

УДК 532.783

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРИЕНТАЦИОННЫХ СТРУКТУР И ОПТИЧЕСКИХ ТЕКСТУР ХОЛЕСТЕРИКА, ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОЙ ИОННОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЦЕПЛЕНИЯ

© 2017 г. В. С. Сутормин<sup>1,\*</sup>, И. В. Тимофеев<sup>1,2</sup>, М. Н. Крахалев<sup>1,2</sup>,  
О. О. Прищепа<sup>1,2</sup>, В. Я. Зырянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук” Институт физики имени Л.В. Киренского, Красноярск, Академгородок

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Сибирский федеральный университет”, Красноярск

\*E-mail: sutormin@iph.krasn.ru

Исследована переориентация холестерического жидкого кристалла с большим шагом геликоида, индуцированная электроуправляемой ионной модификацией поверхностного сцепления. В исходном состоянии в жидкокристаллической ячейке реализовывалась гомеотропная ориентация директора. При воздействии постоянного электрического поля в ячейке формировалась закрученная гомеопланарная структура холестерика.

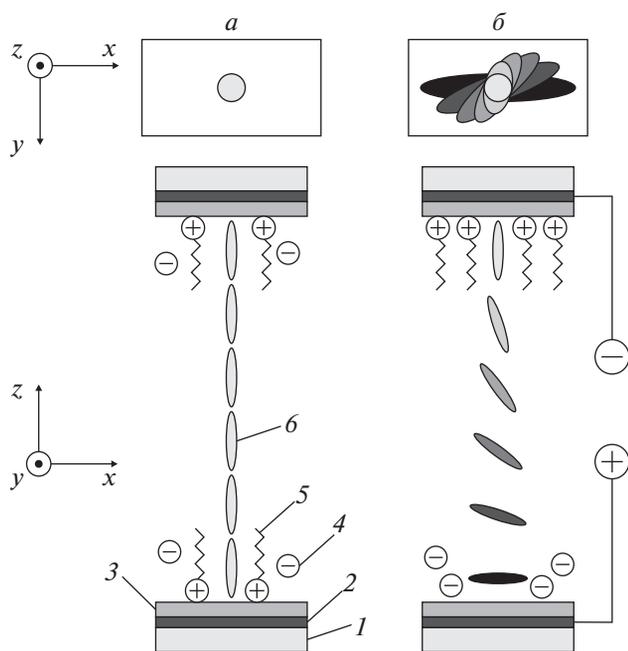
DOI: 10.7868/S036767651705026X

Холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) имеют специфические оптические свойства, проявляющиеся вследствие спирального упорядочения директора [1], что делает ХЖК привлекательными для различных практических приложений, таких как дисплеи, модуляторы света, управляемые дифракционные решетки, жидкокристаллические лазеры и др. При этом работа данных устройств основана на изменении ориентационной структуры холестерика, которая, как правило, осуществляется непосредственным воздействием электрического поля на объем жидкого кристалла. В процессе переориентации директора в объеме ячейки условия сцепления ЖК на межфазной границе остаются неизменными.

Однако переориентация ЖК может быть осуществлена и посредством изменения поверхностного сцепления при воздействии внешних факторов, таких как температура, УФ-излучение или электрическое поле [2–4]. Исследование переориентации директора, вызванной модификацией поверхностного сцепления, интересно как с фундаментальной, так и с практической точки зрения, поскольку могут быть реализованы ориентационно-структурные переходы в ЖК, которые невозможно получить с использованием эффекта Фредерикса. Нами разрабатывается метод электроуправляемой модификации поверхностного сцепления ЖК с использованием ионных сурфактантов, который был применен ранее для

управления ориентационной структурой нематиков в каплях [5] и слоях [6]. Представленная работа посвящена развитию данного метода управления ориентацией ЖК применительно к ячейкам, заполненным холестериком с большим шагом геликоида.

