



страняются по всему ЖК-слою [3]. Возникающие начальные отклонения в планарной ориентации жидкокристаллического слоя схематично представлены на рис. 1. Если толщина слоя жидкого кристалла соизмерима с размерами элементов изображения, то приэлектродные слои подвергаются продольному изгибу, что существенно образом изменяет электрооптические характеристики микрообъемов ЖК-структур по сравнению с обычными сплошными жидкокристаллическими структурами.

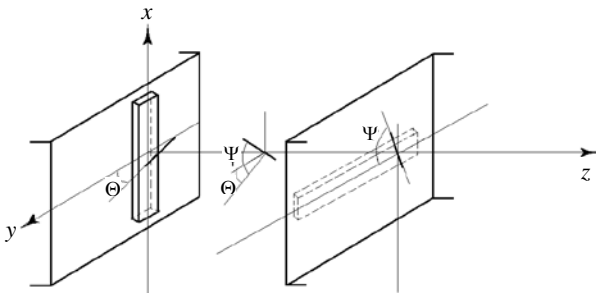


Рис. 1. Начальные отклонения в планарной ориентации  $\Theta$  закрученного жидкокристаллического слоя

В работе рассматривается возникновение неравномерного по толщине слоя кручения молекул жидких кристаллов в импульсном управляющем поле. Показано, что в этом случае происходят сжатие ЖК-спирали к центральной по толщине слоя области пикселя и модуляция проходящего излучения. Данный эффект приводит к значительному уменьшению времени релаксации ЖК-слоя. Так, для толщины ЖК-слоя 10 мкм получено время переключения твистового пикселя  $\sim 0,1$  мс.

**Методика эксперимента.** Исследования проводили на экспериментальных образцах матричных ЖК-дисплеев с различной шириной (20–500 мкм) и толщиной (0,05–0,10 мкм) прозрачных проводящих ( $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ ) электродов. В качестве жидкого кристалла использовали ЖК-смеси на основе толанов с низкочастотной инверсией знака диэлектрической анизотропии (частота инверсии составляла 20 кГц). Диэлектрическая анизотропия (разность статических диэлектрических проницаемостей, измеренных вдоль и поперек направления ориентации молекул жидких кристаллов) изменялась от +1,0 до –1,5, толщина ЖК-слоя  $d$  – от 5,0 до 20,0 мкм, оптическая анизотропия  $\Delta n$  (разность показателей преломления, измеренных вдоль и поперек направления ориентации молекул жидких кристаллов) составляла 0,21. Началь-

ную планарную ориентацию молекул жидких кристаллов задавали пленками поливинилового спирта, нанесенными на стеклянные подложки модуляторов, создавали  $T$ -ориентацию жидких кристаллов. Использовали гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 0,63$  мкм. Модуляцию излучения осуществляли по осциллографической методике.

**Теоретическое описание.** Рассмотрим процесс создания  $T$ -ориентации молекул кристалла при наличии начальных отклонений в ориентации ЖК-слоя. Пусть  $\Theta(y)$  – угол отклонения молекул жидких кристаллов от планарного распределения в азимутальной плоскости. Тогда компоненты директора (направление ориентации) закрученной в плоскости подложки на угол  $\Psi(z)$  структуры можно представить в виде:

$$n_x = \cos \Theta(y) \cos \Psi(z);$$

$$n_y = \cos \Theta(y) \sin \Psi(z); \quad n_z = \sin \Theta(y).$$

Ось  $OZ$  направлена по толщине ЖК-слоя, начальная планарная ориентация молекул жидких кристаллов – вдоль оси  $OY$ , расположенной перпендикулярно направлению электродов модулятора.

Процесс распределения молекул жидкого кристалла в микрообъеме ЖК-слоя будем рассматривать исходя из уравнения Франка для плотности свободной энергии в одноконстантном приближении [4]. Подстановка компонент директора в это уравнение дает выражение при  $\Theta$  и  $\Psi \ll 1$

$$F = \left(\frac{k}{2}\right) \left( \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)^2,$$

где  $k$  – индекс Франка, после минимизации которого имеем

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} = \text{const.} \quad (1)$$

Анализ последнего уравнения показывает, что если  $\Theta = \text{const}$  по всей толщине слоя жидкого кристалла (планарная или наклонная ориентация), либо отношение  $\partial \Theta / \partial y$  незначительно, то оптимальное состояние нематика – это однородное кручение, т. е. в слое жидкого кристалла возникает обычная равномерно закрученная твистовая структура  $\partial \Psi / \partial z = \text{const}$ , при

