

05:07

Динамика твист-эффекта в двухчастотном нематическом жидком кристалле

© Е.А. Коншина, М.А. Федоров, А.Е. Рыбникова, Л.П. Амосова, Н.Л. Иванова, М.В. Исаев, Д.С. Костомаров

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: eakonshina@mail.ru

(Поступило в Редакцию 3 декабря 2008 г. В окончательной редакции 16 апреля 2008 г.)

Исследована динамика электрооптического 90° твист-эффекта в двухчастотном нематическом жидком кристалле для длин волн 0.65 и $1.55 \mu\text{m}$. Показано влияние граничных условий межфазного взаимодействия на оптический порог твист-эффекта, коэффициент контраста и область рабочих напряжений. Время переключения твист-эффекта из состояния „off“ в состояние „on“ при вариации амплитуды прямоугольного импульса напряжения постоянного тока от 15 до 50 V изменялось от 1.5 до 0.3 ms при толщине слоя жидкого кристалла около $7 \mu\text{m}$. Минимальное время переключения из состояния „on“ в состояние „off“ при электроуправлении процессом релаксации молекул в ячейке с асимметричными граничными условиями — 3 ms . Динамическая область изменения пропускания на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ простиралась до 30 dB .

PACS: 77.84.Nh, 78.20.Fm, 78.20.Jg

Введение

Устройства на основе жидких кристаллов (ЖК) для систем телекоммуникации обеспечивают оптические характеристики, сравнимые с параметрами оптомеханических устройств, но обладают большей надежностью и работают при более низких значениях напряжения. Для ЖК-устройств характерны низкие потери при прохождении через них оптического сигнала благодаря высокому пропусканию ЖК-материалов в ИК-области спектра. ЖК-устройства могут быть использованы для обработки оптических сигналов в качестве широкополосных оптических переключателей, регулируемых оптических аттенюаторов и стабилизаторов оптической частоты [1–5]. Однако применение ЖК-устройств в телекоммуникационных системах ограничивают два фактора: зависимость потерь в ЖК от температуры и относительно низкая скорость работы. В связи с этим на сегодняшний день остаются актуальными поиск путей повышения быстродействия ЖК-устройств для ИК-области, исследование процессов переориентации ЖК в таких устройствах и влияния на эти процессы как свойств ЖК, так и внешних факторов.

Одним из путей повышения быстродействия ЖК-устройств является использование двухчастотных (dual-frequency DF) ЖК с инверсией знака диэлектрической анизотропии, что позволяет с помощью электрического поля управлять не только подъемом, но и спадом оптического пропускания в отличие от других нематиков. Использование электрооптического твист-эффекта в DF ЖК-устройствах позволило существенно повысить их быстродействие [4–6].

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на динамику электрооптического отклика ЖК, являются начальные условия межфазного взаимодействия на границе раздела с ориентирующей поверхностью,

которые влияют на начальный угол наклона директора (направления длинной оси) молекул относительно ориентирующей поверхности. Увеличение угла наклона и уменьшение энергии сцепления ЖК с поверхностью способствуют ускорению процесса переориентации молекул при твист-деформации нематика [7,8], включая DF ЖК [9].

В работе исследованы динамика переключения 90° твист-эффекта в DF ЖК, а также влияние на нее внешних факторов и режимов управления подъемом и спадом оптического пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Анализируется влияние граничных условий на начальный угол наклона директора молекул, пороговые напряжения электрооптических эффектов, контраст и динамические характеристики ЖК-ячеек, а также амплитуды и длительности действия напряжений, управляющих твист-эффектом в DF ЖК.

1. Экспериментальная часть

Для получения 90° твист-эффекта направления ориентации директора молекул на противоположных поверхностях, ограничивающих слой ЖК, должны быть ортогональными. В качестве ориентирующих слоев использовались наклонно напыленная моноокись германия GeO_2 , плазменно-полимеризованные слои $a\text{-C:H}$ и полимерные слои на основе полиимида PI, а также их сочетание для получения симметричных (s) и асимметричных (as) граничных условий анизотропно-упругого межфазного взаимодействия. Все ячейки заполнялись ЖК в нематической фазе (НЖК) капиллярным способом в вакууме.

