

09

## **Динамика отклика электрооптической ячейки на основе слоя нематика с управляемым поверхностным сцеплением**

© В.С. Сутормин, М.Н. Крахалев, В.Я. Зырянов

Институт физики им. Л.В. Киренского,  
Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск  
E-mail: zyr@iph.krasn.ru

*Поступило в Редакцию 28 декабря 2012 г.*

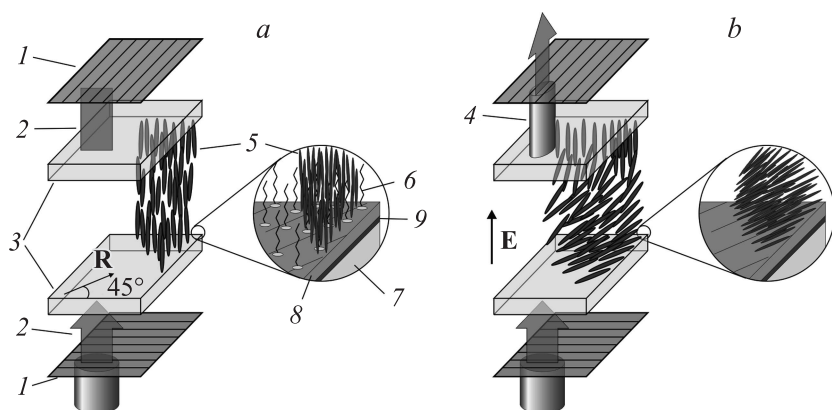
Исследованы электрооптические характеристики ячейки на основе слоя нематического жидкого кристалла, управляемого за счет модификации поверхностного сцепления ионным сурфактантом. Использовалась инверсная мода эффекта, при этом нематик был сориентирован гомеотропно в исходном состоянии и переходил к гибридной гомеопланарной структуре под действием постоянного электрического поля. Рассмотрены зависимости динамических параметров оптического отклика от величины приложенного напряжения.

Жидкие кристаллы (ЖК) на сегодняшний день являются одним из основных функциональных материалов, используемых в оптоэлектронике, особенно в технике отображения информации. В этой области продолжают активные исследования, направленные на создание новых материалов ЖК и устройств на их основе. Традиционные методы управления ЖК базируются на использовании широко известного ориентационно-структурного перехода Фредерикса под действием

электрического поля [1], ориентирующего ЖК так, чтобы величина его диэлектрической проницаемости была максимальной. При этом поверхностное сцепление ЖК с подложками остается неизменным. Принципиально новый подход к управлению ЖК основан на локальных переходах Фредерикса [2], когда, например, электрическое поле модифицирует граничные условия, что затем приводит к переориентации всего слоя ЖК [3]. Такой переход, в частности, может быть реализован за счет изменения поверхностного сцепления посредством электроуправляемого варьирования концентрации ионных сурфактантов [4–6]. Особенности ориентационно-структурных превращений в слое нематического ЖК с электрически управляемыми граничными условиями, обусловленные суммарным вкладом различных эффектов, подробно рассмотрены в [7]. Данная работа нацелена на исследование динамики отклика оптической ячейки на основе слоя нематика с ионно-сурфактантным управлением в зависимости от величины приложенного напряжения.

Объектом исследования являлись плоские ячейки ЖК (рис. 1), состоящие из двух стеклянных подложек с прозрачными ИТО электродами на внутренних сторонах и слоя нематического ЖК между ними. В качестве ориентирующего покрытия на электроды предварительно наносились полимерные пленки толщиной около  $1.5\ \mu\text{m}$  на основе поливинилового спирта (PVA), пластифицированного глицерином (Gl) в весовом соотношении PVA : Gl = 1 : 0.26. Ось легкого ориентирования формировалась механическим натиранием поверхности полимера в заданном направлении. В качестве ЖК использовался нематик 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5CB), который допировался катионным сурфактантом цетилтриметиламмоний бромидом (СТАВ) в весовом соотношении 5CB : СТАВ = 1 : 0.008. Заполнение ячеек ЖК производилось капиллярным методом в изотропной фазе. Толщина слоя ЖК в изученных образцах составляла около  $6\ \mu\text{m}$ .

