние НЖК-затвора (нижняя диаграмма на рис. 1). Поэтому достаточно в одних (например, нечетных) периодах использовать напряжение положительной полярности, а в других (четных) – напряжение той же формы отрицательной полярности, чтобы получить в среднем за два смежных периода T нулевой сквозной ток через НЖК-затвор, поскольку нет разницы в средней энергии положительных и отрицательных управляющих импульсов одинаковой ширины.

Однако из-за недостаточного быстродействия стандартные НЖК-затворы неэффективно использовать при работе с импульсными световыми потоками с длительностью в несколько миллисекунд (рис. 2).

На рисунке 2, а представлен типичный временной оптический отклик НЖК-затвора при подаче на него управляющих импульсов напряжения длительностью 10 мс. Время открытия НЖК-затвора равно длительному времени самопроизвольной релаксации ($\tau_{relax} \approx 2$ мс) НЖК-слоя при скачкообразном переходе от высокого к низкому (нулевому) уровню управляющего напряжения, а время закрытия НЖК-затвора равно короткому времени его реакции ($\tau_{rise} \approx 0,4$ мс) на скачкообразное повышение управляющего напряжения.

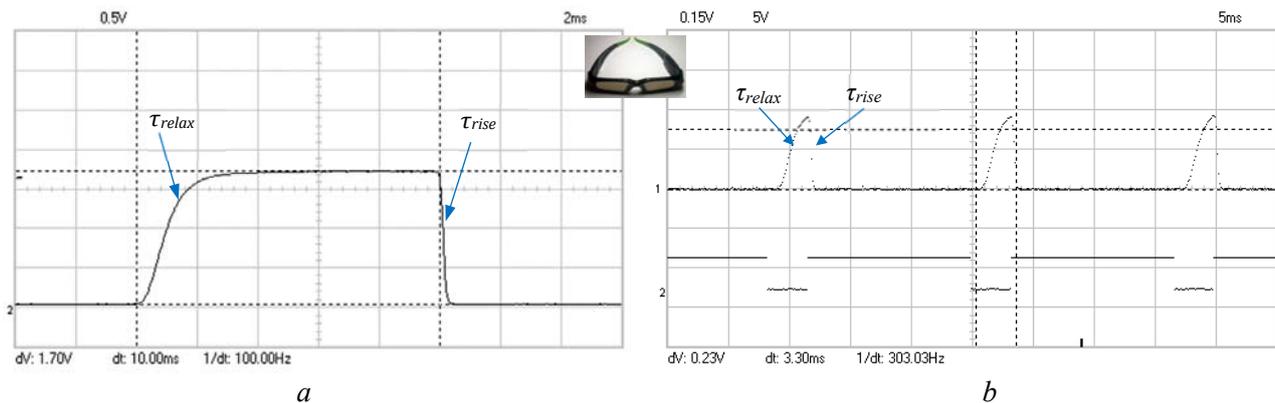


Рис. 2. Осциллограммы временного оптического отклика НЖК-затвора стереочков при разной длительности импульсов управляющего напряжения: *a* – длительность 10 мс, *b* – длительность 3,3 мс
 τ_{relax} – время релаксации НЖК слоя, τ_{rise} – время реакции НЖК слоя

Fig. 2. Oscillograms of the temporal optical response of the NLC shutter of stereo glasses at different duration of the control image pulses: *a* – 10 ms duration, *b* – 3,3 ms duration, τ_{relax} – relaxation time of the NLC layer, τ_{rise} – rise time of the NLC layer

В наиболее распространенной стереоскопической компьютерной системе *3D Vision* при использовании ЖК-дисплейных экранов длительность τ_{image} воспроизведения изображения каждого ракурса отображаемой трехмерной (3D) сцены составляет всего около 3,3 мс при кадровой частоте 120 Гц, а остальное время кадра (около 5 мс) используется только для предварительного ввода последующего изображения) [8]. Поскольку при селекции изображений длительностью $\tau_{image} \approx 3,3$ мс НЖК-затвор успевает открыться практически только наполовину (рис. 2, *b*), яркость соответствующего стереоизображения, наблюдаемого в НЖК-стереочках, существенно снижена по сравнению с яркостью ракурсных изображений 3D сцены, воспроизводимых дисплейным экраном.

Использование быстродействующих СЖК-затворов в подобной стереоскопической системе позволит перейти к точной временной селекции ракурсных изображений для устранения рассмотренной причины снижения яркости стереоизображения. Но при этом необходимо решить проблему обеспечения минимального (нулевого) среднего тока сквозь СЖК-затвор при работе с неравной длительностью его открытых и закрытых состояний.

В настоящей статье представлены теория и экспериментальное подтверждение предлагаемого авторами метода решения указанной проблемы. Приведены характеристики и описана физика работы экспериментального СЖК-затвора, с помощью которого проверялась работоспособность метода.