В работе был использован DF ЖК-1001 (НИОПИК) с высокой оптической анизотропией $\Delta n = 0.26$ на длине волны $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ (показатели преломления для обыкновенного $n_0 = 1.53$ и необыкновенного лу-

Таблица 1. Характеристики DF ЖК-ячеек с разными ориентирующими поверхностями для S-эффекта и твист-эффекта

№ ячейки	Ориентирующие поверхности		$d, \mu\text{m}$	U_{th}, V	θ_p, deg	U_{op}, V	C
	1-я подложка	2-я подложка					
1 s	GeO	GeO	13.8	1.1	42–44	3.9	0.66
2 as	GeO/a-C:H	GeO	13.6	2	32	4.3	0.72
3 s	PI	PI	13.9	2.6	31	5.6	0.73

чей $n_e = 1.79$). Диэлектрическая анизотропия DF ЖК $\Delta\epsilon = 4.43$ ($\epsilon_{\parallel} = 9.53$ и $\epsilon_{\perp} = 5.1$) при $f = 1 \text{ kHz}$ [10]. Переходная частота DF ЖК, при которой происходит инверсия знака $\Delta\epsilon$ с положительного на отрицательный, соответствует 10 kHz [11].

Минимальная толщина d слоя ЖК оценивалась из условия, при котором достигается максимальный контраст. Если направление директора на фронтальной подложке ЖК-ячейки, помещенной между поляризатором и параллельным ему анализатором, совпадает с осью поляризатора, то интенсивность света, прошедшего через ячейку, будет равна [12]:

$$I = \frac{\sin^2(\varphi\sqrt{1+q^2})}{1+q^2}, \quad (1)$$

где φ — твист-угол закрутки молекул НЖК, а $q = \pi d \Delta n / \lambda$. В случае 90° твист-эффекта $\varphi = \pi/2$. Интенсивность пропускания I является осциллирующей функцией параметра d/λ . Полагая, что для первого минимума кривой пропускания $I = 0$, при решении уравнения (1) получим

$$d_{\text{min}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\lambda}{\Delta n}. \quad (2)$$

При переходе в ближнюю ИК-область Δn может уменьшаться на 15–20% по сравнению с ее значением для видимой области спектра [3]. С учетом этого можно принять $\Delta n \cong 0.21$ для $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ для DF ЖК. Тогда в соответствии с формулой (2) для получения максимального контраста минимальная толщина слоя должна быть более $6.3 \mu\text{m}$.

Для получения данных об условиях межфазного взаимодействия на границе раздела фаз были изготовлены ячейки, имеющие ту же толщину слоя DF ЖК и подобные граничные условия, но с параллельной ориентацией директора. Начальный угол наклона директора θ_p (pretilt) и пороговое напряжение U_{th} (threshold) S-эффекта Фредерика определялись по методикам, описанным в [13]. В табл. 1 приведены характеристики, полученные для трех ячеек с разными граничными условиями.

Коэффициент контраста C оценивался по линейному участку спада пропускания зависимости I от напряжения U , начало которого совпадает с максимальным пропусканием I_{max} . Соответственно его окончание совпадает с минимальным пропусканием I_{min} . Для расчета

коэффициента контраста C использовалась формула:

$$C = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}. \quad (3)$$

Оптический порог твист-эффекта U_{op} соответствует напряжению начала спада пропускания зависимости $I(U)$, выше которого пропускание для линейно поляризованного света равно нулю.

