

УДК 532.783:535.583.1

БЫСТРАЯ МОДА В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ПЕРИОДА ЭЛЕКТРОДНЫХ РЕШЕТОК

© 2019 г. А. Р. Гейвандов^{1,*}, И. В. Симдянкин¹, М. И. Барник¹, В. С. Палто¹, С. П. Палто¹

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

* E-mail: ageivandov@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2018 г.

После доработки 25.05.2018 г.

Принята к публикации 08.06.2018 г.

В ячейке с гомеотропно ориентированным слоем нематического жидкого кристалла (ЖК) и встречно-штыревыми электродами наблюдается увеличение скорости электрооптического переключения при уменьшении периода электродных решеток. При этом в электрооптическом отклике присутствуют две моды: быстрая и медленная. Как показало численное моделирование, развитие быстрой моды связано с деформацией директора ЖК в приповерхностном слое. Напротив, развитие медленной моды определяется тем, что деформация в объеме ЖК распространяется значительно медленнее. Наблюдаемый эффект экспериментально продемонстрирован в режиме двунаправленного переключения с использованием двух скрещенных между собой встречно-штыревых электродов, расположенных по обе стороны слоя ЖК.

DOI: 10.1134/S002347611903007X

ВВЕДЕНИЕ

Легкие и компактные модуляторы света и дисплеи на основе жидких кристаллов (ЖК) окружают нас повсеместно. Одной из ключевых характеристик ЖК-модулятора является время переключения. В ходе развития ЖК-технологий именно уменьшение времени переключения привело к тому, что ЖК-устройства стали одним из основных типов устройств отображения видеоинформации. Прогресс в этом направлении связан с открытием новых режимов переключения и оптимизацией свойств смесевых ЖК-материалов [1].

Первый практически значимый эффект – твист-нематический режим (twist nematic (TN) mode) – был открыт в 70-х гг. [2]. В TN-режиме переключение осуществляется между закрученным и нормальным распределениями поля директора ЖК. К достоинствам TN-режима можно отнести простую технологию создания информационных дисплеев, к недостаткам – малые углы их обзора. Стремление улучшить характеристики ЖК-модуляторов стало движущей силой для появления новых режимов переключения. Помимо TN-режима в настоящее время распространены режим с вертикальной ориентацией – vertically aligned (VA) mode, режим переключения в плоскости слоя – in-plane switching (IPS) mode и его модификация fringe-field switching (FFS) mode [3].

Типичная TN-ячейка между скрещенными поляризаторами работает в так называемом “нормально-белом” режиме, т.е. пропускает свет при выключенном электрическом поле. Слой нематического ЖК расположен между двух стекол с прозрачными сплошными электродами и ориентирующими слоями, которые задают закрученное на 90° распределение поля директора (локальной оптической оси) по толщине слоя. Снаружи ячейки расположены поляризационные пленки, оси пропускания которых взаимно ортогональны. Свет от источника поляризуется входным поляризатором, затем направление поляризации поворачивается спиральной структурой ЖК-слоя на 90° , и свет проходит через выходной поляризатор. При приложении электрического поля, параллельного нормали к слою, директор ЖК почти во всем слое переориентируется в гомеотропное состояние, и свет практически полностью блокируется выходным поляризатором. Однако вблизи границ слоя остаются тонкие подслои ЖК, которые не переключаются, и свет частично проходит, снижая оптический контраст модулятора. Данную утечку света необходимо компенсировать дополнительными оптическими слоями.

В отличие от TN-режима VA-мода обеспечивает “нормально-черный” режим, т.е. свет не проходит через оптическую систему при выключенном электрическом поле. В VA-модуле ЖК имеет

гомеотропную начальную ориентацию и проблема, связанная с компенсацией утечки от пристеночных слоев, отсутствует, поскольку глубина темного состояния фактически определяется качеством поляризаторов. Однако VA-мода имеет свои недостатки — при нулевом преднаклоне молекул ЖК у поверхности при использовании ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией момент включения оказывается затянут во времени из-за малого момента сил, действующего на молекулы ЖК. Поэтому для сокращения времени переключения в VA-режиме используют опорное напряжение, которое создает небольшой преднаклон директора, способствующий ускорению поворота молекул, но, к сожалению, это отрицательно сказывается на уровне темного состояния [4]. Задача повышения быстродействия в ячейке с вертикально ориентированным ЖК-слоем, изначально имеющим максимально возможное темное состояние, представляет важный научно-практический интерес.

