

07;12

## Особенности оптического отклика гибридно-ориентированных ячеек с двухчастотным нематическим жидким кристаллом

© Е.А. Коншина, Д.А. Вакулин, Н.Л. Иванова, Е.О. Гавриш, В.Н. Васильев

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

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2011 г.)

Исследованы гибридно-ориентированные ячейки с двухчастотным нематическим жидким кристаллом и влияние на их оптический отклик параметров управляющих электрических полей. Обнаружено, что в отличие от обычных нематических твист-ячеек ангармонические колебания оптического пропускания наблюдались в них в период между переключением НЧ- и ВЧ-напряжений. Получен бистабильный оптический отклик  $V$ -образной формы в результате полевательного приложения в твист-ячейке электрических полей в форме синусоидальных колебаний с частотами 1 и 30 kHz. Время реакции при толщине слоя жидкого кристалла  $8 \mu\text{m}$  и напряжении 50 V составило 10 ms. У гибридно-ориентированной твист-ячейки с большим начальным углом наклона директора около  $70^\circ$  оптический отклик  $V$ -образной формы наблюдался при переключении из наклонного гомеотропного состояния в твист-состояние с помощью поля с частотой 30 kHz. Восстановление первоначальной структуры слоя происходило в результате естественной упругой релаксации, а время реакции увеличилось приблизительно в 4 раза.

### 1. Введение

Динамику переключения устройств на основе жидких кристаллов (ЖК) можно ускорить, повысив прикладываемое к ним напряжение или уменьшая пороговое напряжение эффекта Фредерикса. Однако повышение напряжения не только увеличивает энергопотребление, но и приводит к нежелательным изменениям свойств ЖК, связанных с его нагревом. Одним из альтернативных путей повышения быстродействия ЖК-устройств является использование гибридно-ориентированных нематических (hybrid alignment nematic — HAN) слоев с асимметричными условиями межфазного взаимодействия на противоположных границах раздела с ориентирующей поверхностью. В HAN-ячейке молекулы ЖК гомогенно (параллельно) ориентированы на одной поверхности и гомеотропно (перпендикулярно) ориентированы на другой. Такая геометрия в первом приближении оказывает одинаковое влияние как на гомогенную, так и на гомеотропную ориентации, вызывая нелинейную вариацию наклона директора вдоль слоя ЖК в ячейке. Порог электрооптического эффекта при приложении напряжения в HAN-ячейке уменьшается, и искривление ориентации директора от гомеотропной к гомогенной зависит от знака диэлектрической анизотропии ЖК [1].

Внимание к исследованиям особенностей HAN-структур связано с практическим использованием их в дисплеях [1,2] и в других оптических устройствах на основе жидких кристаллов [3,4]. Кроме снижения порогового напряжения HAN-ячейки обладают более быстрым оптическим откликом по сравнению с обычными ячейками и ахроматическим пропусканием. Недостатком их по сравнению с планарными ЖК-ячейками является понижение

величины фазовой задержки, что следует учитывать при разработке оптических устройств.

В гибридной твист-нематической (hybrid twist nematic — HTN) ячейке с углом закрутки, равным  $120^\circ$ , из-за применения киральной добавки при толщине слоя нематического ЖК около  $4 \mu\text{m}$  было достигнуто время включения, равное 1 ms. Время выключения составило 16 ms, что связано со слабой силой упругой деформации, восстанавливающей твист-структуру, которую можно увеличить, уменьшив толщину слоя и увеличив угол ее закрутки [1]. Большие возможности открываются, когда гибридная структура комбинируется с двухчастотным (ДЧ) нематическим ЖК. В такой HAN-ячейке можно эффективно управлять вращением директора между гомеотропной и гомогенной ориентациями с помощью ДЧ-адресации путем приложения электрического поля к слою ДЧЖК с частотой, которая находится выше и ниже переходной частоты. При переключении HAN-ячейки время релаксации составило  $\sim 19 \text{ms}$  [5]. Вместе с тем время оптического отклика при двухчастотной адресации зависит от начального угла наклона директора [6].

Основной целью настоящей работы было исследование гибридно-ориентированных ячеек, заполненных ДЧ нематическим ЖК, с разными начальными углами наклона директора вблизи противоположных ориентирующих поверхностей, и влияние на их характеристики и времена переключения параметров электрического поля.