Для измерения оптических и динамических характеристик ЖК-ячеек применялась электрооптическая схема, описанная в [14]. В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазерные модули LFO фирмы ФТИ-Оптроник с $\lambda = 0.65$ и $1.55 \mu\text{m}$. Управление твист-эффектом в DF ЖК осуществлялось с помощью методики, основанной на приложении к ЖК-ячейкам постоянного и переменного низкочастотного и высокочастотного электрических полей в определенной последовательности. Измерения проводились с помощью осциллографа GDS-820s, соединенного с компьютером.

На рис. 1, а показана осциллограмма электрооптического отклика твист-ячейки, заполненной DF ЖК, полученная в оптимальном режиме управления. Изменение

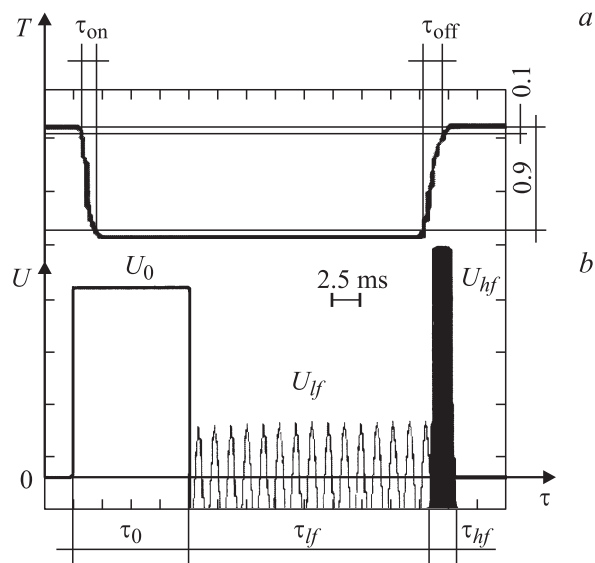


Рис. 1. Осциллограмма электрооптического отклика твист-ячейки, заполненной DF ЖК, в оптимальном для нее режиме управления (а) и изменение амплитуды и длительности управляющих напряжений (б). $U_0 = 30 \text{ V}$, $\tau_0 = 10 \text{ ms}$, $U_{lf} = 10 \text{ V}$, $\tau_{lf} = 20 \text{ ms}$, $U_{hf} = 60 \text{ V}$, $\tau_{hf} = 2.5 \text{ ms}$.

Таблица 2. Время переключения ЖК-ячеек при 90° твист-эффекте ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$) и параметры управляющих напряжений при $U_0 = 30 \text{ V}$, $\tau_0 = 10 \text{ ms}$

№ ячейки	Поверхность	$d, \mu\text{m}$	$\tau_{\text{on}}, \text{ms}$	U_{lf}, V	U_{hf}, V	τ_{hf}, ms	$\tau_{\text{off}}, \text{ms}$
4 s	PI	8	5	45	50	20	20
5 s	GeO	6.2	2.5	15	20	50	20
6 as	GeO/a-C:H	6.9	2.5	10	60	5	3
7 as	GeO/a-C:H	7	1.5	20	45	5	5

Таблица 3. Время переключения ЖК-ячеек при 90° твист-эффекте ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) и параметры управляющих напряжений при $U_0 = 30 \text{ V}$, $\tau_0 = 10 \text{ ms}$

№ ячейки	U_{lf}, V	$\tau_{\text{on}}, \text{ms}$	U_{hf}, V	τ_{hf}, ms	$\tau_{\text{off}}, \text{ms}$
4 s	34	2	64	20	20
5 s	10	2	55	15	20
7 as	11	1.5	64	50	25