В [5] предложен метод двунаправленного переключения, который заключается в переключении направления электрического поля в слое ЖК. В одной из простейших геометрий, когда две электродные решетки, расположенные по обе стороны слоя ЖК, скрещены, в электрическом поле исходное гомеотропное состояние директора ЖК может переключаться в состояние с квазизакрученным распределением поля директора. В силу данного свойства авторы назвали этот режим ITN (inverse twisted nematic) модой по аналогии с [6]. Отметим, что в рассматриваемом случае ITN-мода принципиально отличается от предложенного в [6] режима с аналогичным названием, так как не используется хиральная ЖК-смесь, а закрученное состояние возникает из-за закрученного пространственного распределения электрического поля. Общим является то, что в ITN-моде реализуется “нормально-черный” режим, когда благодаря начальной гомеотропной ориентации ЖК оптическая система блокирует свет при выключенном электрическом поле, а светлое состояние возникает из-за закрутки поля директора в электрическом поле. В [6] использована нематическая ЖК-смесь с хиральной добавкой и отрицательной диэлектрической анизотропией. Также в ЖК-смеси содержался поверхностно-активный компонент, способствующий гомеотропной ориентации ЖК. В более поздних работах [7–11] для стабилизации твист-распределения при включенном электрическом поле электроды покрывались пленкой, индуцирующей гомеотропную ориентацию, а затем поверхность пленки натиралась для создания выделенного направления (легкой оси).

В экспериментах авторов обратный твист-эффект достигался следующим способом [12–14]. ЖК-материал с положительной диэлектрической

анизотропией и без холестерических добавок ориентирован гомеотропно при помощи ориентирующих слоев из хромолана. По обеим сторонам ЖК-слоя на стеклянных подложках сформированы встречно-штыревые электроды. Распределение потенциалов на электродах позволяет задавать два типа поля: твист-планарное, когда вектор поля параллелен плоскости слоя и поворачивается на 90° при перемещении вдоль нормали к слою ЖК от нижней до верхней границы, и нормальное — вектор этого поля ориентирован преимущественно вдоль нормали к слою ЖК. Поскольку электрическое поле используется как для включения, так и для выключения светлого состояния, скорость переключения в данном модуляторе света значительно выше по сравнению с ЖК-модуляторами, работающими в традиционных режимах, где исходное состояние восстанавливается в результате свободной релаксации поля директора ЖК.

В [12, 14] исследовались электрооптические характеристики ITN-моды в режиме двунаправленного переключения поля. Обнаружено, что при больших периодах решеток (от 6 до 15 мкм) электрическое поле проникает практически на всю глубину слоя ЖК и эффект повышения быстродействия ITN-режима достигается благодаря исключению стадии свободной релаксации поля директора ЖК (электрическое поле действует при включении как светлого, так и темного состояний).

В настоящей работе изучена возможность увеличения быстродействия ITN-режима за счет уменьшения периода электродных решеток. В электрооптическом отклике ЖК-ячейки с периодом электродных решеток 1.76 мкм обнаружены два процесса с существенно разной скоростью (быстрый и медленный). Рассмотрены особенности этих процессов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема фрагмента экспериментальной ЖК-ячейки показана на рис. 1. Слой нематического ЖК помещен между двумя стеклянными подложками с непрозрачными встречно-штыревыми электродами из хрома на внутренних поверхностях. Нижние (A_1, A_2, \dots, A_n) и верхние (B_1, B_2, \dots, B_n) электроды ориентированы перпендикулярно друг другу. Ориентирующие слои из хромолана задают вертикальную (гомеотропную) ориентацию ЖК. Ширина w встречно-штыревых электродов и зазор l между соседними электродами варьировались. Для исследования электрооптических свойств ячейка помещалась между поляризаторами, скрещенными под углом 90° . Ось пропускания входного поляризатора совпадала с

волновым вектором решетки встречно-штыревых электродов.