Теория метода

Предлагаемый метод рассматривается на примере работы СЖК-затвора с временными параметрами оптического отклика (рис. 3), задаваемыми рассмотренной стереоскопической системой *3D Vision*.

Сущность метода состоит в том, что для электронного управления СЖК-затвором во время реализации закрытого оптического состояния (более длительного по сравнению с открытым состоянием) используется последовательность («гребенка») коротких импульсов управляющего напряжения с параметрами, удовлетворяющими соотношениям

$$t_g^{(i)} > \tau_{FLC}^{trans}; \Delta t_{(i+1)}^{(i)} < \tau_{FLC}^{trans}, \quad (1)$$

$$|s(t)| > I_{FLC}; |g_i(t)| > u_{FLC}, \quad (2)$$

$$\int s(t) dt = \sum_{i=1}^N \int g_i(t) dt, \quad (3)$$

где $t_g^{(i)}$ – длительность *i*-го короткого импульса отрицательной полярности ($i = 1, 2, \dots, N$, где *N* – число коротких импульсов), $\Delta t_{(i+1)}^{(i)}$ – сверхкороткий временной промежуток между соседними *i*-м и (*i*+1)-м короткими импульсами (геометрия импульсов более подробно представлена на рис. 4), τ_{FLC}^{trans} – переходное время оптического отклика (время реакции) СЖК-затвора на ступенчатое изменение (повышение или понижение) управляющего напряжения U_c , $s(t)$ – функция, описывающая мгновенную

амплитуду управляющего сигнала (импульса) положительной полярности, $g_i(t)$ – функция, описывающая мгновенную амплитуду i -го короткого импульса отрицательной полярности, u_{FLC} – порог срабатывания СЖК-затвора при подаче ступенчатого управляющего напряжения.

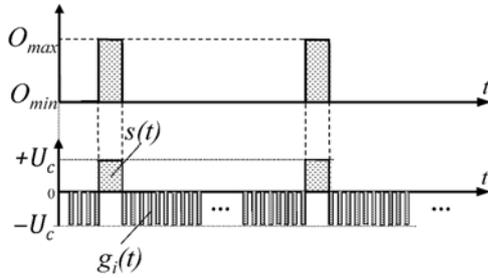


Рис. 3. Электронное управление оптическим состоянием СЖК-затвора с использованием дополнительных коротких импульсов: O_{max} и O_{min} – величины оптического пропускания соответственно в открытом и закрытом состояниях

Fig. 3. Electronic control of the optical state of the FLC shutter using additional short pulses: O_{max} and O_{min} – optical transmittances in the open and closed states, accordingly

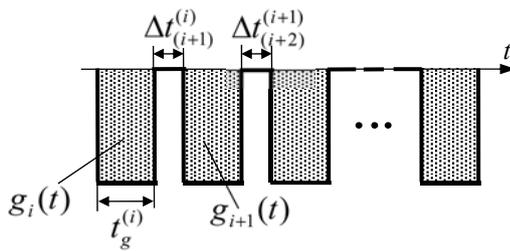


Рис. 4. Сверхкороткие временные промежутки Δt между соседними короткими импульсами g управляющего напряжения

Fig. 4. Super short time gaps Δt between the adjacent short electrical pulses g of the control voltage

Первый член соотношения (1) обуславливает надежный переход СЖК-затвора в закрытое состояние под действием каждого короткого импульса (импульса g) отрицательного управляющего напряжения. Управляющий импульс g назван «коротким», поскольку достаточно, чтобы его длительность t_g лишь ненамного превосходила малое переходное время τ_{FLC}^{trans} СЖК-затвора с целью успешного перехода последнего в закрытое состояние.

Второй член соотношения (1) соответствует поддержанию СЖК-затвора в закрытом состоянии в течение сверхкоротких временных промежутков Δt между соседними короткими импульсами g . Временные промежутки Δt «сверхкороткие» потому, что их длительность существенно меньше переходного времени τ_{FLC}^{trans} СЖК-затвора.

В соответствии с выражением (2) абсолютная величина управляющего сигнала $s(t)$ положительной полярности и абсолютная величина амплитуды каждого короткого импульса g отрицательной полярности должны быть больше порога u_{FLC} срабатывания затвора для обеспечения перехода СЖК-затвора в соответственно открытое и закрытое оптические состояния.

Соотношение (3) задает равенство между суммарной площадью под графиками всех функций вида $s(t)$, описывающих формы управляющих напряжений положительной полярности, и суммарной площадью под графиками всех функций вида $g_i(t)$, описывающих формы управляющих напряжений отрицательной полярности. Это обеспечивает равновесие в СЖК-слое между электрическими полями взаимно противоположной направленности, создаваемыми действием управляющих импульсов той же полярности. Отсюда следует, что среднее электрическое поле в СЖК-слое стремится к нулю за каждый период чередования открытого и закрытого состояний СЖК-затвора, и поэтому стремится к нулю средний (за период управления) ток сквозь СЖК-слой. В результате отсутствуют условия для накопления в СЖК-слое остаточного объемного ионного заряда и обеспечивается нормальная работа СЖК-затвора при неравной длительности его открытого и закрытого состояний.