амплитуды и длительности управляющих напряжений при этом показано на рис. 1, *b*. Ячейка размещалась между скрещенными поляризаторами. Переключение из состояния „off“, когда $U = 0$, в состояние „on“ осуществлялось подачей прямоугольного импульса напряжения U_0 постоянного тока длительностью τ_0 (рис. 1, *b*). Пропускание ЖК-ячейки при этом падало, как видно из рис. 1, *a*. Далее для поддержания пропускания ЖК-ячейки в состоянии „on“ подавался пакет синусоидальных колебаний низкой частоты (low frequency — lf) 1 kHz с амплитудой U_{lf} и длительностью τ_{lf} . Переключение ЖК-ячейки из состояния „on“ в исходное состояние „off“ осуществлялось путем подачи пакета синусоидальных колебаний высокой частоты (high frequency — hf) 30 kHz с амплитудой U_{hf} и длительностью τ_{hf} . В результате этого пропускание ЖК-ячейки T возвращалось к первоначальному уровню (рис. 1, *a*). Время переключения твист-эффекта τ_{on} и τ_{off} определялось по уровню 0.1–0.9 пропускания ЖК-ячейки (см. рис. 1, *a*). Амплитуды и длительности управляющих напряжений для каждой из исследованных ЖК-ячеек подбирались экспериментально с целью получения минимальных времен переключения.

Исследование динамических характеристик проводилось на ячейках, толщина слоя DF ЖК в которых была в интервале 6.2–8 μm . Оптимальные режимы работы для каждой из ЖК-ячеек подбирались экспериментально. Амплитуда напряжения прямоугольного импульса, подаваемого на ЖК-ячейку для подъема пропускания, варьировалась в интервале от 25 до 45 V при длительности $\tau_0 = 10 \text{ ms}$. Амплитуда U_{lf} изменялась от 7 до 45 V, в зависимости от конструктивных особенностей ячеек, связанных с ориентирующей поверхностью. Амплитуда высокочастотного напряжения U_{hf} изменялась в интервале от 15 до 80 V.

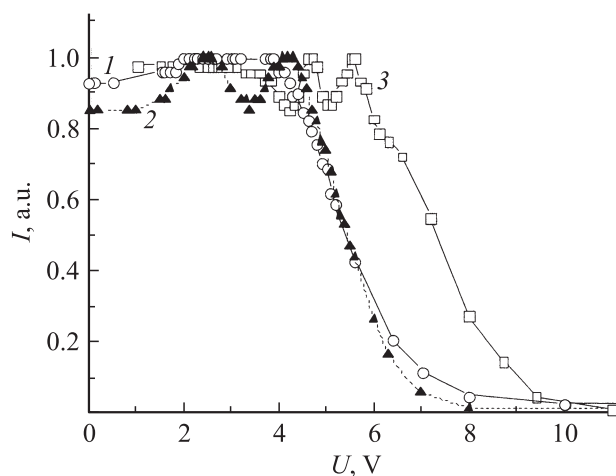
В табл. 2 и 3 приводятся динамические характеристики и параметры управляющих напряжений исследованных ЖК-ячеек для $\lambda = 0.65$ и $1.55 \mu\text{m}$ соответственно.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Влияние граничных условий на оптические характеристики ЖК-ячеек

Влияние граничных условий на угол наклона и пороговые напряжения S -эффекта и твист-эффекта исследовались на ЖК-ячейках с разными ориентирующими слоями. Наибольший угол наклона директора $\theta_p = 44^\circ$ и наименьший порог S -эффекта $U_{\text{th}} = 1.1 \text{ V}$ наблюдался при ориентации молекул слоями GeO (табл. 1). При ориентации DF ЖК на натертой поверхности PI порог увеличивался до 2.6 V, а угол уменьшался до 31° , что косвенно свидетельствует о более сильном сцеплении молекул ЖК, характерном для полимерных ориентирующих слоев.

На рис. 2 приведены зависимости $I(U)$ для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$, полученные при подаче на ЖК-ячейки синусоидального напряжения с частотой 1 kHz, что соответствует $\Delta\epsilon > 0$. ЖК-ячейки размещались между скрещенными поляризатором и анализатором, при этом угол между направлением поляризации излучения и направлением директора на фронтальной поверхности ячейки $\beta = 0$. Номера кривых пропускания на рис. 2 соответствуют номерам ячеек в табл. 1. Изменение граничных условий в ЖК-ячейках № 1–3 существенным образом влияет на наклон кривых при спаде

**Рис. 2.** Кривые пропускания $I(U)$ ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$), полученные под углом $\beta = 0$, для ЖК-ячеек с симметричными граничными условиями: 1 — GeO–GeO и 3 — PI–PI и асимметричными условиями: 2 — GeO/a-C:H–GeO.