В качестве ЖК-материала использовалась нематическая смесь ZLI-1957/5 производства компании Merck GmbH с оптической анизотропией $\Delta n = 0.1213$, положительной диэлектрической анизотропией $\Delta \epsilon = +4.5$ и вращательной вязкостью $\gamma = 105$ мПа·с. Все эксперименты проводились при температуре $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

В [14] исследовались ячейки с электродными решетками, период p которых варьировался от 6 до 15 мкм. С уменьшением периода p до 6 мкм время переключения уменьшилось до 1 мс. В настоящей работе использовались электродные решетки с $w = l = 0.88$ мкм и $p = 1.76$ мкм (Центр коллективного пользования. Проектирование и изготовление фотошаблонов, АО “Зеленоградский инновационно-технологический центр”, Зеленоград).

В [12] авторы разработали электрическую схему, которая позволяет управлять электрическими потенциалами $\phi(t)$ на электродах ячейки. Управление потенциалами позволяет переключаться между двумя типами полей – нормальным, т.е. направленным преимущественно по нормали к плоскости подложек, и твист-планарным, при котором распределение вектора поля преимущественно планарное и закручено на 90° по толщине слоя ЖК.

Для исследования электрооптических свойств ЖК-ячейка помещалась между скрещенными поляризаторами поляризационного микроскопа Polam P-113 (“ЛОМО”, Россия), штатный источник света которого ограничивался фильтром с пропусканием в диапазоне длин волн 400–700 нм. Световой поток регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-18, подключенным к осциллографу Tectronix TDS 3012 или виртуальному осциллографу Physlab. Пакет программного обеспечения Physlab и 16-битный АЦП/ЦАП Zetlab-210 (ООО “Электронные технологии и метрологические системы”, Зеленоград) использовались для генерации управляющих электрических импульсов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показаны осциллограммы электрооптического отклика при переключении электрического поля между планарным состоянием, индуцирующим твист-ориентацию поля директора ЖК, и нормальным состоянием, индуцирующим квази-гомеотропную ориентацию. Как отмечалось выше, планарное твист-индуцирующее поле приводит к прозрачному состоянию оптической системы. Коэффициент пропускания всей системы в данном случае составляет $\sim 14\%$.

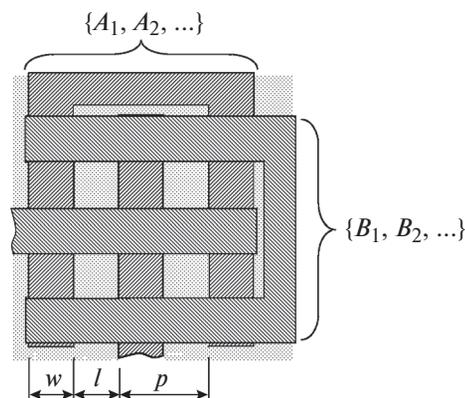


Рис. 1. Схема фрагмента ЖК-ячейки со скрещенными встречно-штыревыми электродами с периодом p (вид сверху).

Особенностью электрооптического отклика является то, что при переключении направления поля ярко выражены два переходных процесса. Особенно это проявляется при амплитудах потенциала, превышающих 5 В. Например, для кривой 6 ($U_0 = 7$ В) после включения твист-планарного поля происходит быстрый субмиллисекундный рост пропускания до уровня $\sim 6\%$. Последующее возрастание пропускания до конечного уровня $\sim 14\%$ идет медленно – за ~ 20 мс.

В [15] при помощи численного моделирования системы с одной электродной решеткой и нематическим ЖК впервые показано, что при малых периодах электродной решетки в электрооптическом отклике проявляются две моды, которые условно можно назвать поверхностной и объемной. Поверхностная мода связана с тем, что при приложении электрических потенциалов к электродной решетке сильное электрическое поле оказывается локализованным на глубине менее периода решетки от поверхности. Поэтому сначала возникает сильная деформация поля директора ЖК именно вблизи поверхности электродных решеток. Этот процесс очень быстрый. Далее деформация распространяется в глубь слоя ЖК, но с меньшей скоростью.

