

БЫСТРАЯ МОДА В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ СО ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

И. В. Симдянкин, А. Р. Гейвандов, С. П. Палто*

*Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук
119333, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 16 апреля 2020 г.,
после переработки 4 мая 2020 г.
Принята к публикации 4 мая 2020 г.

Исследованы условия возникновения быстрой электрооптической моды в жидкокристаллической ячейке с малым периодом ($p = 1.8$ мкм) встречно-штыревых электродов. При помощи численного моделирования и экспериментально изучено электрооптическое переключение в двух жидкокристаллических смесях, различающихся вязкостью, а также диэлектрической и оптической анизотропиями. Показано, что времена переключения быстрой моды находятся в субмиллисекундном диапазоне и связаны с переключением приэлектродного слоя жидкого кристалла, соизмеримого по толщине с периодом электродных структур. Включение в процесс переключения всего объема жидкого кристалла характеризуется медленной модой с существенно большими временами.

DOI: 10.31857/S004445102010017X

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные фотонные устройства и дисплеи на основе жидких кристаллов (ЖК) оперируют изменением состояния поляризации света под действием электрического поля [1, 2]. При этом в результате ориентационного перехода происходит перестройка надмолекулярной структуры в слое ЖК [3], что позволяет модулировать падающий на слой световой поток. За последние два десятилетия технические характеристики ЖК-дисплеев, такие как контрастное отношение, углы обзора, время электрооптического отклика были кардинально улучшены. Тем не менее, для расширения применения жидких кристаллов в новых устройствах повышение быстродействия электрооптического переключения по-прежнему актуально.

Скорость электрооптического отклика влияет в первую очередь на качество отображения видеoinформации. К примеру, медленный электрооптический отклик приводит к размытию движущегося изображения. В то время как короткое время пе-

реключения открывает возможности для использования технологии последовательного отображения цветов (color sequential technology), которая позволяет исключить цветные фильтры из конструкции ЖК-дисплеев, тем самым повысив световую эффективность и разрешение изображения. Таким образом, увеличение быстродействия ЖК-модуляторов в результате поиска новых электрооптических эффектов и разработки ЖК-материалов принципиально важны для прогресса жидкокристаллической технологии как в фотонных, так и в дисплейных устройствах.

На первый взгляд, кажется, что простейший способ увеличения быстродействия заключается в создании тонких слоев ЖК. Как следует из формул (1), (2), времена включения и выключения в электрооптическом эффекте пропорциональны квадрату толщины слоя d [1]. Однако с уменьшением толщины слоя требуется повышение оптической анизотропии Δn ЖК-материала, что необходимо для обеспечения требуемой фазовой задержки для модуляции света $\Delta\varphi$ (3):

$$\tau_{on} \approx \frac{4\pi\gamma}{\Delta\varepsilon(f)} \frac{d^2}{(U^2 - U_{th}^2)}, \quad (1)$$

* E-mail: ageivandov@yandex.ru

$$\tau_{off} \approx \frac{\gamma d^2}{\pi^2 K_i}, \quad (2)$$

здесь U_{th} — пороговое напряжение, соответствующее переходу Фредерикса; U — приложенное напряжение; $\Delta\epsilon(f)$ — диэлектрическая анизотропия, зависящая от частоты приложенного напряжения f ; d — толщина слоя ЖК; γ — вращательная вязкость; K_i — эффективный модуль упругости (комбинация трех основных модулей для различных типов деформации), зависящий от типа электрооптического эффекта;

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d, \quad (3)$$

где Δn — оптическая анизотропия ЖК, λ — длина волны света в свободном пространстве, d — толщина слоя ЖК.

Ранее было показано [4], что при толщине слоя ЖК менее 3 мкм эффективное значение двулучепреломления из-за наличия неровностей или дефектов сильно зависит от шероховатости ориентирующих поверхностей (параметр порядка ЖК вблизи поверхности меньше, чем в объеме слоя). Было обнаружено, что энергия сцепления также играет немаловажную роль, влияя на время переключения [5]. Другими словами, уменьшение толщины ЖК-слоя действительно позволяет существенно сократить время переключения, однако, при этом приходится жертвовать другими важными характеристиками модулятора.