пропускания и напряжение, соответствующее оптическому порогу твист-эффекта. Для ЖК-ячеек с симметричными граничными условиями наименьшее значение $U_{ор} = 3.9 \text{ V}$ соответствует ориентации DF ЖК с помощью GeO, а наибольшее $U_{ор} = 5.6 \text{ V}$ при ориентации с помощью PI (№ 1 и 3, табл. 1). В асимметричной ЖК-ячейке (№ 2, табл. 1) $U_{ор}$ незначительно повышался до 4.3 V в результате осаждения на одну из поверхностей GeO тонкого слоя диэлектрика *a*-C:H. При этом коэффициент контраста у ЖК-ячейки № 2 увеличивается до значения $C = 0.72$, которое приближается к контрасту ячейки № 3 в табл. 1. Увеличение контраста в этом случае можно объяснить уменьшением угла θ_p до 32° в ячейке № 2 (табл. 1), которое связано с модификацией нанорельефа поверхности GeO в результате осаждения тонкого слоя *a*-C:H в плазме тлеющего разряда, сопровождающегося уменьшением угла θ_p [15]. Таким образом, изменяя граничные условия межфазного взаимодействия DF ЖК с поверхностью, можно влиять как на контраст, так и на область рабочих напряжений, зависящую от пороговых напряжений U_{th} и $U_{ор}$, электрооптических эффектов.

Влияние асимметрии граничных условий на пропускание ЖК-ячейки № 2 иллюстрирует рис. 3, на котором показаны зависимости $I(U)$ для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$, полученные при разных углах $\beta = 0, 45, 90^\circ$. В зависимости от угла β может быть получена как амплитудная, так фазовая модуляция света в 90° ЖК-твист-ячейке. Эффективное двулучепреломление наблюдается при угле $\beta = 45^\circ$ (рис. 3). Число максимумов на кривой $I(U)$ соответствует фазовой задержке $\Delta\Phi = 4\pi$ при толщине DF ЖК-слоя $13.6 \mu\text{m}$. При спаде оптического пропускания в области $U > U_{ор}$ переориентация директора сопровождается как вращением молекул, так и изменением угла наклона директора относительно нормали к подложке, что приводит к изменению Δn . В области

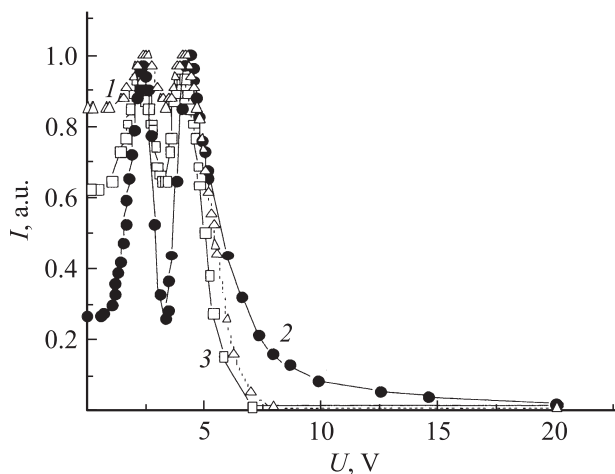


Рис. 3. Кривые пропускания $I(U)$ ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$), полученные при разных углах β , для асимметричной ЖК-ячейки, в которой слой DF ЖК толщиной $13.6 \mu\text{m}$ ориентирован поверхностями GeO/*a*-C:H и GeO. $\beta = 0$ (1), 45 (2), 90° (3).