Для исследования электрооптических характеристик применялся He–Ne-лазер (Linco) с длиной волны  $\lambda = 0.633\ \mu\text{m}$ , излучение которого проходило последовательно через поляризатор, ячейку ЖК, анализатор и попадало на фотоприемник. Измерения проводились в геометрии скрещенных поляризаторов. Величина светопропускания определялась как  $T = (I_t/I_0) \cdot 100\%$ , где  $I_0$  — интенсивность излучения, прошедшего первый поляризатор,  $I_t$  — интенсивность после второго поляризатора. Угол между направлением натирания подложек и направлением поляризаторов составлял  $\pm 45^\circ$ . Монополярные электрические импульсы



**Рис. 1.** Схема работы ячейки ЖК в геометрии скрещенных поляризаторов. *a* — в отсутствие электрического поля нематик ориентирован гомеотропно и свет не проходит через систему; *b* — под действием постоянного электрического поля поверхностное сцепление на нижней подложке становится планарным, вследствие чего в слое нематика формируется гомеопланарная структура, делающая возможным прохождение света. 1 — скрещенные поляризаторы, 2 — линейно-поляризованный свет, 3 — подложки, 4 — эллиптически-поляризованный свет, 5 — молекулы ЖК, 6 — поверхностно-активные ионы, 7 — стеклянная подложка, 8 — натертая полимерная пленка ( $R$  — направление натирания), 9 — ITO-покрытие.

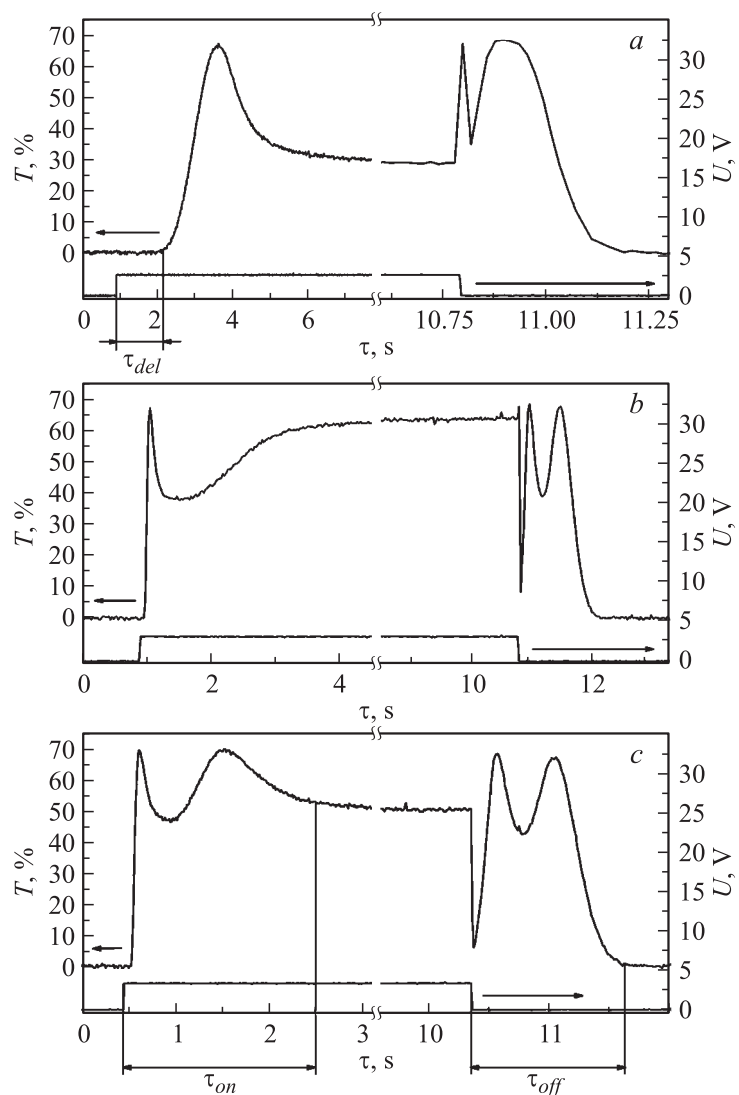
прямоугольной формы с варьируемой амплитудой и длительностью 10 с подавались от генератора АНР-3122 (АКТАКОМ) параллельно на электроды ячейки и USB-осциллограф DISCO (Трейд-М), на который также подавался сигнал от фотоприемника.