Объектом исследования являлись плоские ЖК-ячейки, состоящие из двух стеклянных подложек с прозрачными ИТО электродами на внутренних сторонах и слоя холестерического ЖК между ними. В качестве ориентирующего покрытия на электроды предварительно нанесли полимерные пленки поливинилового спирта (ПВС), пластифицированные глицериновым компаундом (Гл) в весовом соотношении ПВС : Гл = 1 : 0.383. Нанесение полимерных пленок на подложки производили методом центрифугирования, а ось легкого ориентирования задавали механическим натиранием поверхности полимера. Толщину зазора  $d$  в ячейке задавали тефлоновыми прокладками (спейсерами) и измеряли интерференционной методикой с использованием спектрометра. В качестве ХЖК использовали нематик 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) допированный хиральной добавкой холестерилацетатом в весовом соотношении от 1 : 0.0030 до 1 : 0.0155 соответственно. В нематик предварительно добавляли катионный сурфактант цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ) в весовом соотношении 5ЦБ : ЦТАБ = 1 : 0.002. ЦТАБ, растворяясь в жидком кристал-



**Рис. 1.** Схема ориентационно-структурного перехода, индуцированного постоянным электрическим полем, в ЖК ячейке, заполненной холестериком с добавкой ионного сурфактанта. 1 – стеклянная подложка, 2 – ИТО, 3 – полимерная пленка, 4 – ионы  $\text{Br}^-$ , 5 – ионы  $\text{CTA}^+$ , 6 – ЖК. *a* – Гомеотропно ориентированный слой ЖК в отсутствие электрического поля; *b* – гибридно-упорядоченный слой холестерика, формирующийся вследствие изменения поверхностного сцепления от гомеотропного к планарному на подложке с электродом-анодом. Конфигурация директора в ЖК ячейке представлена в плоскости  $x$ – $y$  (верхний ряд) и в плоскости  $x$ – $z$  (нижний ряд).

ле, распадается на положительно заряженные поверхностно-активные ионы  $\text{CTA}^+$  и отрицательные ионы  $\text{Br}^-$ . В используемых смесях шаг холестерика  $p$  варьировался в диапазоне от 10 до 51 мкм, а соотношение  $d/p$  имело значение от 0.16 до 0.85. Экспериментальное исследование образцов ЖК-ячеек проводили с помощью метода поляризационной микроскопии и электрооптических измерений.

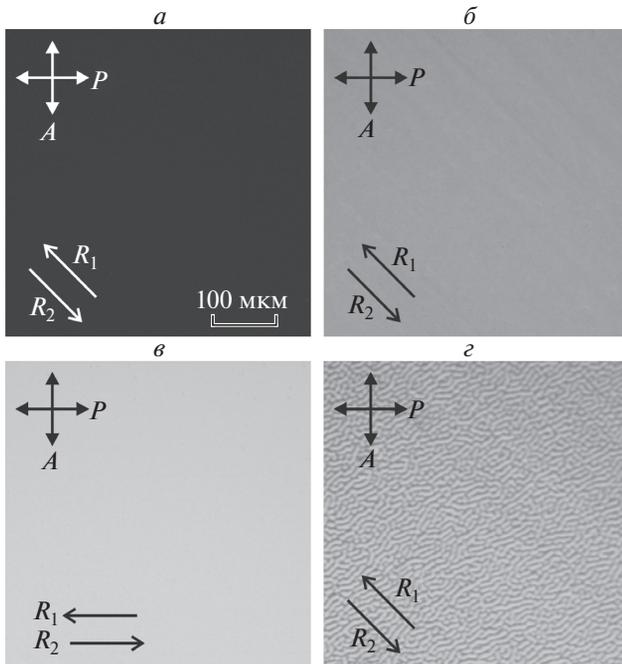
На рис. 1 представлена схема ориентационно-структурного перехода в ЖК-ячейке на основе холестерика, допированного ионным сурфактантом, при воздействии постоянного электрического поля. Адсорбция поверхностно-активных катионов, находящихся в ЖК, приводит к тому, что при достаточной концентрации они формируют слои на верхней и нижней подложке ячейки, которые экранируют планарное ориентирующее действие полимерных покрытий и задают нормальные (гомеотропные) условия сцепления для жидкого кристалла. Формирование однородной гомеотропной или закрученной структуры в слое холестерика с жесткими нормальными условия-

ми сцепления зависит от соотношения толщины слоя ЖК к шагу холестерика  $d/p$ . Пороговое значение перехода  $(d/p)_{\text{пор}}$  определяется следующим выражением [7]:

$$(d/p)_{\text{пор}} = K_{33}/(2K_{22}), \quad (1)$$

где  $K_{33}$  и  $K_{22}$  – упругие модули продольного изгиба и кручения соответственно. Для случая  $d/p < (d/p)_{\text{пор}}$  в ЖК ячейке с жесткими нормальными условиями сцепления холестерическая спираль полностью раскручена, а при  $d/p > (d/p)_{\text{пор}}$  формируется закрученная ориентационная структура. Для типичных материалов пороговое значение  $(d/p)_{\text{пор}}$  имеет значение около 1 [8]. В исследуемых образцах ЖК ячеек  $d/p < 1$ , вследствие этого в исходном состоянии холестерическая спираль полностью раскручена (рис. 1*a*).