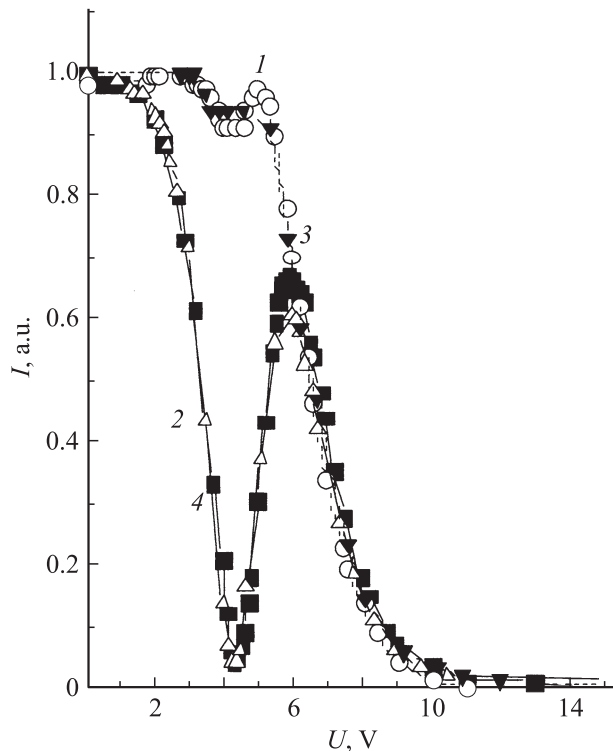


Рис. 4. Кривые пропускания $I(U)$ ($\lambda = 0.65 \mu\text{m}$), полученные при разных углах β , для симметричной ЖК-ячейки, в которой слой DF ЖК толщиной $6.7 \mu\text{m}$ ориентирован поверхностью GeO/*a*-C:H. $\beta = 0$ (1), 45 (2), 90 (3), 135° (4).

напряжений $U \gg 10 \text{ V}$ директор в объеме ЖК переориентирован полностью, при этом отсутствуют твист-эффект и двулучепреломление.

На рис. 4 приведены зависимости $I(U)$ для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$, измеренные под разными углами β , для ЖК-ячейки с симметричными граничными условиями. В этом случае слой DF ЖК граничит с обеих сторон со слоем *a*-C:H, нанесенным на поверхность GeO. О симметрии граничных условий в ячейке № 2 свидетельствует совпадение кривых на рис. 4, полученных при углах β , равных 0 и 90° , а также 45 и 135° . При толщине ЖК-слоя $6.7 \mu\text{m}$ $\Delta\Phi = 2\pi$ для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$. Следует отметить, что симметричное расположение тонкого диэлектрического слоя *a*-C:H в ЖК-ячейке приводит к повышению $U_{ор}$ до 5 V по сравнению с асимметричной ячейкой № 2 (табл. 1).

На рис. 5 приведены зависимости $I(U)$ для ЖК-ячеек с разными граничными условиями, полученные для $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. На рис. 5 пропускание ЖК-ячеек изменяется на три порядка в интервале напряжений от 1 до 7.5 V . Осаждение на поверхность GeO слоя *a*-C:H в случае асимметричной (кривая 3) и симметричной (кривая 2) структуры ЖК-ячейки увеличивает динамический диапазон от 20 dB (кривая 1) до 30 dB . Это делает возможным использование таких ЖК-устройств в телекоммуникационных системах, например, в качестве регулируемых оптических аттенуаторов.