В общем случае формы всех управляющих сигналов (импульсов) могут быть произвольными при соблюдении соотношений (1)–(3).

Экспериментальная проверка метода и обсуждение результатов

Экспериментальная установка

Установка для проведения эксперимента показана на рис. 5. Свет от светодиодного источника проходит через диафрагму, СЖК-затвор (его фронтальный вид представлен слева на рисунке) и поступает на фотодиод, работающий с обратным электрическим смещением для обеспечения линейности его

тока в зависимости от интенсивности поступающего света. С резистивной нагрузки фотодиода электрический сигнал, несущий информацию об оптическом отклике СЖК-затвора, поступает на вход первого канала осциллографа (типа *DS1104Z* с полосой про-

пускания 100 МГц). Электрический вход (электроды) СЖК-затвора соединены с 50-омным выходом программируемого генератора импульсов (*LeCroy WaveStation 2052*), а также с входом второго канала осциллографа.

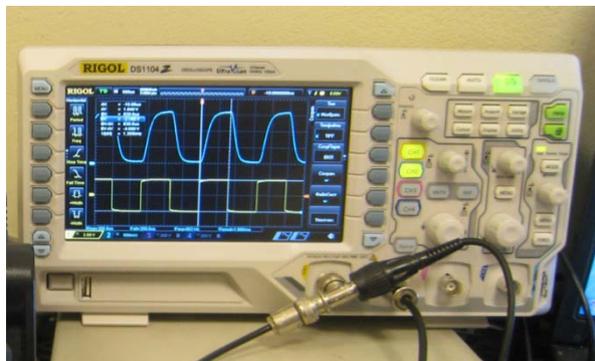


Рис. 5. Экспериментальной установка

Fig. 5. Experimental setup

Сначала покажем, что традиционное электронное управление СЖК-затвором попеременно положительными и отрицательными импульсами с неодинаковой средней энергией (с получением открытого и закрытого оптических состояний с неравной длительностью) ведет к нарушению работоспособности СЖК-затвора.

Нарушение работоспособности СЖК-затвора при энергетически несимметричном электронном управлении

Рассмотрим работу СЖК-затвора в четырех режимах традиционного электронного управления (рис. 6). В первом из них (рис. 6, *a*) осуществляется попеременная реализация открытого и закрытого оптических состояний (верхняя осциллограмма) при электронном управлении биполярным меандром с длительностью 10 мс его положительного и отрицательного полупериодов (нижняя осциллограмма). СЖК-затвор попеременно находится в открытом и закрытом состояниях одинаковой длительности 10 мс при времени 440 мкс нарастания оптического пропускания и времени 320 мкс спада пропускания. В этом режиме СЖК-затвор работает сколь угодно долго без изменения параметров оптического отклика.

Во втором режиме (рис. 6, *b*) увеличено расстояние между положительными управляющими импульсами без изменения длительности каждого

из них. В таком режиме оптический отклик СЖК-затвора со временем искажается, и для восстановления прежней (близкой к прямоугольной) формы оптического отклика (рис. 6, *b*, верхняя осциллограмма) требуется изменить постоянную составляющую в управляющем сигнале (рис. 6, *b*, нижняя осциллограмма, где видна эпюра управляющего напряжения, смещенная вниз относительно нулевой отметки, задаваемой указателем канала 1, находящимся слева от эпюры). Более того, второй режим управления со временем приводит к деградации СЖК-слоя: при последующем переходе к работе в первом режиме (с симметричным управляющим сигналом – меандром) СЖК-затвор уже не давал сразу прежнего оптического отклика. Прежнюю работоспособность он восстанавливал только после отключения от управляющих сигналов на достаточно продолжительное время (порядка нескольких минут). Более долгая работа во втором режиме привела к необратимой деградации одного образца СЖК-затвора, и он перестал функционировать.