В данной работе мы используем подход, который заключается в пространственном ограничении объема ЖК, т. е. локализации деформации директора ЖК в очень малых объемах [6–8]. В нашем случае это становится возможным благодаря использованию пространственно-периодических электрических полей.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на ячейках, устройство которых показано на рис. 1. Слой ЖК располагается между двумя стеклянными подложками, на одной из которых создана система встречно-штыревых электродов (ВШЭ) из хрома (изготовлены в Центре коллективного пользования «Проектирование и изготовление фотошаблонов», АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр», Зеленоград) размером 5×5 мм². Период ВШЭ составляет 1.8 мкм ($w = g = 0.9$ мкм). Гомеотропная ориентация ЖК, при которой длинные оси молекул

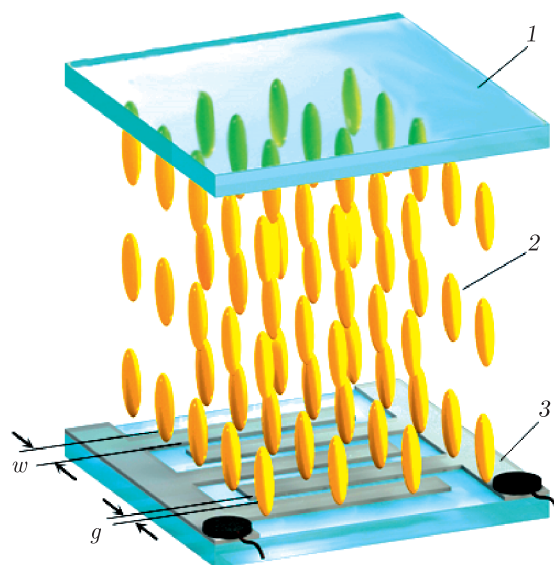


Рис. 1. Схематическое изображение ЖК-ячейки с системой ВШЭ. Здесь w — ширина электрода, g — зазор между электродами, 1 — стеклянная подложка, 2 — ориентированный слой ЖК, 3 — стеклянная подложка с ВШЭ

направлены перпендикулярно плоскости подложек, формируется ориентирующими покрытиями из хромолана (стеарил хлорид хрома). Толщина ЖК-слоя задается с помощью калиброванных пластиковых сферических спейсеров Sekisui micropearl (Япония) размером 2 мкм.

Исследования электрооптических свойств ЖК проводились на установке на базе поляризационного микроскопа ЛОМО «ПОЛАМ-113». Жидкокристаллическая ячейка закреплялась на столике микроскопа так, чтобы волновой вектор решетки ВШЭ составлял угол 45° к осям скрещенных между собой анализатора и поляризатора. Импульсы напряжения задавались на компьютере в программном обеспечении и формировались с помощью цифро-аналогового преобразователя Zetlab ZET-210 Sigma USB (Зеленоград). Импульсы напряжения дополнительно усиливались широкополосным усилителем до требуемой амплитуды и прикладывались к электродам ЖК-ячейки. Свет, прошедший через ЖК-ячейку и оптическую систему микроскопа, регистрировался фотоумножителем, сигнал с которого измерялся осциллографом Tektronix 3012 (США).

Для исследования электрооптического эффекта мы использовали жидкокристаллические материалы E7 и ZLI-1957/5 производства Merck (таблица). Значения оптической и диэлектрической анизотропии ЖК-смеси E7 существенно выше по сравнению

Таблица. Параметры жидкокристаллических материалов

Название ЖК-смеси	n_e ($\lambda = 589.3$ нм, $T = 20$ °C)	Δn	ϵ_{\parallel} ($f = 1$ кГц)	$\Delta\epsilon$	γ , мПа·с	T_{iso} , °C
E7	1.747	0.225	19	+13.8	220	58
ZLI-1957/5	1.624	0.121	8	+4.5	105	85