Полимерные пленки на основе поливинилового спирта и глицерина задают для 5СВ планарные граничные условия [8]. Однако используемой концентрации СТАВ в ЖК было достаточно для того, чтобы слой адсорбированных на подложках ионов  $СТА^+$  мог экранировать ориентирующее действие полимерного покрытия и задать гомеотропное поверхностное сцепление. Таким образом, в исходном состоянии в ячейке ЖК формировалась гомеотропная ориентация директора (рис. 1, *a*), соответствующая условиям реализации инверсной моды эффекта ионной

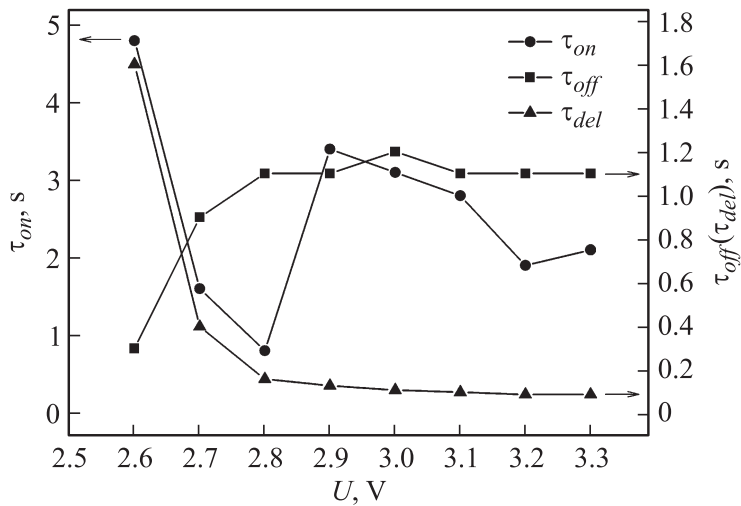
1\* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 13

модификации межфазной границы [9,10]. При приложении постоянного электрического поля подложка с электродом-анодом, освобождается от слоя поверхностно-активных ионов цетилтриметиламмония ( $\text{СТА}^+$ ), вследствие чего на ней восстанавливаются планарные граничные условия, характерные для используемого полимерного покрытия. На данной подложке молекулы ЖК ориентируются вдоль направления натирания, и в ячейке образуется гибридная гомеопланарная ориентация директора (рис. 1, *b*). Переход от гомеотропной ориентационной структуры директора к гибридной должен сопровождаться изменением оптических характеристик ячейки ЖК. Так, светопропускание ячейки с гомеотропно ориентированным нематиком в геометрии скрещенных поляризаторов должно быть близко к нулю, поскольку двулучепреломление отсутствует (рис. 1, *a*). В случае гибридной ориентации директора за счет двулучепреломления в слое ЖК часть светового потока может пройти через анализатор (рис. 1, *b*).

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы управляющих электрических импульсов и оптического отклика исследуемой ячейки ЖК. В отсутствие электрического поля светопропускание ячейки близко к нулю и не изменяется при азимутальном повороте образца относительно поляризаторов, что соответствует гомеотропной ориентации директора. Такая же ситуация сохраняется при увеличении управляющего напряжения вплоть до  $U = 2.5 \text{ V}$ . При достижении  $U = 2.6 \text{ V}$  наблюдалось изменение светопропускания ячейки ЖК, которое проходило через максимум 67% и затем снижалось до уровня 29% к концу действия электрического импульса (рис. 2, *a*). Данные изменения объясняются переходом гомеотропной ориентации директора к гибридной вследствие ионной модификации поверхностного сцепления. Наличие порогового значения управляющего напряжения связано с существованием критической плотности адсорбированных ионов  $\text{СТА}^+$ , ниже которой уже не блокируется ориентирующее действие полимерного покрытия. Увеличение управляющего поля приводило к постепенному росту величины светопропускания в конце действия электрического импульса, которое достигало величины 64% при  $U = 3.1 \text{ V}$  (рис. 2, *b*). Однако при дальнейшем увеличении напряжения наблюдалось постепенное уменьшение  $T$  до 50% (рис. 2, *c*). Физические механизмы, лежащие в основе специфического поведения кривой  $T(\tau)$  во время действия электрического импульса и после его выключения, детально описаны в [7].



**Рис. 2.** Осциллограммы оптического отклика ячейки ЖК, управляемой с использованием ионно-сурфактантного метода. В нижней части рисунка показаны импульсы электрического поля с амплитудой: *a* —  $U = 2.6 \text{ V}$ , *b* —  $U = 3.1 \text{ V}$ , *c* —  $U = 3.3 \text{ V}$ . Толщина слоя ЖК —  $6 \mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Зависимости времен задержки  $\tau_{del}$ , включения  $\tau_{on}$  и релаксации  $\tau_{off}$  ячейки ЖК от величины управляющего напряжения.

На рис. 3 представлены зависимости динамических параметров оптического отклика от величины управляющего напряжения. Рассмотрим сначала задержки  $\tau_{del}$ , которое определялось как промежуток времени между моментом включения электрического импульса и началом изменения светопропускания ячейки ЖК (рис. 2, а). При увеличении амплитуды импульса в диапазоне от 2.6 до 3.3 V время задержки  $\tau_{del}$  снижалось с 1.6 до 0.1 s. Такая корреляция объясняется диффузным характером процесса движения ионов. Чем больше величина поля, тем больше скорость перемещения ионов к соответствующим электродам и, следовательно, тем меньше время требуется для экранировки воздействия приложенного электрического поля, стабилизирующего гомеотропную ориентацию нематика.