Аналогичная логика поведения СЖК-затвора наблюдалось при работе с большей частотой переключения. На рис. 6, *c* представлен оптический отклик СЖК-затвора при управлении биполярным меандром с длительностью около 3,3 мс для его положительного и отрицательного полупериодов. Частота чередования открытого и закрытого оптических состояний СЖК-затвора составила около

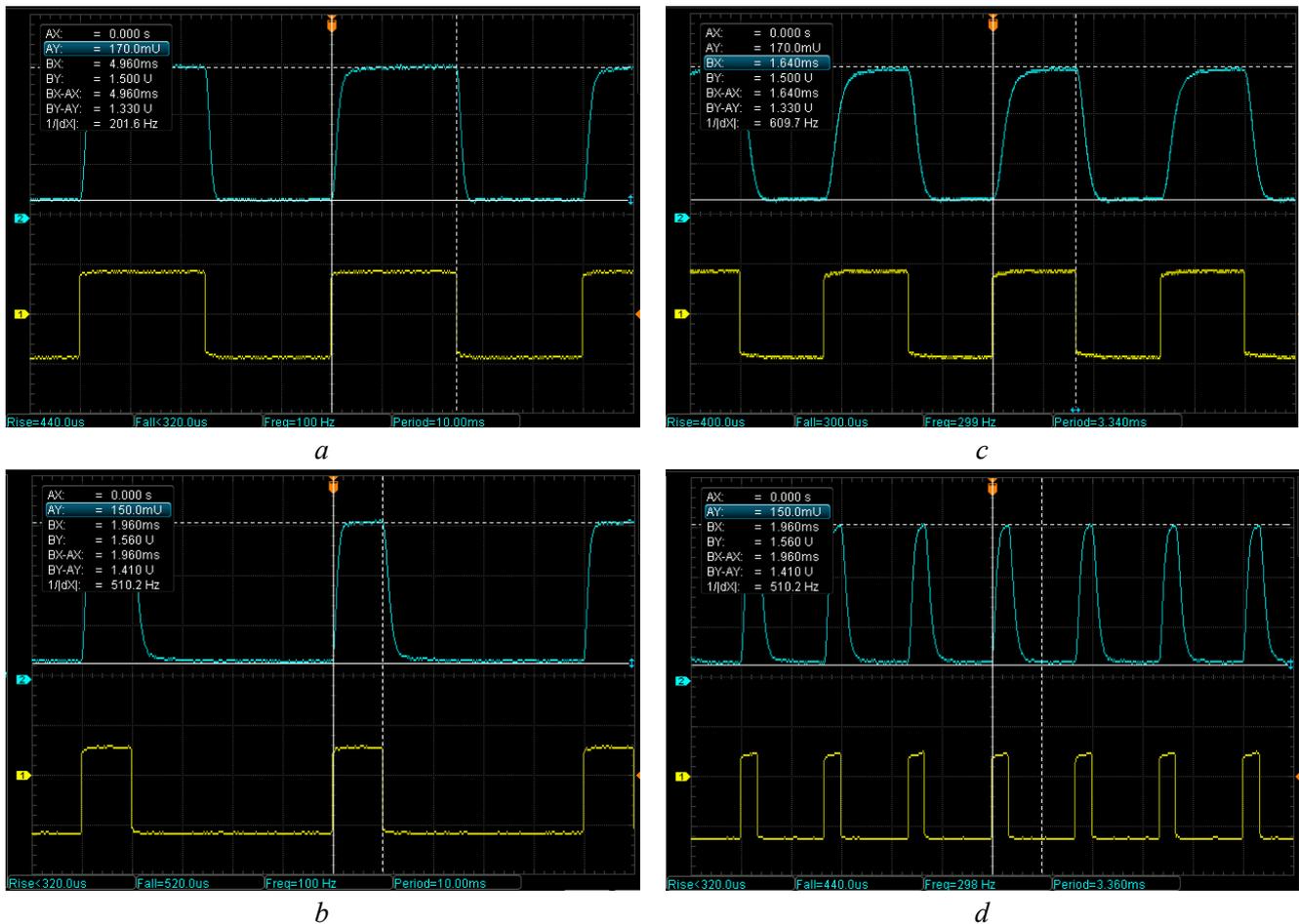


Рис. 6. Сравнение работы СЖК-затвора при равных и неравных длительностях его экстремальных оптических состояний: *a* – частота переключения 100 Гц при равных длительностях, *b* – частота переключения 100 Гц при неравных длительностях, *c* – частота переключения 300 Гц при равных длительностях, *d* – частота переключения 300 Гц при разных длительностях

Fig. 6. Comparison of FLC shutter operation with equal and unequal durations of its extreme optical states: *a* – 100 Hz switching frequency with equal durations, *b* – 100 Hz switching frequency with unequal durations, *c* – 300 Hz switching frequency with equal durations, *d* – 300 Hz switching frequency with unequal durations

300 Гц, и в этом режиме СЖК-затвор работает неограниченно долго без изменения параметров оптического отклика. Однако при сохранении этой частоты, но при уменьшении примерно втрое длительности положительного импульса (рис. 6, *d*) повторилась ситуация с временной деградацией СЖК-затвора при втором режиме управления.