со смесью ZLI-1957/5, что сказывается на амплитуде электрооптического отклика. Однако высокая вращательная вязкость γ смеси E7 существенно замедляет процесс релаксации после снятия напряжения с электродов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [8] с помощью численного моделирования показано, что в геометрии ЖК-ячейки, показанной на рис. 1, при периодах ВШЭ, меньших, чем толщина слоя ЖК, на осциллограммах электрооптического отклика ЖК-ячейки возникают две моды, которые условно были названы поверхностной и объемной. Возникновение поверхностной моды связано с тем фактом, что при приложении электрического напряжения к электродам, электрическое поле оказывается локализованным на глубине менее периода решетки от поверхности. Поэтому сначала возникает сильная деформация поля директора ЖК именно вблизи электродных решеток. Этот начальный процесс очень быстрый. Далее деформация распространяется в глубь слоя ЖК, но с меньшей скоростью.

Динамика электрооптического отклика в ячейке с ЖК-материалом E7 на прямоугольные импульсы электрического напряжения длительностью 30 мс приведена на рис. 2. При напряжении $U = 10$ В пропускание ячейки быстро, т. е. меньше чем за 0.5 мс, нарастает до определенного уровня (уровень L1), определяемого амплитудой напряжения. Последующий рост пропускания (до уровня L2) идет медленно и занимает порядка 10 мс.

В ячейке, заполненной ЖК-смесью ZLI-1957/5, аналогично ячейке с ЖК-материалом E7, на осциллограммах электрооптического отклика проявляются быстрая и медленная моды. Однако, поскольку диэлектрическая анизотропия ZLI-1957/5 втрое меньше, чем у E7, то необходимые для переориентации директора ЖК электрические напряжения выше для ZLI-1957/5. Из данных рис. 3 следует, что

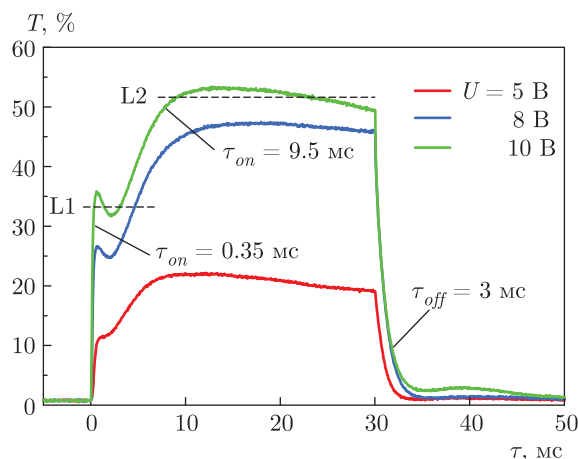


Рис. 2. Электрооптический отклик в ЖК-ячейке со смесью E7 на управляющие импульсы прямоугольной формы длительностью 30 мс и различными амплитудами U . Толщина слоя ЖК $d = 2.1$ мкм. Здесь уровень пропускания измеряется в процентах от интенсивности прошедшего через ЖК-слой поляризованного света

для быстрой моды при напряжении 10 В как включение, так и выключение происходят за очень короткое для ЖК-систем время 0.5 мс. Однако пропускание ячейки с ZLI-1957/5 находится на уровне 12%. В то время как уровень пропускания в 70% достигается при напряжении 30 В за 6.7 мс. Время выключения в случае медленной моды соизмеримо со временем включения и составляет около 6 мс.

Контраст определяется отношением сигнала в светлом (включенном) состоянии, к сигналу в темном (выключенном) состоянии. Поскольку темное состояние соответствует гомеотропной ориентации ЖК, сигнал в темном состоянии определяется исключительно качеством используемых поляризаторов и рассеянием света в оптической системе, включая рассеяние на дефектах ЖК. Известно, что в случае использования высококачественных поляризаторов и технологических процессов, исключая попадание мелкой пыли в ЖК-ячейку, контрастное отношение в ячейках с гомеотропной ориен-

