

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 532.783: 535

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИДОМЕННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

© 2008 г. А. В. Морозов*, канд. техн. наук; Г. Е. Невская**, доктор техн. наук

* Государственный технический университет, г. Новосибирск

E-mail: kof@ref.nstu.ru

** Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

E-mail: nevskayag@mail.ru

Представлен новый метод формирования мультидоменных жидкокристаллических (ЖК) структур с использованием поверхностно-активных веществ. С помощью этого метода сформированы следующие мультидоменные структуры: “гомеотроп–гибрид”, “гомеотроп–твист”, “гибрид–планар”, “гибрид–гибрид”, “гомеотроп–планар”, “твист–гибрид”, “твист–гомеотроп”. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований электрооптических свойств этих структур. Обсуждены возможные применения мультидоменных ЖК структур в устройствах отображения оптической информации.

Коды OCIS: 160.3710, 230.3720.

Поступила в редакцию 22.05.2007.

Введение

В настоящее время жидкие кристаллы (ЖК) широко используются в различных оптических устройствах (пространственно-временные модуляторы света, устройства формирования изображения, адаптивные дифракционные элементы). В большинстве таких устройств применяются электрооптические эффекты, наблюдающиеся в ЖК-ячейках с однородно ориентированным нематиком. Однако в ряде случаев при использовании таких ячеек выявлен ряд недостатков. Например, основным недостатком ЖК-дисплеев с однородной начальной ориентацией является малый угол обзора и неравномерная диаграмма направленности.

Одним из перспективных направлений развития ЖК-технологий является применение в оптических устройствах мультидоменных (МД) структур. В этом случае ЖК-ячейка содержит несколько областей (доменов) с различной исходной ориентацией молекул. Формирование такой доменной структуры осуществляется в процессе изготовления оптического устройства. Применение МД структур при производстве дисплеев позволило увеличить угол наблюдения и улучшить контрастные характеристики [1].

Метод формирования МД структур

Для формирования МД структур необходимо учитывать механизм взаимодействия молекул ЖК с подложкой. Для большинства случаев ориентация

молекул ЖК на гладких поверхностях определяется силами, которые действуют на поверхности раздела подложка–ЖК. Различие поверхностных натяжений подложки γ_s и ЖК γ_{LC} определяет характер ориентации: при $\gamma_s < \gamma_{LC}$ реализуется гомеотропная ориентация, при $\gamma_s > \gamma_{LC}$ – планарная. Если поверхностные натяжения соизмеримы, то наблюдается наклонная ориентация.

Основным способом формирования МД структур в настоящее время является метод фотоориентации [1]. При использовании этого метода на покрытой фотополимером подложке с помощью поляризованного УФ излучения формируются зоны с заданным направлением легкой ориентации молекул ЖК. Такой подход позволяет получить области с близкими соотношениями поверхностных натяжений подложки γ_s и ЖК γ_{LC} . При этом угол преднаклона молекул ЖК к подложке в каждой формируемой области имеет близкие или равные значения. По этой причине метод фотоориентации пока не позволяет получить на одной подложке домены с планарной и гомеотропной ориентацией.

Одним из альтернативных методов создания мультидоменных ЖК структур является метод, основанный на использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ). В основе этого метода лежат результаты исследований, полученные при разработке контактного метода дефектоскопии поверхности с помощью ЖК [2]. Поскольку дефект поверхности представляет собой локальный скачок энергии связи ЖК с подложкой, то он приводит к

локальной разориентации слоя ЖК. Если на поверхности дефекта энергия связи постоянна и размеры дефекта в несколько раз превышают толщину ЖК-слоя, то может образоваться МД структура. Спонтанные МД структуры можно наблюдать с помощью ЖК в монокристаллах при визуализации микрокристаллических блоков.

Основной проблемой при создании метода формирования МД структур является совмещение технологии получения гомеотропной и планарной ориентации на одной подложке. Это связано с тем, что эти две технологии сильно отличаются друг от друга. Так, например, обязательная операция натирания подложки для получения планарной ориентации может значительно увеличить энергию связи молекул ЖК с поверхностью. Это приводит к тому, что получение областей с гомеотропной ориентацией становится невозможным. Для устранения этого противоречия необходимо использовать смеси ЖК с ПАВ. Благодаря адсорбции ПАВ на подложку можно компенсировать то изменение энергии связи молекул ЖК с поверхностью, которое возникло на этапе натирания.