В отличие от  $\tau_{del}$  зависимость времени включения  $\tau_{on}$ , определенного как интервал между началом действия электрического импульса и выходом светопропускания на насыщение (рис. 2, с), имеет немонотонный характер (рис. 3). Видно, что  $\tau_{on}$  быстро уменьшается с 4.8 до 0.8 s в диапазоне управляющих напряжений 2.6–2.8 V. Такое уменьшение  $\tau_{on}$

обусловлено ускорением модификации поверхностного сцепления на подложке с электродом-анодом. Однако при  $U = 2.9 \text{ V}$  происходит скачок величины  $\tau_{on}$  с 0.8 до 3.4 s, а затем время включения вновь плавно снижается до 2.1 s при  $U = 3.3 \text{ V}$ . Следует отметить, что аналогичная аномалия наблюдалась ранее в пленке капсулированного полимером нематического ЖК с ионно-сурфактантным управлением [11]. Это дает основания предположить, что процесс исследуемых ориентационно-структурных превращений обусловлен совокупностью по меньшей мере двух физических механизмов. При малом напряжении  $U \leq 2.8 \text{ V}$  доминирует эффект ионной модификации поверхностного сцепления, а в области  $U \leq 2.9 \text{ V}$  превалирует конкурирующий механизм, выяснение природы которого требует проведения специального исследования.

Время выключения  $\tau_{off}$  определялось как промежуток времени между окончанием действия электрического импульса и релаксацией светопропускания к исходному нулевому уровню (рис. 2, *c*). В диапазоне 2.6–2.8 V  $\tau_{off}$  возрастало с 0.3 до 1.1 s, а затем оставалось практически неизменным до 3.3 V. Такое поведение зависимости  $\tau_{off}(U)$  характерно для многих релаксационных процессов, и в частности для ячеек ЖК с классическим переходом Фредерикса [12].

Таким образом, нами проведен анализ осциллограмм оптического отклика ячейки ЖК, управляемой с использованием эффекта электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления. Пороговое значение управляющего напряжения составляет 2.6 V, максимальная величина светопропускания 64% в режиме насыщения достигалась при  $U = 3.1 \text{ V}$ . Для исследуемой ячейки минимальные значения динамических параметров заметно превышают аналогичные значения для традиционных устройств ЖК: время задержки оптического отклика  $\tau_{edl} = 0.1 \text{ s}$ , время включения  $\tau_{on} = 0.8 \text{ s}$ , время выключения  $\tau_{off} = 1.1 \text{ s}$ . Однако не исключается возможность существенного улучшения быстродействия за счет варьирования состава материала, параметров управляющего поля и конструктивных схем реализуемого эффекта.

Работа выполнена частично при поддержке грантов: РФФИ № 12-03-00816, 12-02-31613, 12-03-31144, президиума РАН № 24.32; СО РАН № 30, 101; Министерства образования науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0730.

## Список литературы

- [1] *Fredericksz V.K., Zolina V.* // Trans. Far. Soc. 1933. V. 29. P. 919–930.
- [2] *Dubois-Violette E., De Gennes P.G.* // J. de Phys. Lett. 1975. V. 36. P. L-255–L-258.
- [3] *Komitov L., Helgee B., Felix J., Matharu A.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 023 502-1–023 502-3.
- [4] *Petrov A.G., Durand G.* // Liquid Crystals. 1994. V. 17. P. 543–554.
- [5] *Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Shabanov A.V.* // JETP Letters. 2007. V. 86. P. 383–388.
- [6] *Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. V. 489. P. 273/[599]–279/[605].
- [7] *Sutormin V.S., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya.* // JETP Letters. 2012. V. 96. P. 511–516.
- [8] *Cognard J.* Alignment of nematic Liquid Crystals and Their Mixtures. London, New York, Paris: Gordon and Breach Science Publishers, 1982.
- [9] *Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Shabanov A.V.* // JETP Letters. 2008. V. 88. P. 597–601.
- [10] *Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2009. V. 512. P. 152/[1998]–157/[2003].
- [11] *Krakhalev M.N., Loiko V.A., Zyryanov V.Ya.* // Technical Physics Letters. 2011. V. 37. P. 34–36.
- [12] *Blinov L.M.* Structure and properties of liquid crystals. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2011.