При воздействии постоянного электрического поля ионы смещаются к соответствующим электродам, и на подложке с электродом-анодом происходит уменьшение концентрации поверхностно-активных катионов. В результате на данной подложке восстанавливаются планарные условия сцепления, характерные для ориентирующего покрытия, и в ЖК-ячейке происходит переход к закрученной гибридной (гомеопланарной) конфигурации директора (рис. 1*b*). Данный ориентационно-структурный переход приводит к изменению оптической текстуры ЖК ячейки, расположенной между скрещенными поляризаторами (рис. 2). Соотношение  $d/p$  в представленной ячейке составляло 0.4. В отсутствие внешнего электрического поля оптическая текстура слоя ЖК в скрещенных поляризаторах представляла однородную темную область (рис. 2*a*) вне зависимости от угла поворота образца на столике микроскопа, что свидетельствовало о формировании в ячейке гомеотропной ориентации директора (рис. 1*a*). Данная оптическая текстура сохранялась до величины постоянного напряжения  $U = 2.3$  В, при котором начиналось увеличение светопропускания. В диапазоне управляющих напряжений  $2.3 \leq U \leq 3.4$  В оптическая текстура ячейки представляла однородную светлую область (рис. 2*b*). При этом вращение образца на столике микроскопа относительно скрещенных поляризаторов не приводило к темной оптической текстуре. Данный факт демонстрируют оптические текстуры на рис. 2*b* и 2*в*, где угол  $\alpha$  между направлением натирания и поляризатором составлял  $45^\circ$  и  $0^\circ$ , соответственно. Это свидетельствовало о формировании в ячейке закрученной конфигурации директора (рис. 1*b*). Кроме того, при  $\alpha = 0^\circ$  (рис. 2*в*) вращение анализатора также не позволяло получить темную оптическую текстуру. Это показывает, что в данном случае свет после прохождения слоя с гибридно-упорядоченным холестериком перестает быть линейно-поляризованным. При достижении  $U = 3.5$  В в ЖК

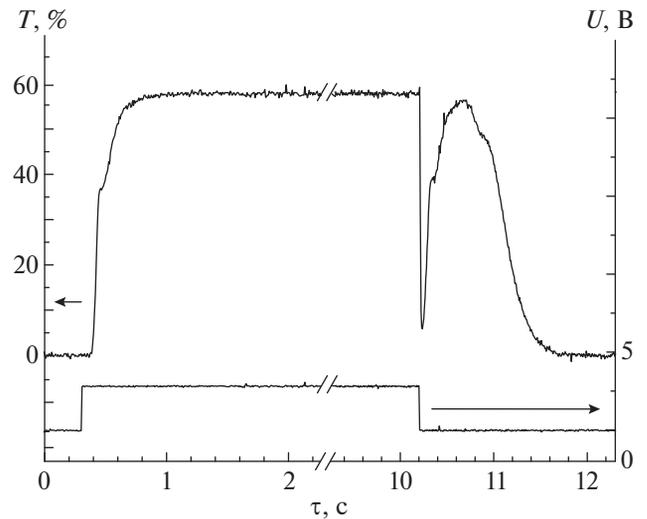


**Рис. 2.** Фотографии оптических текстур слоя холестерика, допированного ионным сурфактантом, сделанные при различных значениях управляющего напряжения  $U$  и углах  $\alpha$  между направлением натирки нижней подложки ( $R_1$ ) и поляризатором ( $P$ ):  $a - U = 0$  В,  $\alpha = 45^\circ$ ;  $b - U = 2.8$  В,  $\alpha = 45^\circ$ ;  $c - U = 2.8$  В,  $\alpha = 0^\circ$ ;  $d - U = 3.7$  В,  $\alpha = 45^\circ$ . Толщина слоя ЖК 8.1 мкм. Шаг холестерика 21 мкм.  $A, R_2$  – направления анализатора и натирания верхней подложки соответственно.