Другим ограничением, влияющим на метод формирования МД структур, является использование различных материалов подложки для получения гомеотропной и планарной ориентации. Эту проблему можно решить, применяя методы напыления, фотолитографии и травления.

Опытным путем были подобраны ЖК (ЖКМ-1282, ЖКМ-1289, 5ЦБ, Н-8) и ПАВ (лецитин), с помощью которых можно получать на натертой поверхности полиимидной пленки области с планарной ориентацией, а на натертых поверхностях стекла, хрома, оксида индия и ряда фоторезистов – гомеотропную ориентацию. Такой подход позволяет сформировать следующие мультидоменные структуры: “гомеотроп–гибрид”, “планар–гибрид”, “твист–гибрид”, “твист–гомеотроп”, “гибрид–планар”, “гибрид–гибрид”, “планар–гомеотроп”.

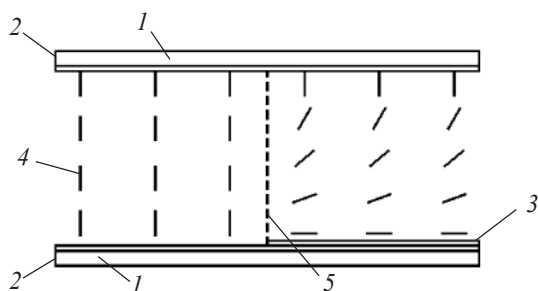


Рис. 1. Конструкция МД ячейки типа “гомеотроп-гибрид”. 1 – стекло, 2 – слой ИТО, 3 – полиимидная пленка, 4 – слой ЖК, 5 – граница между доменами.

На рис. 1 представлена конструкция МД ячейки. Гомеотропная ориентация получена на поверхности стекла или проводящем слое триоксида индия (ИТО). Топологический рисунок областей с планарной ориентацией получается методом фотолитографии с последующим травлением полиимидной пленки и удалением остатков фоторезиста.

Электрооптические свойства мультидоменных ЖК-ячеек

Электрооптические свойства МД структур определяются деформацией директора ЖК в электрическом поле. Для расчета деформации директора было использовано уравнение, полученное в работе [3] при условии равенства констант упругости ЖК (одноконстантное приближение). Расчет проведен для случая, когда МД структура находится в электрическом поле, созданном параллельными электродами. При этом уравнение было преобразовано и имело вид

$$\nabla^2 \theta - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi E(x, y)}{U_0} \right)^2 \sin 2(\theta - \psi) = 0. \quad (1)$$

Здесь θ – угол отклонения директора от оси OY , ψ – угол отклонения вектора напряженности E от оси

OY , $U_0 = \pi \sqrt{\frac{K}{\Delta \epsilon \epsilon_0}}$ – пороговое напряжение, где K –

константа упругости ЖК, $\Delta \epsilon$ – модуль диэлектрической анизотропии.

Расчет электрического поля проводился с учетом изменяющегося в процессе переориентации молекул ЖК тензора диэлектрической анизотропии. В расчете использованы приведенные к толщине H слоя ЖК координаты $x' = x/H$ и приведенные к пороговому напряжению $U' = U/U_0$. Граничные условия для θ выбирались исходя из рассматриваемой МД структуры ($\theta = 0$ для гомеотропной ориентации, $\theta = \pi/2$ для планарной ориентации).

Результаты расчета угла θ были использованы для определения относительной фазовой задержки

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta \Phi_{\max}}(x) = \frac{\langle n \rangle(x) - n_0}{n_e - n_0},$$

где n_o , n_e – показатели преломления ЖК для обыкновенной и необыкновенной волн; $\langle n \rangle(x)$ – усредненное по координате y' значение показателя преломления для необыкновенной волны

$$\langle n \rangle = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} dy.$$

Расчет фазовой задержки проведен для всех ранее перечисленных МД структур. На рис. 2 представ-