этом расстояние между закрученными слоями одинаково [4]. Если величина  $\partial\Theta/\partial y$  возрастает, то из условия (1) следует, что  $\partial\Psi/\partial z$  уменьшается, т. е. происходит раскручивание твистовой структуры. Это связано с тем, что невозможно равномерно закрутить ЖК-слои так, чтобы расстояние между ними было неодинаковым. При импульсном управлении ЖК-пикселями  $\partial\Theta/\partial y$  максимально в приэлектродных областях, где локализованы начальные отклонения в ориентации молекул жидкого кристалла, тогда  $\partial\Psi/\partial z$  в этих областях уменьшается. В центральной области величина  $\partial\Theta/\partial y$  незначительна, так как там встречаются два противоположных искажения обеих приэлектродных областей, и отношение  $\partial\Psi/\partial z$  будет максимально. Таким образом, при импульсном управлении ЖК-пикселями наблюдается, в той или иной степени, сжатие ЖК-спирали к центральной по толщине слоя кристалла области. Очевидно, что большое значение  $\partial\Theta/\partial y$  можно создать только при больших амплитудах и малой длительности управляющих импульсов электрического поля, при которых еще не успеет произойти переориентация молекул кристалла, или при небольших размерах ЖК-пикселя.

#### Результаты испытаний и их обсуждение.

Как показали экспериментальные исследования, если амплитуда управляющих импульсов небольшая ( $\sim 30\text{--}60$  В), а длительность более  $\sim 2$  мс, происходит переориентация молекул, небольшой градиент  $\partial\Theta/\partial y$  в распределении угла  $\Theta$  по ширине пикселя приведет к незначительной раскрутке ЖК-спирали в тонких приэлектродных областях. Центральные по толщине слоя, менее связанные с подложками молекулы жидких кристаллов встраиваются во внешнем поле перпендикулярно подложкам, для них кручение молекул кристалла отсутствует. Осциллограммы интенсивности излучения, прошедшего через световой пиксель, иллюстрирующие данный режим управления, представлены на рис. 2а–д. Толщина ЖК-слоя – 10 мкм, ширина электродов – 50 мкм. Развертка рис. 2а–в – 0,5 мс/см; рис. 2а'–в' – 0,05 мс/см; рис. 2г, д – 25 мс/см; рис. 2г' – 1 мс/см. Поляризатор параллелен анализатору и совпадает с направлением ориентации молекул жидкого кристалла на входной подложке. Сравнивая осциллограммы рис. 2б, в, можно установить, что отсечка режима Могена для ЖК-пикселя наступает тогда, когда после переориентации

молекул жидких кристаллов во внешнем поле оптическая анизотропия слоя уменьшится на такую величину, что произойдет три полных осцилляции циркулярно поляризованного света. Так как, согласно [2], число осцилляций определяется как  $\Delta n d/\lambda$ , то в данном случае  $\Delta n$  уменьшится до 0,19. Время релаксации пикселя в исходное состояние составляет в этом случае  $\sim 200$  мс и полностью определяется толщиной и вязкоупругими свойствами жидких кристаллов. Наблюдается обычный режим переключения [2]. При релаксации ЖК-пикселя в исходное состояние на заднем фронте светового отклика наблюдаются колебания интенсивности. Проведенные авторами сравнения и анализ релаксации пикселя для случая, когда плоскость поляризации проходящего излучения параллельна или расположена под углом к направлению ориентации молекул жидких кристаллов на входной поверхности пикселя, показали, что наблюдаемые колебания связаны с фазовой модуляцией света, происходящей на начальной стадии релаксации жидких кристаллов в приэлектродных областях, что хорошо просматривается на осциллограммах рис. 2г, д.

При использовании коротких управляющих импульсов амплитудой более  $\sim 100$  В ситуация меняется: молекулы жидкого кристалла не успевают полностью переориентироваться, только увеличивается угол отклонения молекул жидкого кристалла на краях пикселя. Из-за сильного градиента  $\partial\Theta/\partial y$  в отклонении угла  $\Theta$  происходит раскрутка ЖК-структуры в протяженных приэлектродных областях и сжатие ее в тонком центральном слое. Как видно из осциллограммы на рис. 2в', включение пикселя случается до отсечки режима Могена (происходит только одна осцилляция циркулярно поляризованного света, в этом случае оптическая анизотропия уменьшается лишь на 0,063), что связано с резким уменьшением толщины закрученной твистовой структуры. После выключения поля сжатая ЖК-структура увеличивает свою толщину и задний фронт переключения пикселя полностью совпадает, как видно из рис. 3, с ходом кривой, описывающей зависимость пропускания твистовой структуры от толщины ЖК-слоя. Время полного переключения в этом случае составляет  $\sim 0,1$  мс, т. е. уменьшается по сравнению с обычным случаем почти на три порядка [5].