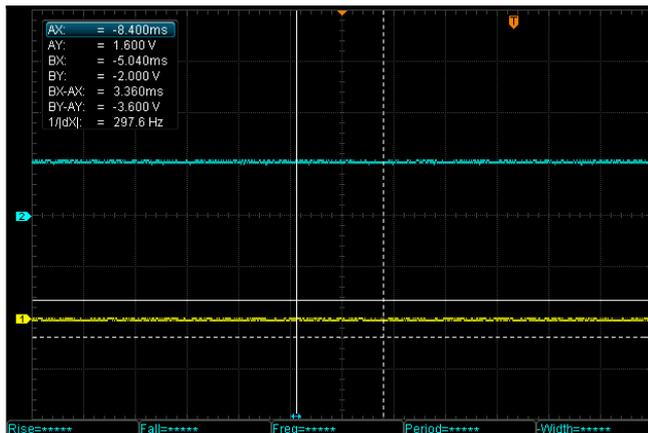
Работа СЖК-затвора в присутствии «гребенки» коротких импульсов

На рисунке 7 представлены осциллограммы оптического отклика СЖК-затвора вместе с управляющим электрическим напряжением различной формы, в том числе в присутствии «гребенки» дополнительных коротких импульсов.

При нулевом уровне управляющего напряжения (рис. 7, *a* – прямая линия в канале 1) СЖК-затвор характеризуется постоянным средним значением оптического пропускания (прямая линия в канале 2). Этот режим не является рабочим для СЖК-затвора (см. пояснение соответствующего состояния СЖК-слоя в следующем разделе). Подача биполярного ($\pm U_c$) управляющего напряжения в форме прямоугольных импульсов с длительностью 3,36 мс при частоте повторения 120 Гц с амплитудой $V_{pp} = 3,6$ В от пика до пика (1,8 В положительного и 1,8 В отрицательного напряжения) вызывает оптический отклик СЖК-затвора в виде последовательности импульсов (рис. 7, *b*) с временем нарастания 400 мкс

и временем спада 360 мкс (эти величины показаны в самой нижней информационной строке экрана осциллографа). Значение управляющего напряжения V_{pp} отображается значением ВУ-АУ в информационном поле (левый верхний угол экрана) и соответствует расстоянию между двумя (непрерывным и пунктирным) горизонтальными светлыми лини-

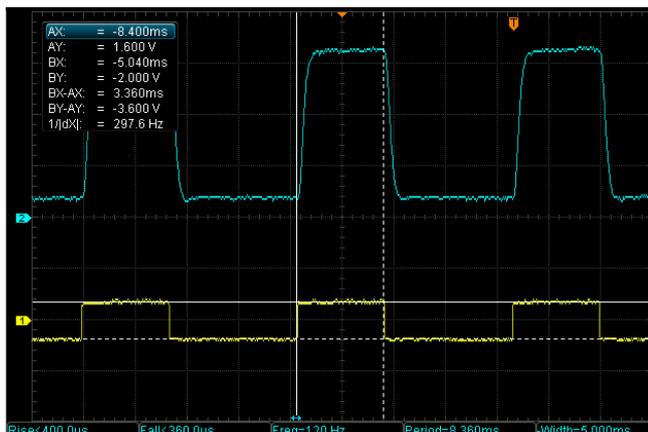
ями – курсорами. Длительность прямоугольного импульса положительного управляющего напряжения соответствует открытому состоянию СЖК-затвора и отображается соответствующим значением ВХ-АХ, которое определяется расстоянием между двумя вертикальными светлыми линиями – курсорами.



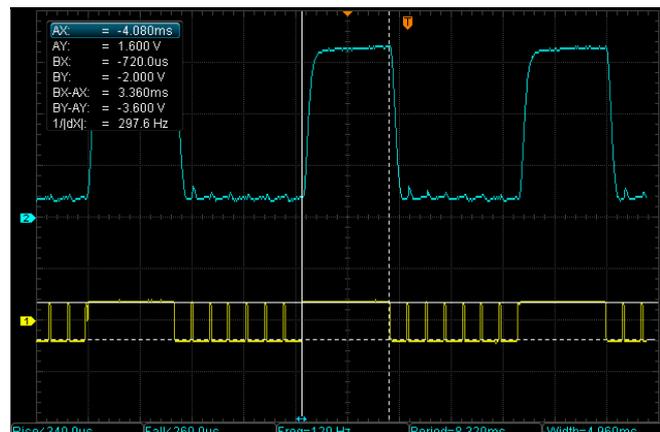
a



c



b



d

Рис. 7. Оптический отклик СЖК-затвора при управляющем напряжении различной формы: *a* – постоянное нулевое управляющее напряжение, *b* – разная длительность уровней положительного ($+U_c$) и отрицательного ($-U_c$) напряжения, *c* – введенная «гребенка» коротких импульсов с уровнями 0, ($-U_c$), *d* – введенная «гребенка» коротких импульсов с уровнями ($+U_c$), ($-U_c$)