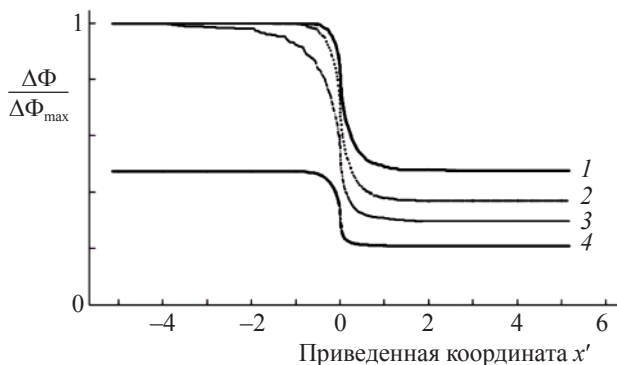


Рис. 2. Зависимости относительной фазовой задержки от приведенной координаты для различных значений U' в структуре “планар-гибрид” ($\Delta\epsilon > 0$, $\Delta\epsilon \rightarrow 0$). 1 – $U' = 0$; 2 – $U' = 0,7$; 3 – $U' = 0,99$; 4 – $U' = 1,5$.

лены результаты расчета для структуры “планар-гибрид” (ЖК с $\Delta\epsilon < 0$, $\Delta\epsilon \rightarrow 0$) при различных значениях управляющего напряжения. В областях с однородной ориентацией фазовая задержка с изменением координаты не изменяется; в окрестности границы доменов наблюдается изменение фазовой задержки. При увеличении управляющего напряжения от 0 до порогового значения ($U' = 1$) в планарном домене ($x' < 0$) наблюдается деформация только вблизи доменной границы. При этом ширина переходной области увеличивается. Максимальное расширение наблюдается при пороговом напряжении (кривые 1–3). При превышении порогового напряжения ($U' > 0$) происходит резкое сужение переходной области (кривая 4) и во всем планарном домене наблюдается переориентация молекул. В гибридном домене с увеличением управляющего напряжения от 0 во всем домене происходит рост фазовой задержки. Процесс переориентации молекул в этом случае является беспороговым. Расширения переходной области со стороны гибрида не наблюдается. Для ЖК с большим значением диэлектрической анизотропии (например, для ЖК-5ЦБ с $\Delta\epsilon = 12,6$) при допороговых напряжениях расширение переходной области меньше, чем в случае малых значений $\Delta\epsilon$.

Анализируя результаты расчета для всех рассматриваемых в работе МД структур, можно сделать вывод, что в диапазоне управляющих напряжений от 0 до порогового значения наблюдается расширение переходной области. Это подтверждают данные табл. 1 и табл. 2 для ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ с $\Delta\epsilon < 0$ соответственно. В этих таблицах показано, в каком домене определенной МД структуры присутствует расширение междоменной границы. Расчет также показал, что при превышении порогового напряжения происходит резкое сужение переходной области.

Проведены экспериментальные исследования электрооптических свойств МД ЖК-ячеек. Для определения фазовой задержки применен метод двулучепреломления [4]. Интенсивность света, прошедшего через слой нематика, помещенного между скрещенными поляроидами, имеет вид

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi_0 \sin^2(\Delta\Phi/2), \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность поляризованного света, падающего на слой ЖК; φ_0 – угол между поляризатором и плоскостью, в которой происходит изменение поля вектора директора \mathbf{n} .

Формула (2) позволяет рассчитать распределение фазовой задержки, если в эксперименте измеряется интенсивность света, прошедшего слой ЖК. Для того чтобы регистрировать пространственное распределение интенсивности, был создан измерительно-вычислительный комплекс. Для примера на рис. 3. представлены интерференционные картины, наблюдаемые в скрещенных поляризаторах в МД структуре типа гомеотроп-гибрид (ЖК Н-8 $\Delta\epsilon = -0,43$). Расширение переходной области происходит только в гомеотропном домене (рис. 3б). Эта область достигает своих максимальных размеров (рис. 3в) при напряжении, равном пороговому напряжению В-эффекта амплитудой 6В. Экспериментальные исследования, проведенные с другими типами МД структур, подтвердили факт расшире-

Таблица 1. Междоменная граница для ЖК с $\Delta\epsilon > 0$

Ориентация в 1-м домене	Варианты ориентации во 2-м домене		
	Планар	Гибрид	Гомеотроп
Планар	Нет	Расширение в области планара	Расширение в области планара
Гибрид	Расширение в области планара	Нет	Нет
Гомеотроп	Расширение в области планара	Нет	Нет

Таблица 2. Междоменная граница для ЖК с $\Delta\epsilon < 0$

Ориентация в 1-м домене	Варианты ориентации во 2-м домене		
	Планар	Гибрид	Гомеотроп
Планар	Нет	Нет	Расширение в области гомеотропа
Гибрид	Нет	Нет	Расширение в области гомеотропа
Гомеотроп	Расширение в области гомеотропа	Расширение в области гомеотропа	Нет