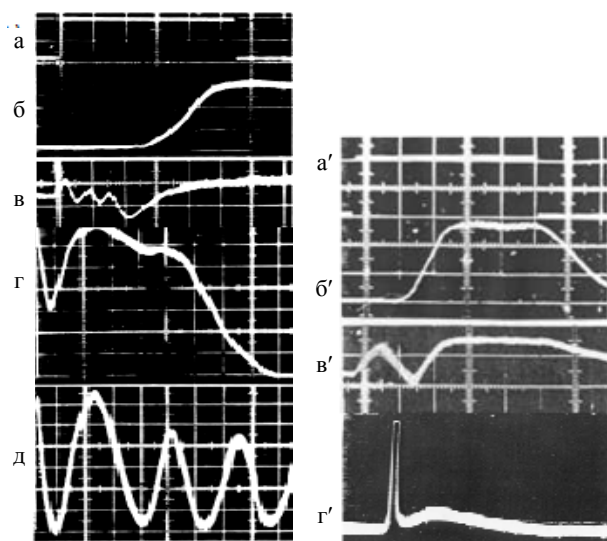


Рис. 2. Осциллограмма переключения световых ЖК-пикселей при различных амплитудах управляющего импульса: а–д – 50 В; а'–г' – 130 В; а, а' – управляющие импульсы; б, б', г, г' – соответственно передний и задний фронты импульса переключения ЖК-пикселя; в, в' – передний фронт; д – задний фронт отклика светового пикселя, повернутого на угол  $45^\circ$  вокруг нормали к вектору поляризации луча

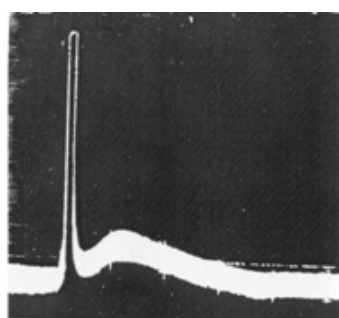
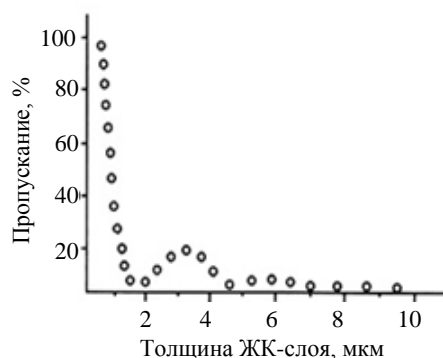


Рис. 3. Зависимость пропускания твистовой структуры от толщины ЖК-слоя и осциллограмма релаксации сжатой ЖК-структуры: развертка – 1 мс/см; толщина ЖК-слоя – 10 мкм; ширина электрода – 50 мкм

## ВЫВОД

Электрооптика твист-эффекта в жидких кристаллах, включающая в себя известные *S*-, *B*- и *T*-деформации, возникающие при переориентации молекул жидких кристаллов, может состоять при большом градиенте в распределении угла  $\Theta$  по ширине ЖК-пикселя практически из чистой *T*-деформации слоя кристалла. При этом для твист-эффекта получено рекордное время переключения пикселя, равное  $\sim 0,1$  мс для толщины ЖК-слоя в 10 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов, В. Н. Оптоэлектронные матричные процессоры / В. Н. Морозов. – М., 1986. – 113 с.
2. Блинов, Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л. М. Блинов. – М.: Наука, 1978. – 384 с.
3. Ковалев, А. А. Структурные искажения в матричных управляемых транспарантах на жидких кристаллах / А. А. Ковалев, Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Известия АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. – 1986. – № 1. – С. 96–98.
4. Де Жен, П. Физика жидких кристаллов / П. де Жен. – М., 1977. – 167 с.
5. Развин, Ю. В. Эффект сжатия твистовой ЖК-структуры в импульсном электрическом поле / Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы докладов 7-й Международ. науч.-техн. конф. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 375.

## REFERENCES

1. Morozov, V. N. (1986) *Opto-Electronic Matrix Processors*. Moscow.
2. Blinov, L. M. (1978) *Electro- and Magneto-Optics of Liquid Crystals*. Moscow: Nauka [Science].
3. Kovalev, A. A., Razvin, Yu. V., & Potachits, V. A. (1986) Structural Distortions in Matrix Spatial Light Liquid Crystal Modulators. *Izvestiya Natsionalnoy Akademii Nauk BSSR, Ser. Fiziko-Matematicheskikh Nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Ser. Physical and Mathematical Sciences]*, 1, 96–98.
4. Gennes, P. (1977) *Physics of Liquid Crystals*. Moscow.
5. Razvin, Yu. V., & Potachits, V. A. (2009) Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference. *Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference*, 2, 375.

Поступила 04.07.2012