На рис. 3 показаны зависимости времен электрооптического переключения от амплитуды электрического потенциала $|\phi|$ после включения твист-планарного поля для объемной (1) и поверхностной (2) мод. Данные получены из анализа рис. 2. Как видно, поверхностная мода почти в 10 раз быстрее объемной. При амплитуде потенциала 10 В (напряжение между соответствующими парами электродов – 20 В) время включения светлого состояния – около 100 мкс, а время перехода в темное состояние рекордно короткое – 50 мкс. Как было показано в [16, 17], при уменьшении периода электродной решетки до субмик-

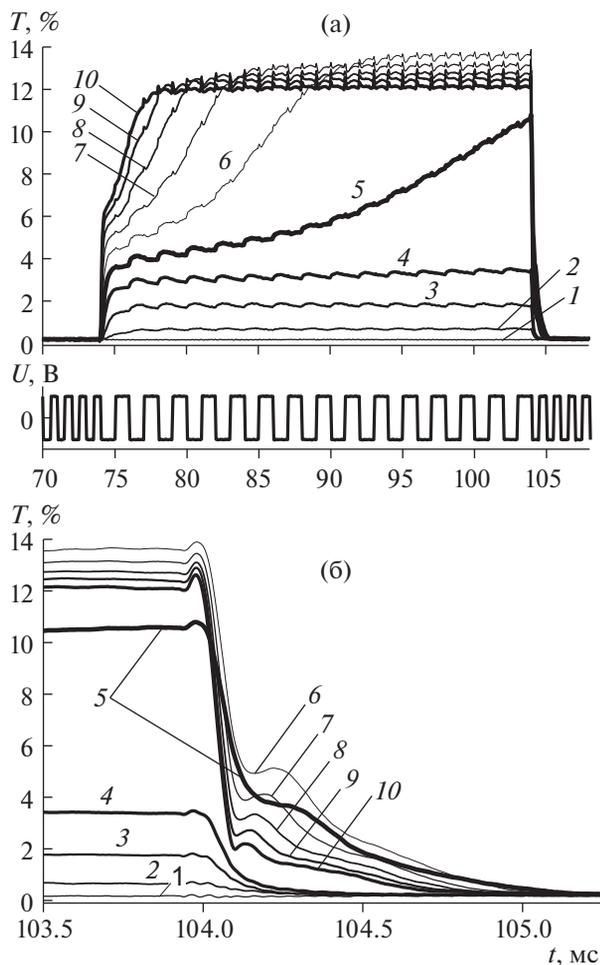


Рис. 2. Осциллограммы электрооптического отклика (коэффициента пропускания) для разных значений амплитуды электрического потенциала $U_0 = |\varphi_{\max}|$: 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, 6–7, 7–8, 8–9, 9–10, 10–11 В. Внизу на (а) показана форма управляющего импульса длительностью 30 мс для включения твист-планарного ($f = 500$ Гц) и нормального ($f = 1000$ Гц) полей. Детально показан электрооптический отклик после переключения твист-планарного поля на нормальное (б). Период электродных решеток $p = 1.76$ мкм ($w = l = 0.88$ мкм).

ронных значений скорость включения уменьшается до 50 мкс. Отметим, что в условиях традиционных режимов управления (например, классический 90° -ный твист) соответствующие времена составляют около 30 мс, т.е. переключение происходит почти в 1000 раз медленнее.

Таким образом, поверхностная мода является чрезвычайно быстрой. Поэтому, несмотря на относительно низкий коэффициент пропускания, она заслуживает особого внимания и дальнейшего исследования.