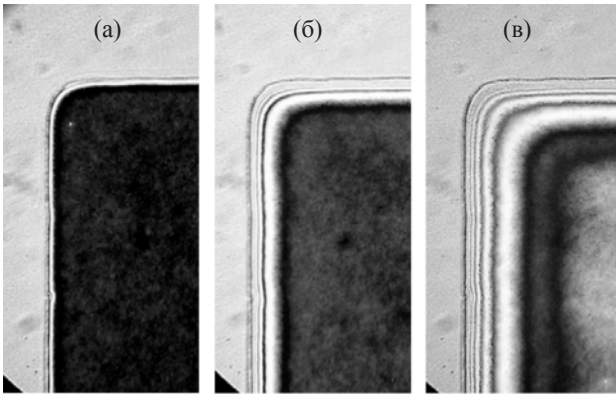


Рис. 3. Наблюдаемая при освещении белым светом в скрещенных поляризаторах граница между гомеотропной и гибридной областями (ЖК Н-8) при $f = 200$ Гц и амплитудах $U = 0$ (а), $U = 5,5$ (б), $U = 6$ В (в).

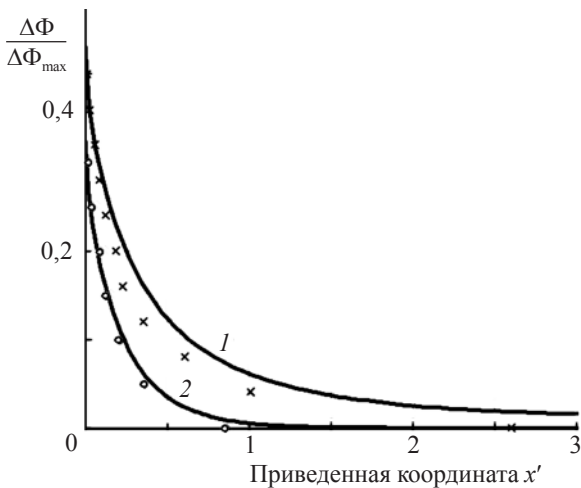


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные зависимости распределения относительной фазовой задержки для структуры “гомеотроп–гибрид” ($\Delta\epsilon < 0$, при $|\Delta\epsilon| \rightarrow 0$). 1 – $U/U_0 = 1$, 2 – $U/U_0 = 0,8$.

ния переходной области в диапазоне напряжений от 0 до порогового значения как для ЖК с $\Delta\epsilon > 0$, так и для ЖК с $\Delta\epsilon < 0$ при $\Delta\epsilon \rightarrow 0$.

На рис. 4 приведены теоретические (сплошные линии) и экспериментальные (точки) зависимости фазовой задержки для структур типа “гибрид–гомеотроп” в переходной области для разных напряжений. Имеет место согласие расчетных и экспериментальных данных.

При исследовании МД ячеек, заполненных ЖК с $\Delta\epsilon \gg 0$ (5ЦБ, ЖК-1282), обнаружено, что при подаче управляющего напряжения для всех возможных комбинаций МД структур наблюдалось только сужение переходной области. Фактически во всем

диапазоне управляющих напряжений МД структура представляет собой две области с различными вольт-фазовыми характеристиками, разделенные малой переходной областью порядка 10 мкм при толщине ЖК-слоя 40–60 мкм. Таким образом, в этом случае экспериментально не обнаружено расширения переходной области и ее ширина меньше расчетной. Возможно, что в переходной области вследствие резкого изменения ориентации молекул имеется неоднородное электрическое поле и его влияние на деформацию директора в расчете не учитывается. В случае ЖК с малым значением диэлектрической анизотропии это поле почти не влияет на электрооптические характеристики МД структуры. Учет влияния этого поля при расчете деформации директора планируется в дальнейшем.

