

Д. т. н., В. М. СОРОКИН, к. ф.-м. н. Р. Я. ЗЕЛИНСКИЙ,
А. В. РЫБАЛОЧКА

Украина, г. Киев, Ин-т физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: zelinski@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
29.10.2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ С ПАМЯТЬЮ

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и исследованием нового класса отражательных дисплеев, работающих на электрооптических эффектах бистабильности в холестерических жидких кристаллах.

Отражающие дисплеи находят все большее применение в технике отображения информации. Особое значение такие дисплеи приобретают при наличии эффекта собственной памяти, когда энергия потребляется только на запись информации, а для ее поддержания не используется.

Хорошо известные отражающие дисплеи на «твист»-эффекте в нематических жидких кристаллах, не обладающие эффектом памяти, имеют ряд недостатков, которые сильно затрудняют их использование в качестве альтернативы бумажным носителям информации. Одним из них является использование в твист-индикаторах двух пленочных поляризаторов, один из которых выполняется отражающим. Это приводит к большой потере света (более 65%) для отражающих твист-индикаторов. Кроме того, такие дисплеи требуют постоянной подачи управляющих сигналов для поддержания изображения, поскольку не обладают эффектом бистабильности.

Еще одним недостатком указанных дисплеев является отсутствие возможности получения качественного цветного изображения. Этот недостаток связан с необходимостью использования цветных мозаичных фильтров в твист-дисплеях, что еще больше понижает отражающую способность дисплея и резко ухудшает качество цветного изображения.

Однако и бумажные носители информации имеют ряд недостатков из-за невозможности быстрой смены информации на одном и том же носителе. Поэтому холестерические дисплеи, работающие на электрооптических эффектах бистабильности, позволяющие длительно хранить записанную информацию без потребления энергии и сравнительно быстро менять эту информацию под действием управляющих электрических сигналов, могут составить серьезную конкуренцию бумажным носителям информации. Более того, отсутствие поляроидных пленок и высокая отражающая способность планарно-ориентированной структуры, рекордно широкие

углы обзора выгодно отличают их от других электронных и неэлектронных средств отображения информации. Отражательные дисплеи на холестерических жидких кристаллах смогут найти широкое применение в безбумажных технологиях «ноут-буков», телефонных справочников, электронных газет и книг, записных книжек, телефонных и кассовых аппаратов и многих других безбумажных приложений современной электронной техники.

Технология создания таких дисплеев мало отличается от технологии твист-индикаторов, в то время как методы электронного управления высокоинформативными холестерическими дисплеями отличаются коренным образом и основаны на использовании гистерезисных свойств жидкокристаллического материала.

Динамический гистерезис — основная характеристика бистабильных высокоинформативных холестерических дисплеев

Особенности электрооптической гистерезисной характеристики холестерической жидкокристаллической структуры могут быть эффективно использованы для создания принципиально новых методов управления высокоинформативными матричными дисплеями на холестерических жидких кристаллах (ЖК). Типичная гистерезисная характеристика холестерической структуры представлена на **рис. 1**.

Многостадийный процесс измерения характеристики так называемого «динамического гистерезиса» состоит из следующих процедур:

1. К измеряемому элементу отображения подается напряжение, которое переводит структуру холестерического ЖК в гомеотропное состояние, после чего выключается напряжение. Структура переходит в планарное, селективно рассеивающее свет, состояние.

2. После установления планарного состояния на элемент отображения подается первое значение управляющего напряжения в течение заданного времени. Затем это напряжение выключается. Измеряется величина отраженного светового потока.

3. Повторяется п. 1.

4. Повторяется п. 2. При этом на элемент отображения подается второе значение управляющего напряжения (шаг изменения напряжения задается оператором). Измеряется величина отраженного светового потока.