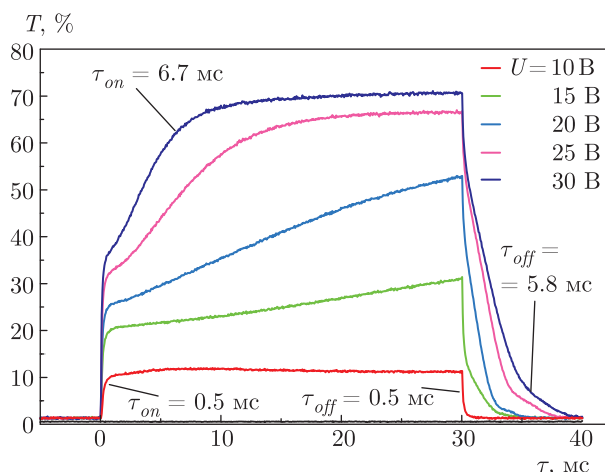


Рис. 3. Электрооптический отклик ЖК-ячейки с ZLI-1957/5 на управляющие импульсы прямоугольной формы длительностью 30 мс и различными амплитудами U . Толщина слоя ЖК $d = 2.5$ мкм. Здесь уровень пропускания измеряется в процентах от интенсивности прошедшего через ЖК-слой поляризованного света

тацией для света, распространяющегося вдоль нормали к слою, может быть доведено до значений не менее 5000 : 1. Это, однако, достигается вблизи значения длины волны 550 нм, соответствующего максимальной чувствительности человеческого глаза, где, как правило, эффективность пленочных поляризаторов максимальна.

В нашем конкретном случае измерения проводились в широкой спектральной полосе (400–700 нм) и уровень темного состояния соответствовал примерно одному проценту утечки света во всей упомянутой спектральной полосе, что, согласно данным на рис. 2, 3, ограничивает максимальное контрастное отношение на уровне около 90 : 1. Ограничение контраста на данном уровне связано в основном с утечкой света в голубой и красной областях спектра через скрещенные поляризаторы, а также с качеством светового пучка на входе (не все световые лучи в падающем пучке были направлены строго вдоль нормали к слою ЖК). При использовании более высококачественных поляризаторов и технологических условий, исключающих наличие дефектов на поверхностях подложек, это контрастное отношение для света, распространяющегося вдоль нормали к слою, может быть увеличено в десятки раз. Достижение высокого контраста для всех направлений распространения света требует применения специальных компенсирующих пленок, и эта проблема успешно решена ранее [9].

Стоит отметить, что экспериментальные результаты здесь приводятся только для толщины слоя, соизмеримой с периодом электродных структур, так как при больших толщинах вклад в электрооптический эффект от объемной моды в конечном итоге перекрывает вклад от поверхностной.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование выполнено в программном пакете LCD TDK 4.0 (разработан С. П. Палто), который позволяет рассчитывать динамику изменения распределения директора ЖК в трехмерном пространстве и исчерпывающе моделировать наблюдаемые электрооптические эффекты в неоднородных электрических полях. В модели использовались параметры E7, указанные в таблице, коэффициенты упругости $K_1 = 11$, $K_2 = 7$, $K_3 = 17$ [10] при бесконечной энергии сцепления и ориентации «легкой» оси, задающей направление директора, — перпендикулярно поверхности. Период ВШЭ $p = 1.8$ мкм ($w = g = 0.9$ мкм). Электрооптический отклик рассчитывался при длине волны $\lambda = 550$ нм.

Возникновение быстрой моды обусловлено тем, что в случае ВШЭ деформация поля директора имеет две составляющие — вдоль нормали к слою (ось z) и в плоскости слоя (ось x). Если упругая деформация вдоль оси z характеризуется пространственным периодом, соответствующим удвоенной толщине слоя $2d$, то пространственные частоты упругих волн вдоль оси x определяются периодом ВШЭ p . В этом случае время релаксации волн, относящихся к различным пространственным гармоникам, определяется как

$$\tau_i = \frac{\gamma}{Kq_i^2}, \quad (4)$$

где λ — вязкость ЖК, K — эффективный коэффициент упругости, $q_i = 2\pi i/p$ (i — целое число) — пространственные частоты гармоник, кратные основной пространственной частоте электродной решетки $q_1 = 2\pi/p$.