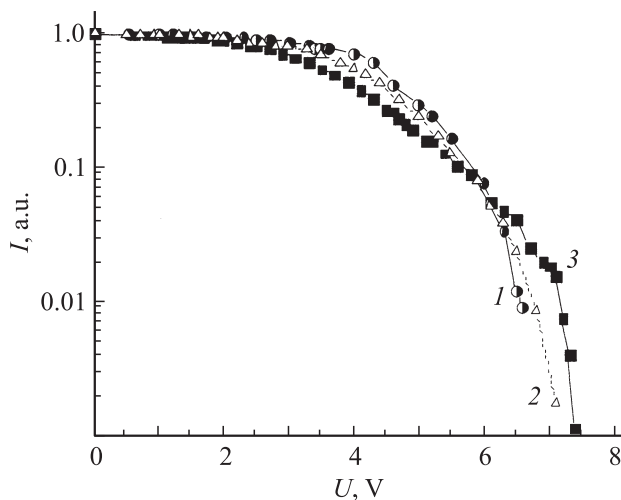


Рис. 5. Кривые пропускания $I(U)$ ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) для ЖК-ячеек с разными граничными условиями. Толщина слоя DF ЖК: 1 — 6.2, 2 — 7, 3 — 6.7 μm .

2.2. Динамические характеристики ЖК-ячеек

На рис. 6 приведены зависимости времени $\tau_{\text{он}}$ переориентации молекул при твист-эффекте из исходного состояния „off“ с углом наклона директора θ_p в вертикальное состояние „on“ от амплитуды управляющего прямоугольного импульса постоянного тока U_0 , подаваемого на ячейку. Время $\tau_{\text{он}}$ обратно пропорционально квадрату приложенного напряжения. Увеличение амплитуды U_0 в интервале от 10 до 50 V позволяет в пять раз снизить время $\tau_{\text{он}}$ от 1.5 до 0.3 ms для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ (кривая 1) и 1.55 μm (кривая 2) и перейти в микросекундный диапазон.

В табл. 2 приведены оптимальные условия управления твист-эффектом в ячейках с DF ЖК, отличающихся граничными условиями, а также соответствующие им

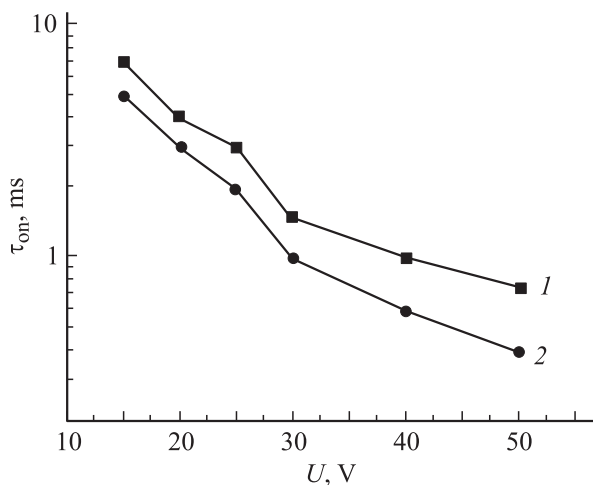


Рис. 6. Экспериментальные зависимости $\tau_{\text{он}}$ от U_0 , полученные для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ (1) и $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (2). Толщина слоя DF ЖК: 7 μm .

времена $\tau_{\text{он}}$ и $\tau_{\text{оф}}$. Для переключения из состояния „off“ в состояние „on“ на все ЖК-ячейки подавался прямоугольный импульс напряжения с постоянными амплитудой $U_0 = 30 \text{ V}$ и длительностью $\tau_0 = 10 \text{ ms}$. Остальные управляющие напряжения подбирались экспериментально для получения электрооптического отклика твист-эффекта в DF ЖК подобного осциллограмме, приведенной на рис. 1. Уменьшение $\tau_{\text{он}}$ от 5 ms (№ 4s) до 1.5 ms (№ 7as) в табл. 2, вероятнее всего, связано с асимметрией граничных условий и физико-химическими особенностями ориентирующих поверхностей. Особенности электрических свойств ориентирующих поверхностей оказывают влияние на значения U_{lf} и U_{hf} и τ_{hf} , для обеспечения оптимальных условий переключения ЖК-ячеек. Время $\tau_{\text{оф}}$ изменялось в интервале от 20 до 3 ms, как видно из табл. 2. Модификация нанорельефа поверхности GeO в ЖК-ячейках 6as и 7as в результате осаждения на одну из поверхностей тонкого слоя диэлектрика a-C:H позволила получить минимальные времена $\tau_{\text{оф}}$ для $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$.