### 2. Экспериментальная часть

Исследования проводились на плоскопараллельных ячейках с фиксированным зазором, состоящих из двух стеклянных подложек, на поверхность которых были нанесены слои прозрачного проводящего электрода и

ориентирующего слоя. Толщину зазора ячеек контролировали путем измерения емкости ячейки перед ее заполнением ЖК. В работе использовали ЖК-1001 (НИОПИК) с оптической анизотропией  $\Delta n = 0.26$  на длине волны 632.8 nm и  $\Delta\epsilon = 4.43$  на частоте 1 kHz.

Слой двуокиси церия ( $\text{CeO}_2$ ), полученные наклонным напылением в вакууме с помощью лазера, были использованы для создания наклонной вертикальной ориентации на одной из подложек ЖК-ячейки. Эта технология позволяет варьировать начальный угол наклона директора в интервале от  $36^\circ$  до  $84^\circ$  путем модификации нанотекстуры поверхности  $\text{CeO}_2$  [7]. Для получения гомогенной ориентации молекул ЖК использовали слои  $a\text{-C:H}$ , полученные осаждением паров ацетона с помощью плазмы тлеющего разряда на постоянном токе. При этом подложки располагались под углом  $5^\circ$  по отношению к вертикальной оси устройства.

Для осуществления продольной деформации ДЧЖК НАН-ячейки собирали таким образом, чтобы проекции вертикальной оси при осаждении ориентирующих слоев на верхнюю и нижнюю подложки были параллельны. Характеристики этих ячеек: максимальную фазовую задержку света для заданной длины волны, начальной угол наклона директора и пороговое напряжение рассчитывали с помощью специальной компьютерной программы. Для расчета использовали экспериментальные данные, полученные путем измерения оптического пропускания ячейки в зависимости от напряжения. Измерение оптического пропускания ЖК-ячеек проводили с помощью электрооптической схемы, описанной ранее [8], на длине волны  $0.65 \mu\text{m}$ .

В HTN-ячейках направления директора на противоположных подложках были ортогональны в соответствии с проекциями на них вертикальных осей при осаждении ориентирующих слоев. Исследования особенностей оптического отклика HTN-ячеек, времен включения и выключения проводили с помощью многокомпонентной системы управления на основе LTR34, позволяющей гибко изменять параметры электрического поля. Модульная многоканальная компьютеризированная система предназначена для автоматического ввода/вывода и обработки аналоговых и цифровых данных и управления откликом ЖК-устройств. Она включает в себя базовый блок установки модулей и специализированные съемные блоки-модули для выполнения необходимых задач, в том числе ЦАП, блок усилителя и др., и компьютер. С помощью этой системы можно варьировать параметры электрических полей, такие как: форма колебаний, длительность, частота заполнения, амплитуда, полярность, количество сигналов и промежутки времени между сигналами, а также последовательность подачи пакетов сигналов постоянного и переменного напряжений на ячейку. Для управления системой была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая моделировать параметры электрического сигнала, подаваемого на ЖК-устройство, осуществлять

Таблица 1. Характеристики НАН-ячеек с ДЧЖК

№ ячейки	Толщина слоя ЖК, $\mu$	Максимальная фазовая задержка, $\pi$	Начальный угол наклона, deg	Пороговое напряжение, V
1	8.3	1.8	55	0.4
2	7.6	2.4	48	0.8
3	8.2	3.5	41	0.8

Таблица 2. Характеристики HTN-ячеек с ДЧЖК

№ ячейки	Толщина, слоя ЖК, $\mu$ ,	Время включения, ms	Время выключения, ms	Угол наклона, deg
4	7.4	5	5	58
5	9.3	19	17	70

взаимосвязь модулей с базовым блоком, компьютером и между собой.

Начальный угол наклона директора в НАН-ячейках варьировали, изменяя условия межфазного взаимодействия молекул ДЧЖК с ориентирующей поверхностью на противоположных подложках. В табл. 1 приведены результаты расчета численных значений максимальной фазовой задержки, начального угла наклона директора и порогового напряжения НАН-ячеек с разными граничными условиями, в которых была реализована деформация ДЧЖК вдоль направления электрического поля. Ячейка № 1 была собрана из двух подложек, на одну из которых был осажден слой  $\text{CeO}_2$  под углом  $0^\circ$ , а на другую под углом  $35^\circ$  относительно вертикальной оси. В ячейках № 2 и 3 на одну из подложек осаждали слой  $a\text{-C:H}$ , а на другую слой  $\text{CeO}_2$  под углом  $35^\circ$  и  $19^\circ$  соответственно.