ячейке начинали формироваться домены, которые отчетливо видны при  $U = 3.7$  В (рис. 2*d*).

Такие же изменения оптической текстуры при приблизительно тех же управляющих напряжениях наблюдались в ЖК ячейках с соотношениями  $d/p = 0.16$  и  $0.85$ . Следует отметить, что наблюдаемые изменения оптической текстуры не могут быть вызваны действием эффекта Фредерикса, поскольку в эксперименте использовался ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. В этом случае эффект Фредерикса мог бы привести только к стабилизации исходной гомеотропной конфигурации директора.

На рис. 3 представлена осциллограмма оптического отклика ЖК ячейки на прямоугольный импульс электрического поля амплитудой 2.8 В и длительностью 10 с. В данном случае ЖК ячейка располагалась между скрещенными поляризаторами так, чтобы направление натирки подложек совпадало с поляризацией падающего света ( $\alpha = 0^\circ$ ). Величина светопропускания определялась как  $T = I_t/I_0$ , где  $I_0$  – интенсивность излучения, прошедшего первый поляризатор,  $I_t$  – его интенсивность после второго поляризатора. В исходном состоянии светопропускание системы близко к нулю, что обусловлено гомеотропной ориентацией



**Рис. 3.** Осциллограмма электрооптического отклика ЖК ячейки, заполненной холестериком с добавкой ионного сурфактанта, в скрещенных поляризаторах. Направление натирания подложек совпадает с поляризатором. Амплитуда приложенного электрического импульса 2.8 В. Отношение толщины слоя ЖК к шагу холестерика  $d/p = 0.4$ .

директора. При подаче электрического импульса происходило увеличение светопропускания системы, вызванное формированием в ЖК-ячейке структуры гибридно-упорядоченного холестерика, при этом светопропускание в насыщении достигало значения 59%. Время включения  $\tau_{on}$ , определенное как интервал между началом действия электрического импульса и увеличением светопропускания до 90% от величины в насыщении, составляло 0.3 с. Время выключения  $\tau_{off}$ , определенное как промежуток времени между окончанием действия электрического импульса и уменьшением светопропускания до 10% от величины в насыщении, составляло 1.21 с. В диапазоне управляющих напряжений  $2.6 \leq U \leq 3.2$  В время включения  $\tau_{on}$  оставалось практически неизменным, а время выключения  $\tau_{off}$  возрастало с 0.51 до 1.75 с. Для случая  $\alpha = 45^\circ$   $\tau_{on}$  имело значение около 0.13 с, а  $\tau_{off}$  возрастало с 0.59 до 1.75 с.

В работе впервые описан ориентационно-структурный переход в слое холестерического жидкого кристалла с большим шагом геликоида, вызванный электроуправляемой ионной модификацией поверхностного сцепления. Показано, что постоянное электрическое поле индуцирует в ЖК-ячейке переход от гомеотропной конфигурации директора к закрученной гибридной структуре. При этом процесс переориентации имеет пороговый характер и в определенном диапазоне управляющих напряжений проходит без возникновения электрогидродинамических неустойчивостей. Время включения для исследо-

ванных ЖК ячеек имело значение порядка десятых долей секунды, а время выключения — порядка секунды.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края (грант 16-42-240704 р\_а). В.С. Сутормин благодарен РФФИ за поддержку исследований по грантам № 16-32-60036 мол\_а\_дк и № 16-32-00164 мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blinov L.M., Chigrinov V.G.* Electrooptics Effects in Liquid Crystal Materials. N. Y., Springer, 1994. 464 p.
2. *Ryschenkow G., Kleman M.* // J. Chem. Phys. 1976. V. 64. № 1. P. 404.
3. *Ichimura K., Suzuki Y., Seki T., Hosoki A., Aoki K.* // Langmuir. 1988. V. 4. Iss. 5. P. 1214.
4. *Komitov L., Helge B., Felix J., Matharu A.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. Iss. 2. P. 023502.
5. *Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Прищепина О.О., Шабанов А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. Вып. 6. С. 440.
6. *Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепина О.О., Зырянов В.Я.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. Вып. 8. С. 562.
7. *Зельдович Б.Я., Табириян Н.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. Вып. 8. С. 428.
8. *Oswald P., Baudry J., Pirkl S.* // Phys. Rep. 2000. V. 337. Iss. 1–2. P. 67.