Fig. 7. The FLC shutter optical responses at the various forms of the control voltage: *a* – constant zero control voltage, *b* – unequal durations of positive ($+U_c$) and negative ($-U_c$) voltage, *c* – inserted short pulse comb with levels 0, ($-U_c$), *d* – inserted short pulse comb with levels ($+U_c$), ($-U_c$)

Такой режим работы СЖК-затвора соответствует асимметричному биполярному управлению: положительное напряжение прикладывается в течение 3,36 мс, тогда как отрицательное напряжение прикладывается в течение 4,97 мс (что в сумме соответствует одному периоду для частоты повторения около 120 Гц). Чтобы уменьшить биполярную асимметрию, в соответствии с новым методом управления отрицательный управляющий сигнал формируется в виде гребенки коротких импульсов с перепадом напряжений от $-U_c$ до нулевого значения (соответствует положению указателя канала 1 на рис. 7, с). Длительность $t_g^{(i)}$ каждого короткого отрицательного импульса составляет 635 мкс, тогда как сверхкороткий временной интервал $\Delta t_{(i+1)}^{(i)}$ между ними составлял 79 мкс.

Управляющий электронный сигнал был синтезирован целиком в соответствующей компьютерной программе и воспроизведен программируемым генератором импульсов с достаточно высокой точностью (рис. 8). При этом СЖК-затвор управлялся напряжением с экстремальными уровнями $\pm 1,8$ В напрямую с низкоомного выхода генератора. В итоге оба условия соотношения (1) удовлетворяются для практически реализованного переходного времени СЖК-затвора величиной $\tau_{FLC}^{trans} = 360\text{--}400$ мкс при указанных малых уровнях управляющего напряжения. Выражение (2) полностью теоретиче-

ски не выполняется. Однако полученное на практике равновесие между положительной и отрицательной частями управляющего напряжения является достаточно хорошим для того, чтобы требуемый оптический отклик СЖК-затвора был стабилен в течение долгого (порядка часов) времени его работы.

Интересно, что полученная форма сигнала управления оказалась оптимальной несмотря на то, что имеет три уровня значения напряжения: положительное (+1,8 В), отрицательное (–1,8 В) и нулевое (0 В). Наличие нулевого значения напряжения в течение «сверхкороткого» промежутка времени $\Delta t_{(i+1)}^{(i)} < \tau_{FLC}^{trans}$ не вызывает перехода СЖК-затвора в промежуточное оптическое состояние, как это происходит в случае непрерывного нулевого напряжения, иллюстрируемого рис. 7, а. Если же использовать временные промежутки $\Delta t_{(i+1)}^{(i)}$ с переходом от отрицательного экстремального значения (–1,8 В) не до нулевого значения напряжения, а до положительного экстремального значения (+1,8 В), т.е. попытаться использовать только два состояния управляющего напряжения (как полагается при классическом режиме работы СЖК-затвора), то качество подавления света СЖК-затвором уменьшается: нижний уровень оптического пропускания становится неравномерным (рис. 7, d). Никакая регулировка уровней управляющего напряжения не устраняет этот недостаток.

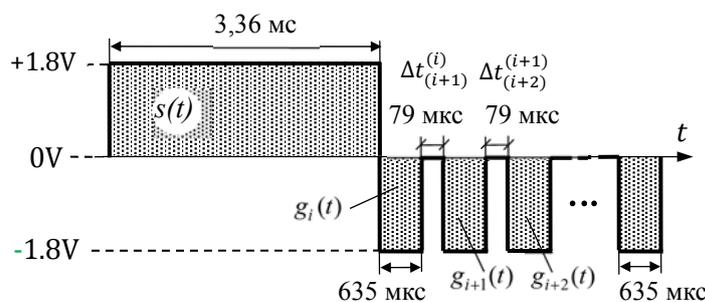


Рис. 8. Три значения (+1,8В; 0В; –1,8В) управляющего напряжения

Fig. 8. Three values (+1,8V; 0V; –1,8V) of the control voltage

В случае, если длительность положительного управляющего сигнала изначально больше, чем отрицательного, то формирование гребенок коротких импульсов должно осуществляться в положительном сигнале. В любом случае временные параметры

$\Delta t_{(i+1)}^{(i)}$, $t_g^{(i)}$ и число N коротких импульсов должны выбираться в соответствии со значениями переходного времени τ_{FLC}^{trans} СЖК-затвора в соответствии с соотношениями (1)–(3).

Физика работы и параметры СЖК-слоя для затвора, используемого в эксперименте

Слой смектического ЖК толщиной $d = 1,7$ мкм в экспериментальном образце СЖК-затвора имеет негеликоидальную структуру и пространственно деформирован [1, 2]. Собственный геликоид (спираль) СЖК-структуры скомпенсирован введением в вещество хиральной добавки с противоположным

знаком (углом) закрутки по сравнению с закруткой собственного геликоида. Физическая структура одного смектического слоя в слое СЖК представлена на рис. 9, где условно выделенные локальные участки 1_1 , 1_2 и 1_3 вместе составляют стенку 1 – границу раздела рассматриваемого смектического слоя с соседним смектическим слоем.