В табл. 2 приведены времена отклика (включения) и релаксации (выключения), полученные для HTN-ячеек. В этих ячейках на одну из подложек наносили ориентирующий слой  $\text{CeO}_2$  под углом  $35^\circ$ , а на другую слой  $a\text{-C:H}$ . Исследование влияния параметров электрического поля на динамику электрооптического отклика HTN-ячеек проводилось путем вариации формы колебания, амплитуды и длительности действия низкочастотных (НЧ) с частотой 1 kHz и высокочастотного (ВЧ) с частотой 30 kHz электрических полей. Время включения и выключения твист-ячеек соответствовало изменению интенсивности оптического сигнала между 10% и 90% его максимальной величины.

### 3. Результаты и их обсуждение

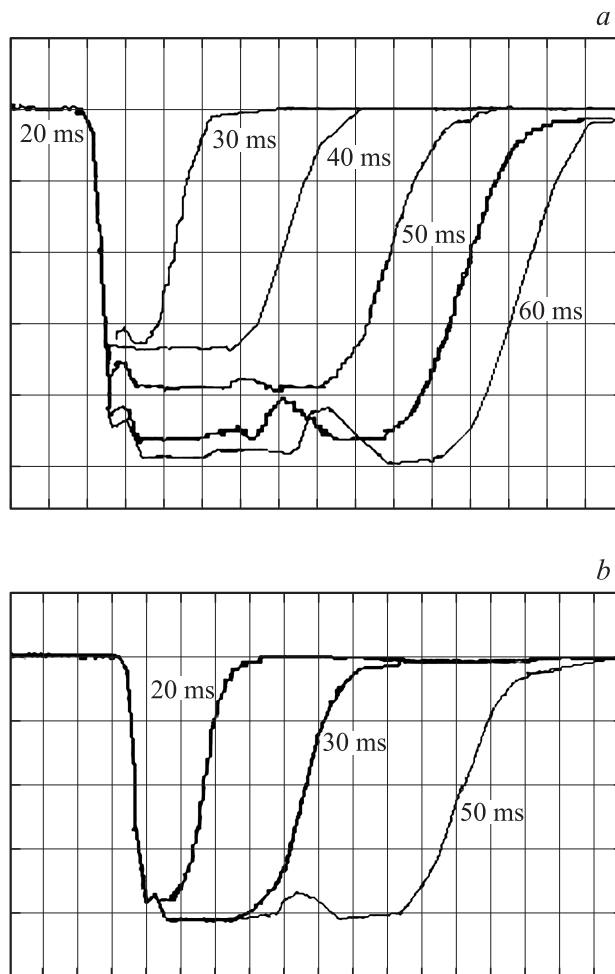
Нематическая твист-ячейка, имеющая близкий к нулю начальный угол наклона директора, расположенная между поляризатором и скрещенным с ним анализатором, пропускает падающее на нее излучение в отсутствие

электрического поля. Угол наклона директора в ней начинает изменяться при приложении напряжения в результате продольной деформации ЖК. При достижении оптического порога в закрученной твист-структуре происходит поворот плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения вдоль оси, перпендикулярной слою, на угол  $\pi/2$ . Этот процесс сопровождается уменьшением пропускания твист-ячейки. При напряжении, существенно превышающем оптический порог эффекта, в центральной части слоя ЖК-молекулы ориентируются перпендикулярно электродам, и твист-структура перестает поворачивать плоскость поляризации света, а ячейка становится непрозрачной в скрещенных поляризаторах. При снятии напряжения молекулы нематического ЖК возвращаются в исходное положение под действием упругих сил, и твист-ячейка вновь начинает пропускать падающее на нее излучение.

ДЧЖК содержит молекулы с положительным и отрицательным знаками диэлектрической анизотропии. Это позволяет управлять положением директора путем последовательного приложения НЧ-напряжения, т.е. ниже переходной частоты воздействующего на молекулы с положительной диэлектрической анизотропией для осуществления продольной деформации слоя ДЧЖК. Приложение ВЧ-напряжения, воздействующего на молекулы с отрицательной диэлектрической анизотропией, приводит к поперечной деформации слоя ДЧЖК, вызывая тем самым процесс релаксации и возвращение молекул ДЧЖК в исходное состояние. Процессы релаксации ДЧЖК под действием ВЧ-электрического поля являются более сложными по сравнению с процессом естественной упругой релаксации, так как на переориентацию молекул влияют упругий и электрический моменты.