Однако, как показало моделирование, в пространстве между электродами возникают стенки с гомеотропной ориентацией директора. Из-за наличия этих гомеотропных стенок в межэлектродном пространстве наибольший вклад в деформацию вдоль оси x вносит вторая деформация с $i = 2$. Дело в том, что гомеотропные стенки между электродами выступают как границы, уменьшающие период

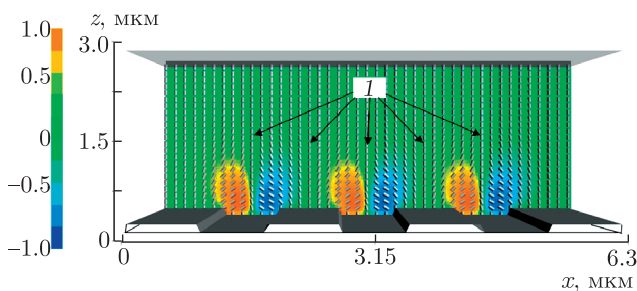


Рис. 4. Распределение директора ЖК, характерное для возникновения быстрой моды. Момент времени $t = 0.5$ мс после приложения поля $U = 4$ В, ячейка с E7 толщиной $d = 2.5$ мкм. В центре между электродами и над электродами наблюдаются гомеотропные стенки 1. Цветовая шкала соответствует x -компоненте директора: 0 — гомеотропная ориентация директора, ± 1 соответствует планарной ориентации в направлениях $\pm x$

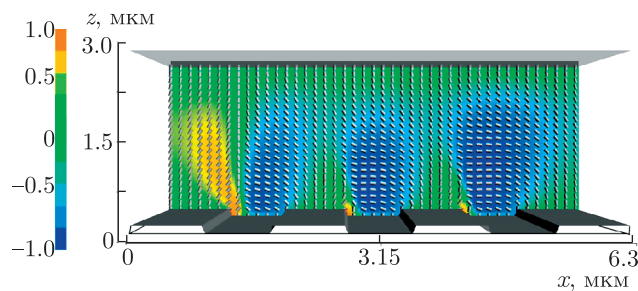


Рис. 5. Распределение директора ЖК, характерное для возникновения медленной моды. Момент времени $t = 19.7$ мс после приложения поля $U = 4$ В, ячейка с E7 толщиной $d = 2.5$ мкм. Вертикальные стенки между электродами разрушены. Цветовая шкала соответствует x -компоненте директора: 0 — гомеотропная ориентация директора, ± 1 соответствует планарной ориентации в направлениях $\pm x$

деформации (рис. 4). Это, в свою очередь, обеспечивает быструю релаксацию в исходное состояние [8].

Если прикладывать к электродам поле достаточно долго, то деформация распространяется в глубь слоя ЖК. Данный процесс проникновения деформации в объем ЖК приводит к разрушению межэлектродных гомеотропных стенок. На рис. 5 представлено распределение директора через 19.7 мс после приложения поля. Такая картина изменения характера распределения директора ЖК во времени и определяет существование двух мод переключения.

Возникновение двух мод переключения отчетливо проявляется на рассчитанных осциллограммах электрооптического отклика (рис. 6). После приложения прямоугольного импульса напряжения ($U = 4$ В) уровень пропускания 17% достигается за 1.7 мс. На рис. 4 видно, что директор в объеме ЖК деформирован только у поверхности, что объясняет малую оптическую задержку и низкий уровень пропускания. Дальнейший рост пропускания до уровня 30% происходит медленно — за 17 мс за счет проникновения деформации в объем ЖК, что существенно увеличивает фазовую задержку, однако и процесс релаксации при этом замедляется. Так, после короткого импульса длительностью 2 мс, релаксация происходит за 1 мс (быстрая мода), а после импульса длительностью 22 мс, релаксация длится 6 мс (медленная мода).