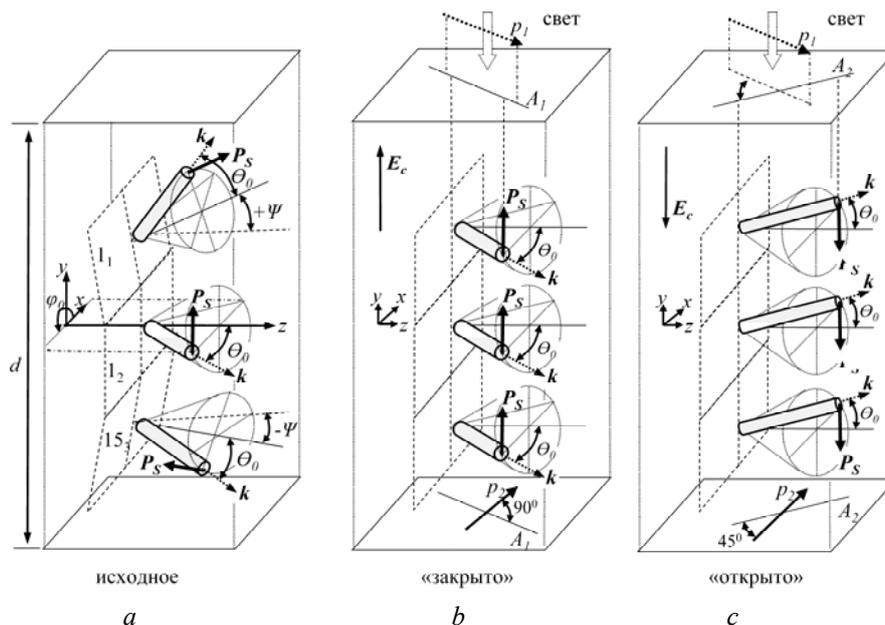


Рис. 9. Три состояния структуры СЖК-слоя

Fig. 9. Three states of FLC layer structure

В начальном состоянии (рис. 9, *a*) выделенные участки смектического слоя в отсутствие внешнего электрического поля E_c наклонены соответственно под углами $+\Psi$, $\Psi = 0^0$ и $-\Psi$ к оси z , параллельной поверхностям оптических подложек, прилегающим к СЖК-слою [1, 2]. Единственной степенью свободы для директора k СЖК-молекул на локальном участке смектического слоя является возможность поворота директора k по поверхности конуса с фиксированным углом Θ_0 при вершине конуса. Величина возможного углового поворота директора k определяется азимутальным углом φ (с начальным значением φ_0) между координатой x и проекцией директора k на плоскость (x, y) . Каждому локальному объему (с локальной поверхностью 1_1 , 1_2 и 1_3) смектического слоя с соответствующим локальным директором k соответствует свое начальное значение φ_0 азимутального угла.

При приложении к прозрачным электродам (на рисунке не показаны) СЖК-затвора электрического напряжения U_c , вследствие взаимодействия электрического поля E_c с векторами P_s спонтанной поляризации, величина φ азимутального угла становится одинаковой для всех локальных директоров k , что приводит к однородному значению директора k по всему объему СЖК-структуры в силу результирующей параллельности векторов E и P_s . При этом все локальные области стенки 1 между смектическими слоями выстраиваются в одной плоскости, параллельной направлению E_c .

В зависимости от знака электрического поля двум упорядоченным энергетическим (оптическим) состояниям СЖК-структуры соответствуют два стабильных направления A_1 и A_2 ее оптической оси (рис. 9, *b* и 9, *c* соответственно). В первом – закрытом оптическом состоянии (рис. 9, *b*) направление

A_1 оптической оси слоя СЖК оказывается параллельным оси поляризации p_1 входного поляризатора для СЖК-затвора, находящегося под воздействием управляющего импульса напряжения одной полярности. Поскольку прошедший СЖК-слой свет в такой геометрии сохраняет направление линейной поляризации, параллельное p_1 , то в результате свет блокируется выходным поляризатором с осью p_2 , ортогональной оси p_1 . Во втором – открытом оптическом состоянии (рис. 9, *с*) СЖК-затвора, находящегося под воздействием импульса управляющего напряжения другой полярности, направление A_2 оптической оси СЖК-слоя соответствует биссектрисе угла между p_1 и p_2 выходного поляризатора, что вызывает поворот на 90° линейной поляризации света, прошедшего через слой СЖК.