Ранее проведенные исследования твист-ячейки с симметричными граничными условиями показали, что после снятия ВЧ-напряжения на заднем фронте осциллограммы электрооптического отклика возможно появление ангармонических осцилляций, что значительно увеличивает время реакции устройства. Влияние на процесс релаксации не только действия ВЧ-поля, но и НЧ-поля, вызывающего оптический отклик, усиливается с уменьшением толщины слоя ДЧЖК. Использование более сложной схемы управления ячейкой позволило уменьшить время реакции твист-ячейки до 5 ms [9]. Для этого между моментами снятия НЧ-напряжения, поддерживающего пропускание, и подачи ВЧ-напряжения вводили дополнительный период, когда напряжение не подавалось.

Анализ осциллограмм электрооптического отклика НТН-ячеек с ДЧЖК показал, что они отличаются от осциллограмм, характерных для твист-ячеек с симметричными граничными условиями и таким же жидким кристаллом. В этом случае слабые ангармонические колебания оптического пропускания наблюдались на осциллограмме НТН-ячеек в промежутке после снятия НЧ-напряжения и приложением ВЧ-напряжения (рис. 1).



**Рис. 1.** Влияние параметров электрических полей на оптический отклик НТН-ячеек с ДЧЖК при последовательном приложении к ним синусоидальных колебаний с частотами 1 и 30 kHz: *a* — напряжением 30 V и длительностью 20–60 ms; *b* — напряжением 50 V и длительностью 20–50 ms.

Было установлено, что на появление этих осцилляций существенно влияет длительность действия приложенного ВЧ-электрического поля. При длительности воздействия более 30 ms на осциллограммах появлялась вторая осцилляция (рис. 1). Ее интенсивность повышалась с увеличением длительности действия пакета НЧ-синусоидальных колебаний. Появление слабых осцилляций оптического пропускания может быть связано с внутренними электрическими полями объемных зарядов, возникающих вблизи границы раздела фаз, поле которых вызывает вращение директора ДЧЖК в приповерхностной области ячейки, а также с обратным потоком. При напряжении более 50 V оптическое пропускание ячейки достигало максимума и далее не изменялось при увеличении длительности НЧ-электрического поля (рис. 1, *b*).

Бистабильный оптический отклик *V*-образной формы у НТН-ячейки № 4 (табл. 2) был получен при последовательном приложении к ней НЧ- и ВЧ-

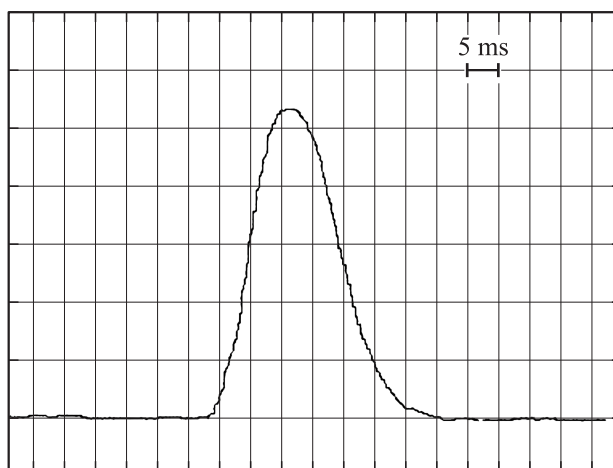
синусоидального напряжения 50/38 V с длительностями 20/100 ms (рис. 2, *a*). Понижение напряжения до 30 V приводило к значительному снижению интенсивности отклика при сохранении его формы. Время включения и выключения ячейки при V-образном оптическом отклике было около 5 ms (табл. 2). Характер отклика изменялся, а время реакции существенно увеличивалось (рис. 2, *b*) при управлении оптическим пропусканием этой HTN-ячейки путем приложения к ней импульса постоянного напряжения или переменного напряжения в форме меандра.

Формирование квазигомеотропной твист-структуры ДЧЖК позволяет упростить схему переключения оптического пропускания и одновременно повысить быстродействие ячейки. Время реакции ячейки с квазигомеотропной твист-структурой с начальным углом наклона директора около 60°, которая формировалась с помощью наклонно напыленных ориентирующих слоев монооксида германия, составило 1.5 ms. Однако из-за слабого сцепления ДЧЖК с ориентирующей поверхностью такая структура была неустойчивой и через некоторое время самопроизвольно переходила из квазигомеотропной твист-структуры в наклонное гомеотропное состояние [10].