Таким образом, можно сделать вывод, что быстрая мода перспективна для применения в быстродействующих модуляторах света. При построении такого модулятора света необходимо выбирать жидкие кристаллы с высокой анизотропией двулучепре-

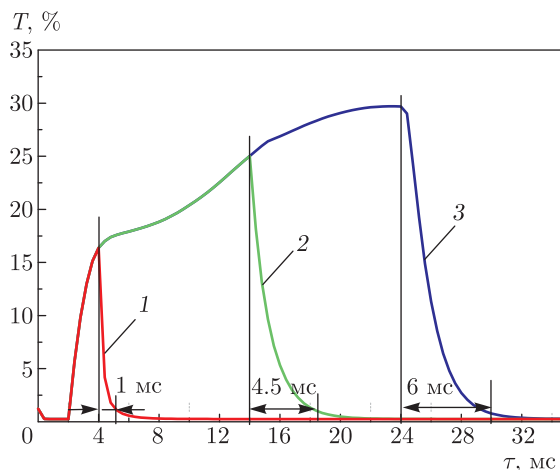


Рис. 6. Рассчитанный электрооптический отклик ($\lambda = 550$ нм) ЖК-ячейки E7 и ВШЭ $w = g = 0.9$ мкм ($p = 1.8$ мкм), толщина ячейки $d = 2.5$ мкм. Управляющий импульс прямоугольной формы амплитудой $U = 4$ В и длительностями: $\Delta t = 2$ мс (1), 14 мс (2), 20 мс (3)

ломления, для управления необходимо использовать короткие импульсы напряжения, а толщина слоя ЖК должна быть соизмерима с периодом ВШЭ.

5. ВЫВОДЫ

Экспериментально и численно исследовано возникновение быстрой и медленной мод электрооптического переключения в ячейках с системой ВШЭ для нематических ЖК-материалов с большой и малой анизотропиями. Быстрая мода, связанная с переключением ЖК вблизи поверхности электро-

дов, возникает при уменьшении периода ВШЭ до величин менее толщины слоя ЖК (2–3 мкм). Пространственно-периодическое электрическое поле приводит к появлению гомеотропных стенок, которые удваивают пространственную частоту упругой деформации ЖК. Это обеспечивает быстрое время включения и релаксации и, соответственно, существование быстрой электрооптической моды. Медленная мода вызвана проникновением деформации в объем ЖК с сопутствующим разрушением гомеотропных стенок. Время релаксации в этом случае зависит от глубины проникновения деформации. При этом глубина проникновения может контролироваться длительностью импульса и толщиной слоя ЖК. Важно, что, несмотря на относительно низкий коэффициент пропускания в случае быстрой моды, оптический контраст между темным и светлым состояниями остается достаточно высоким, что перспективно для возможных применений в фотонных устройствах.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Блинов, *Жидкие кристаллы: Структура и свойства*, Книжный дом «Либроком», Москва (2013).
2. П. Ж. де Жен, *Физика жидких кристаллов*, Мир, Москва (1977).
3. V. Freedericksz and V. Zolina, *Transact. of the Farad. Soc.* **29**, 919 (1933).
4. S. T. Wu and U. Efron, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 624 (1986).
5. X. Nie, R. Lu, H. Xianyu et al., *J. Appl. Phys.* **101**, 103110 (2007).
6. T. H. Choi, S. W. Oh, Y. J. Park et al., *Sc. Rep.* **6**, 27936 (2016).
7. I. Dierking, A. Rey, L. C. Chien et al., *Polymer-modified Liquid Crystals*, **8**, 105 (2019).
8. A. R. Geivandov, M. I. Barnik, I. V. Kasyanova et al., *Beilstein J. Nanotechnol.* **9**, 11 (2018).
9. S. P. Palto, US Patent No. 7889297 (2011).
10. S. Pestov and V. Vill, *in Springer Handbook of Materials Data*, ed. by H. Warlimont and W. Martienssen, Springer Nature Switzerland AG (2018), p. 1140.