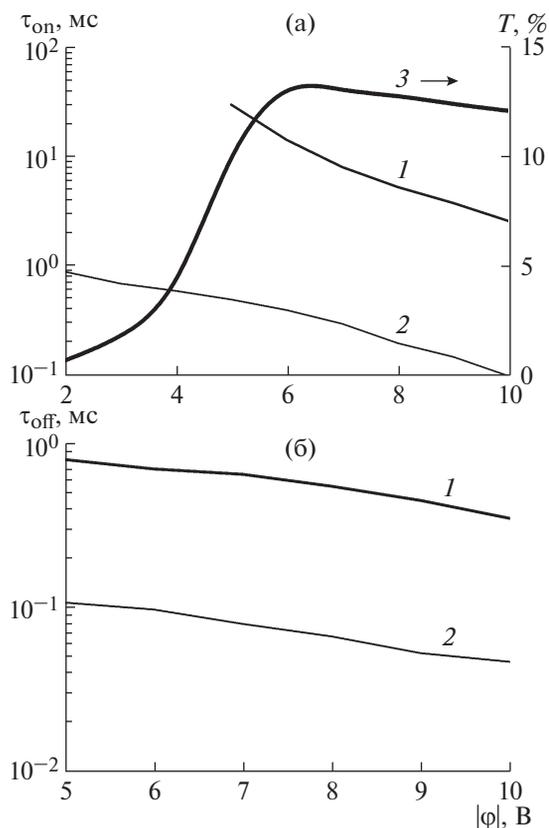


Рис. 3. Экспериментальные зависимости времен переключения в твист-планарное (а) и нормальное (б) состояния для медленной объемной (кривая 1) и быстрой поверхностной (кривая 2) мод в зависимости от амплитуды электрического потенциала $|\varphi|$. Кривая 3 отображает достигнутый максимум пропускания в твист-планарном состоянии (а).

ВЫВОДЫ

В режиме двунаправленного переключения поля в ячейке с нематическим ЖК экспериментально обнаружены две моды электрооптического переключения: поверхностная и объемная. Поверхностная мода становится заметной в электрооптическом отклике при значениях периода электродов менее 3 мкм.

Даже при исключении свободной релаксации благодаря переключению направления электрического поля скорость электрооптического переключения для поверхностной моды на порядок выше, чем для объемной. Таким образом, достигнуты рекордные для нематических ЖК времена электрооптического переключения (50–100 мкс).

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klasen-Memmer M., Hirschmann H.* // Handbook of Visual Display Technology / Eds. Chen J. et al. Berlin: Springer-Verlag, 2012. P. 1315.
2. *Schadt M., Helfrich W.* // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 18. P. 127.
3. *Kim K.-H., Song J.-K.* // NPG Asia Mater. 2009. V. 1. P. 29.
4. *Yoshida H., Nakanishi Y., Sasabayashi T. et al.* // SID Int. Symp. Digest Tech. Pap. 2000. V. 31. P. 334.
5. *Палто С.П., Барник М.И., Палто В.С. и др.* Патент RU2582208. Приоритет 15.01.2014.
6. *Ogawa F., Tani C., Saito F.* // Electron. Lett. 1976. V. 12. P. 70.
7. *Patel J.S., Cohen G.B.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 3564.
8. *Suh S.W., Shin S.T., Lee S.D.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2819.
9. *Suh S.W., Shin S.T., Lee S.D.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1997. V. 302. P. 163.
10. *Wu S.T., Wu C.S., Lin K.W.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 4795.
11. *Lee J.H., Ge Z., Wu S.T.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 201108.
12. *Palto S.P., Barnik M.I., Geivandov A.R. et al.* // J. Disp. Technol. 2016. V. 12. P. 992.
13. *Geivandov A.R., Barnik M.I., Kasyanova I.V. et al.* // Proc. 22-nd International Display Workshops (IDW'2015), Otsu Prince Hotel, December 9–11, 2015. Otsu, Japan. P. 33.
14. *Palto S.P., Barnik M.I., Geivandov A.R. et al.* // Opt. Lett. 2015. V. 40. P. 1254.
15. *Гейвандов А.Р., Барник М.И., Палто В.С. и др.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 6. С. 928.
16. *Geivandov A.R., Barnik M.I., Kasyanova I.V. et al.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V. 9. P. 11.
17. *Gorkunov M.V., Kasyanova I.V., Artemov V.V. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2017. V. 8. P. 054051.