Исследования HAN-ячеек с ДЧЖК показали, что изменение граничных условий приводит к вариации значений максимальной фазовой задержки начального угла наклона директора и порогового напряжения (табл. 1). Использование для создания гомогенной ориентации ДЧЖК-слоя *a*-C:H привело к уменьшению угла наклона у ячеек № 2 и 3 и повысило в 2 раза пороговое напряжение по сравнению с ячейкой № 1, в которой на обе подложки был нанесен слой CeO<sub>2</sub>. Это косвенно свидетельствует о более сильном межфазном взаимодействии на границе ДЧЖК со слоем *a*-C:H. В HTN-ячейке № 5 (табл. 2) удалось получить устойчивую



**Рис. 2.** Осциллограммы оптического отклика HTN-ячейки № 4 на длине волны 0.65 μm при приложении НЧ- и ВЧ-полей с напряжением 50/38 V и длительностью 20/100 ms в форме колебаний: *a* — синусоида, *b* — меандр.



**Рис. 3.** Осциллограмма оптического отклика гибридной ДЧЖК твист-ячейки № 5 на длине волны 0.65 μm при приложении электрического поля с частотой 30 kHz в форме меандра напряжением 30 V и длительностью 100 ms.

наклонную гомеотропную твист-структуру с большим углом наклона директора (около 70°). Процесс бистабильного переключения в ячейке № 5 из наклонного гомеотропного состояния ориентации ДЧЖК (непрозрачное состояние) в твист-состояние в отличие от ячейки № 4 осуществлялся путем приложения ВЧ-поля напряжением 30 V и с длительностью 100 ms. Этот процесс сопровождался увеличением оптического пропускания HTN-ячейки в скрещенных поляризаторах. Возвращение в исходное состояние молекул ДЧЖК после снятия напряжения происходило в результате действия только вязкоупругих сил и эффекта текучести жидкого кристалла, что исключало необходимость приложения НЧ-напряжения. При этом бистабильный отклик ДЧЖК имел V-образную форму (рис. 3). Однако у ячейки № 5 время реакции существенно увеличилось по сравнению с ячейкой № 4 (табл. 2), что связано с более медленной переориентацией молекул в результате поперечной деформации ДЧЖК-слоя, чем в результате его продольной деформации.

#### 4. Заключение

Исследовано влияние параметров электрических полей, прикладываемых к слою ДЧЖК в гибридно-ориентированных ячейках с начальной наклонной ориентацией директора вблизи ориентирующих поверхностей. Показано, что в отличие от обычных нематических твист-ячеек ангармонические колебания оптического пропускания наблюдались в них в период между переключением НЧ- и ВЧ-напряжений. Природа этих колебаний может быть связана как с обратным потоком, так и с формированием пространственного заряда в ЖК-ячейке, поле которого вызывает вращение директора в слое ЖК-вблизи границы раздела фаз. При управ-

лении переориентацией директора в HTN-ячейках с помощью синусоидальных колебаний НЧ- и ВЧ-полей был получен бистабильный отклик V-образной формы с временем реакции 10 ms. При увеличении угла наклона в HTN-ячейке до  $70^\circ$  бистабильный отклик V-образной формы наблюдался при переключении из наклонного гомеотропного состояния в твист-состояние путем приложения ВЧ-поля. В этом случае восстановление структуры HTN-ячейки происходило под действием упругих сил. Представленные экспериментальные результаты представляют интерес для разработки оптических ЖК-переключателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках ФЦП по ГК № 02.740.11.0390.

## Список литературы

- [1] Kubono A., Kyokane Y., Akiyama R., Tanaka K. // *Appl. Phys.* 2001. Vol. 90. N 12. P. 5859–5865.
- [2] Derfel G. // *Liquid Crystals.* 2007. Vol. 34. N 10. P. 1201–1214.
- [3] Yang F., Ruan L., Jewell S.A., Sambles J.R. // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15. N 7. P. 4192–97.
- [4] Lu Y.-Q., Liang X., Wu Y.-H., Du F., Wang H.-Y., Wu S.-T. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. N 16. P. 3354–3356.
- [5] Jewell S.A., Taphouse T.S., Sambles J.R. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87. P. 021 106 1–3.
- [6] Галин И.Ф., Коншина Е.А. // *Опт. журн.* 2011. Т. 78. № 6. С. 71–74.
- [7] Коншина Е.А., Иванова Н.Л., Парфенов П.С., Федоров М.А. // *Опт. журн.* 2010. Т. 77. № 12. С. 45–51.
- [8] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С. // *Опт. журн.* 2008. Т. 75. В. 10. С. 73–80.
- [9] Васильев В.Н., Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. // *ЖТФ.* 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 96–100.
- [10] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. Вып. 14. С. 1–6.