В эксперименте использовалась негеликоидальная СЖК-композиция HF-32F, в объеме которой наблюдаются пространственно-неоднородные структуры с периодической (период чуть более 4 мкм) деформацией смектических слоев. Основой композиции являются известные производные терфенилдикарбоновой кислоты – оптически активные добавки, используемые в стандартных СЖК. Физические параметры композиции HF-32F следующие: $\Theta_0 = 21^\circ$, $P_S = 42$ нК/см² и вращательная вязкость $\gamma_\varphi = 0,75$ Пуаз. Последовательность фазовых переходов в HF-32F имеет вид:

$$C_r \text{ — } 1^\circ\text{C} \rightarrow SmC^* \text{ — } 73^\circ\text{C} \rightarrow SmA^* \text{ — } 90^\circ\text{C} \rightarrow I,$$

где C_r – кристаллическая фаза, $Sm C^*$ – хиральная смектическая C -фаза (сегнетоэлектрическая), $Sm A^*$ – хиральная смектическая A -фаза (параэлектрическая), I – изотропная (жидкая) фаза.

В данной композиции СЖК наблюдается быстрый электрооптический отклик с непрерывной серой шкалой в прозрачной солитонной моде [9] в интервале кадровых частот до 3 кГц при управляющем напряжении $\pm 1,5$ В, благодаря чему композицию можно использовать не только в оптических затворах стереочков, но и в быстродействующих дисплейных устройствах.

Выводы

Предложен и теоретически и экспериментально обоснован новый метод электронного управления оптическим СЖК-затвором для обеспе-

чения его корректной работы в составе стереочков при неравной длительности открытого и закрытого состояний. Сущность метода состоит в том, что для уменьшения биполярной асимметрии предложено управлять более длительным оптическим состоянием СЖК-затвора с помощью гребенки коротких электрических импульсов с сверхкороткими состояниями между ними, параметры которых удовлетворяют определенным соотношениям. Показана принципиальная работоспособность метода с минимальным влиянием на форму заданного оптического отклика при выборе оптимального режима формирования гребенок коротких импульсов.

Метод может быть использован для управления СЖК-затворами в низковольтных высокоскоростных стереочках, в том числе при работе со стереоизображениями в стереоскопической системе *nVidia 3D Vision* с ЖК-мониторами.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект RFMEFI60417X0191).

Авторы благодарны безвременно ушедшему из жизни А. Л. Андрееву за участие в разработке метода и его экспериментальной проверке.

Список литературы / References

1. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Zalyapin N.V. Optical response of helix-free FLC: continuous gray scale, fastest response and lowest control voltage. *J. of the SID*, 2014, **22** (2), 115–121. DOI: 10.1002/jsid.226.
2. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Zalyapin N.V. Helix-Free Ferroelectric Liquid Crystals: Electro Optics and Possible Applications. *Appl. Sciences*, 2018, **8** (12), 2429–2448. DOI: 10.3390/app8122429.
3. United States patent № 9532037. Fast-acting low voltage liquid crystal stereo glasses / Kompanets I.N., Andreev A.L., Ezhov V.A., Sobolev A.G.; publ. 27.12.2016. Right holders: Kompanets I.N.
4. Ежов В. А., Компанец И. Н. Дистанционный бинокулярный СЖК-фильтр для безочкового наблюдения стереоизображений миллисекундной длительности // *Тез. VIII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике*. Москва, НИЯУ МИФИ, 2019. С. 325. [Ezhov V.A., Kompanets I.N. Distance binocular filter for glasses-free observing stereo images of millisecond duration. *VIII Int. Conf. on Photonics and Inform. Optics*. Moscow, Russia, 2019. Abstracts. P. 325. (in Russ.)].

5. Dahl I., Lagerwall S.T., Skarp K. Simple model for the polarization reversal current in a ferroelectric liquid crystal, *Phys. Rev. A*, 1987, **36** (9), 4380–4390. DOI: 10.1103/PhysRevA.36.4380.
6. Garoff S., Meyer R.B. Electroclinic effect at the A–C phase change in a chiral smectic liquid crystal. *Phys. Rev. Letts.*, 1977, **38** (15), 848–851. DOI: 10.1103/PhysRevLett.38.848.
7. Neyts K., Beunis F. Ion transport and switching currents in smectic liquid crystal devices. *Ferroelectrics*, 2006, **344** (1), 255–266. DOI: 10.1080/00150190600968405.
8. United States Patent №7724211. System, method, and computer program product for controlling stereo glasses shutters / Slavenburg G.A.; publ. 2010.
9. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Torgova S.I., Zalyapin N.V. Dynamics of the director reorientation and light modulation in helix-free ferroelectric liquid crystals. *AIP Advances*, 2019, **9** (2), 025220-1–025220-12. DOI: 10.1063/1.5051411 .

*Поступила в редакцию 18.04.2019 г.
Received 18 April 2019*