Использование МД структур в оптических устройствах

Полученные результаты позволили создать метод формирования изображения в устройствах отображения оптической информации с использованием МД структур. Суть этого метода заключается в следующем: в области взаимного перекрытия электродов формируется сегмент изображения за счет ориентации молекул, отличающейся от фона. При подаче управляющего напряжения данный сегмент сольется с фоном и тем самым перейдет в выключенное состояние. Для примера на рис. 5 изображена надпись в буквенно-цифровом индикаторе (БЦИ),

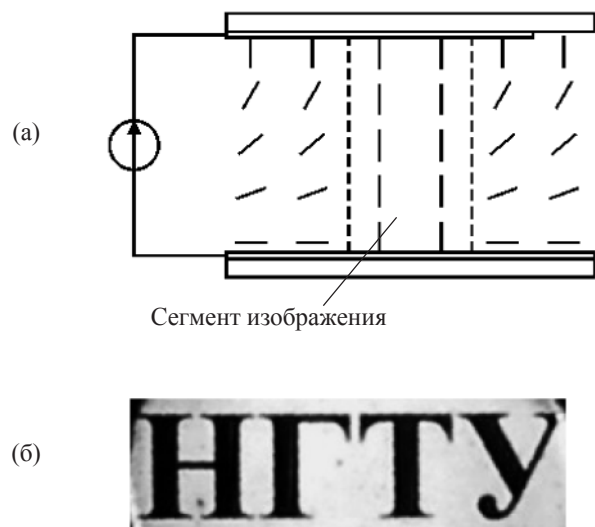


Рис. 5. а – конструкция БЦИ с мультидоменной структурой типа “гибрид–гомеотроп”, б – наблюдаемая надпись в БЦИ при отсутствии управляющего напряжения.

полученная различной ориентацией молекул ЖК и наблюдаемая в скрещенных поляризаторах. Светлая область – гибридная ориентация, темная – гомеотропная ориентация. При подаче управляющего напряжения в областях сегмента и фона будет наблюдаться переориентация молекул нематика и сегмент перейдет в выключенное состояние.

Проведены исследования с целью создания конструкций БЦИ на МД структурах, обладающих более высоким контрастом изображения по сравнению с ЖК-ячейками с однородной ориентацией. Причина, по которой с повышением управляющего напряжения падает контраст в ЖК-ячейках с однородной ориентацией, заключается в следующем. На границе взаимного перекрытия электродов подложки возникает неоднородное электрическое поле, которое приводит к дополнительной переориентации ЖК и образованию переходной области. Размер этой области зависит от толщины слоя ЖК и управляющего напряжения. Для ячеек, толщина которых от 20 до 199 мкм, она может составлять до 0,5 мм. Это существенно ухудшает контраст изображения. Установлено, что предложенные нами конструкции БЦИ с применением МД структур позволили устранить этот недостаток. Если поместить сегмент изображения на достаточном удалении от границы взаимного перекрытия электродов (см. рис. 5а), то междоменная граница окажется в области однородного поля. В случае использования ЖК с большой диэлектрической анизотропией переходная зона в отсутствие управляющего напряжения будет составлять не более 20 мкм при толщине слоя ЖК 50 мкм. При увеличении управляющего напряжения переходная область будет только уменьшаться.

При использовании МД структур в буквенно-цифровых индикаторах можно

- упростить топологию токопроводящих слоев;

- получить изображение, существующее без электрического поля;

- уменьшить переходные области на границах электродов;

- исключить дефекты ориентации (дисклинации), вызванные влиянием неоднородных электрических полей.

Заключение

Разработанный метод изготовления мультидоменных ЖК-ячеек с использованием ПАВ позволяет получать разнообразные МД структуры, в том числе области с планарной и гомеотропной ориентациями на одной подложке. Разработан метод расчета деформаций директора нематика в электрическом поле для ЖК-ячеек с МД структурами, и проведены экспериментальные исследования их электрооптических свойств. Показана возможность применения МД структур в приборах отображения оптической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoffmann E., Klausmann H., Ginter E., Knoll P.M., Seiberle H., Schadt M. Development of a dualdomain TFT-LCD by optical properties // SID Digest. 1998. P. 734.
2. Аэро Э.Л., Бахшиев Н.Г., Томилин М.Г. Визуализация поверхностных дефектов различной природы с помощью НЖК // Тр. ГОИ. 1986. Т. 59. В. 193. Оптика жидких кристаллов. С. 91–121.
3. Аэро Э.Л. Электро- и магнитооптические эффекты в криволинейных областях, заполненных нематическими жидкими кристаллами // Опт. и спектр. 1995. Т. 79. В. 2. С. 320–328.
4. Стойбер Р., Морзе С. Определение кристаллов под микроскопом. М.: Мир, 1974. 282 с.