Результаты исследования времен переключения тех же ячеек для $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ при $U_0 = 30 \text{ V}$, $\tau_0 = 10 \text{ ms}$ приведены в табл. 3. В оптимальных режимах управления твист-эффектом в DF ЖК были получены значения времени $\tau_{\text{он}}$ 1.5–2 ms. Влияние граничных условий проявилось в различных режимах управления, как видно из табл. 3. Если для поддержания пропускания в состоянии „on“ при твист-эффекте в ячейках 5s и 7as требовалось напряжение с амплитудой около 10 V, то для ячейки, в которой слой ориентирован PI, потребовалось увеличение амплитуды в 3 раза. Время полной переориентации молекул $\tau_{\text{оф}}$ в исходное состояние достигало 25 ms, несмотря на высокие амплитуды U_{hf} , что на порядок выше времени $\tau_{\text{он}}$. Вместе с тем время $\tau_{\text{оф}}$ для исследованных ЖК-ячеек, полученное при управлении процессом релаксации с помощью высокочастотного электрического поля, было на два порядка меньше времени естественной релаксации DF ЖК, которое достигало нескольких секунд.

Заключение

Проведенное исследование динамики твист-эффекта в DF ЖК показало влияние на скорость переориентации молекул как граничных условий межфазного взаимодействия, так и параметров постоянного и переменного низкочастотного и высокочастотного электрических полей. Полученные результаты позволяют предполагать, что путем оптимизации физико-химических свойств ориентирующей поверхности можно уменьшить рабочие напряжения, повысить контраст и понизить времена переключения ЖК-ячеек. Времена переключения менее 1 ms и динамический диапазон до 30 dB позволяют считать перспективным разработку ЖК-устройств на основе твист-эффекта в DF ЖК для систем телекоммуникации.

Работа выполнена при поддержке ведущей научной школы РФ (НШ-5549.2006.9) в рамках ФЦП по мероприятию 1.4, финансируемой за счет ГК № 02.514.11.4057.

Список литературы

- [1] *Mao C., Xu M., Feng W., Hyang T., Wu K., Lia J.* // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5003. P. 121–129.
- [2] *Crossland W.A., Clapp T.V., Wukinson T.D., Manolis I.G., Georgiou A.G., Robertson B.* // Mol. Cryst. & Liq. Cryst. 2004. Vol. 413. P. 363–383.
- [3] *Riza N.A., Khan S.A.* // Appl. Opt. 2004. Vol. 43. N 17. P. 449–3455.
- [4] *Liang X., Lu Y.-Q., Wu Y.-H., Du F., Wang G.-Y., Wu S.-T.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2005. Vol. 44. N 3. P. 1292–1295.
- [5] *Goloniv A.B., Pishnyak J.P., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D.* // Pros. SPIE. 2006. Vol. 6135. P. 277–786.
- [6] *Huang Y., Wen C.-H., Wu S.-T.* // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 021 103-3.
- [7] *Wang H., Wu T.X., Xinyu Zhu X., Wu S.-T.* // Appl. Phys. 2004. Vol. 95. N 10. P. 5502–5507.
- [8] *Kubono A., Kuokane Y., Akiyama R., Tanaka K.* // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. N 12. P. 5855–5859.
- [9] *Golovin A.B., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D.* // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 3864.
- [10] *Kirby A.K., Love G.D.* // Opt. Express. 2004. Vol. 12. N 7. P. 1470–1475.
- [11] *Коншина Е.А., Костомаров Д.С.* // Оптич. журн. 2007. № 10. С. 88–90.
- [12] *Wu S.-T., Efron U., Hess L.D.* // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 44. P. 842–844.
- [13] *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П.* // Оптич. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
- [14] *Коншина Е.А., Федоров М.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 22. С. 15–21.
- [15] *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Воронин Ю.М.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 2. С. 71–76.