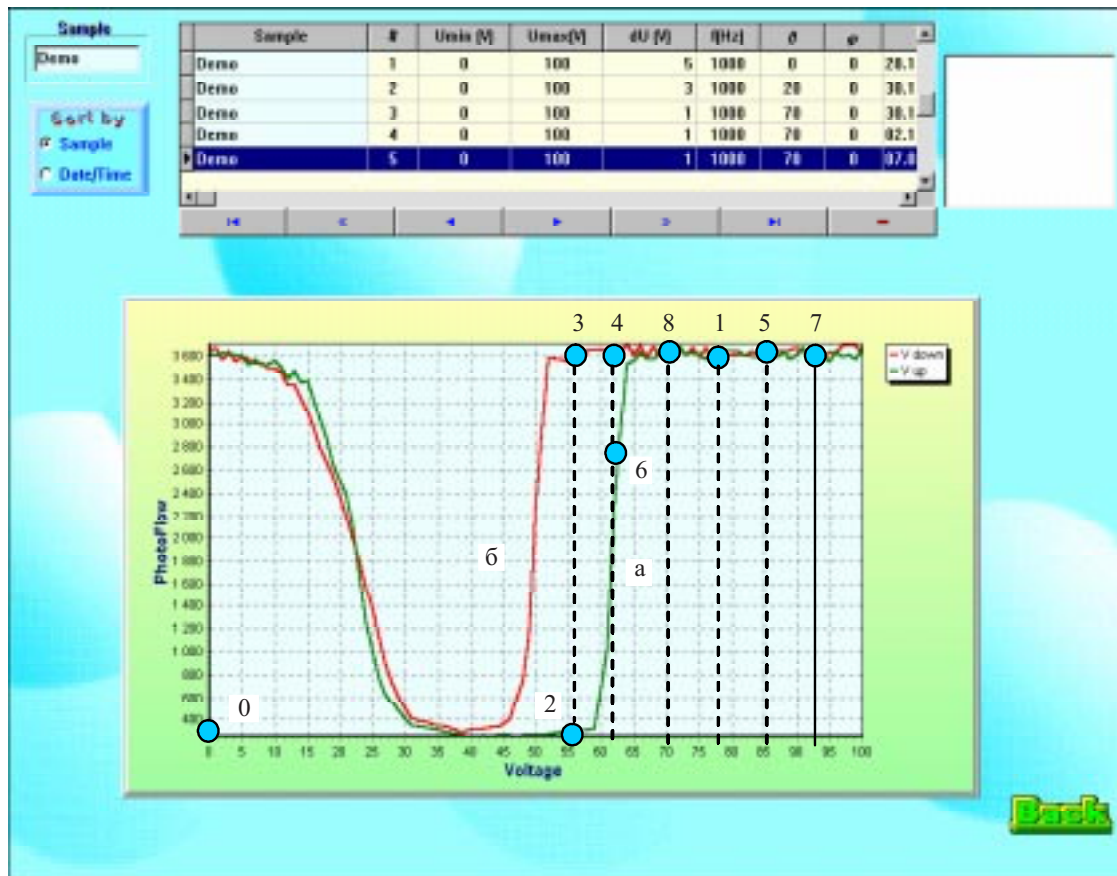


Рис. 1. Гистерезисная характеристика холестерической структуры

5. Повторяются операции по пп. 1—4 до достижения значения напряжения, предельного для заданного диапазона. (Процесс измерения можно полностью автоматизировать, используя, например, специально разработанный в Институте физики полупроводников НАН Украины измерительно-вычислительный комплекс СМ-100 [1].) Результирующая характеристика прямой ветви «динамического гистерезиса» показана на рис. 1, кривая *a*.

6. К измеряемому элементу отображения подается напряжение, которое переводит структуру холестерического ЖК в гомеотропное состояние. Это напряжение удерживается заданное время, после чего на элемент отображения подается первое значение управляющего напряжения в течение заданного времени, затем оно выключается. Измеряется величина отраженного светового потока.

7. К измеряемому элементу отображения подается напряжение, которое переводит структуру холестерического ЖК в гомеотропное состояние. Это напряжение удерживается заданное время, после чего на элемент отображения подается второе значение управляющего напряжения в течение заданного времени, которое затем выключается. Измеряется величина отраженного светового потока.

8. Повторяются операции по пп. 6, 7 до достижения значения напряжения, предельного для заданного диапазона.

Результирующая характеристика обратной ветви «динамического гистерезиса» показана на рис. 1, кривая *б*.

Таким образом, при подаче одного и того же удерживающего напряжения (рис. 1, точки 2 и 3) и выключении этого напряжения возможна реализация двух устойчивых состояний жидкого кристалла — планарного, селективно отражающего свет состояния (точка 3), или конфокального состояния, сильно рассеивающего падающий свет (точка 2). Время действия этого удерживающего напряжения определяет количество адресуемых строк дисплея. Чем больше число строк матричного дисплея, тем больше время удержания, и, как следствие, тем меньше ширина динамической гистерезисной характеристики. На рис. 2 показана зависимость величины ширины гистерезисной характеристики от времени удержания.

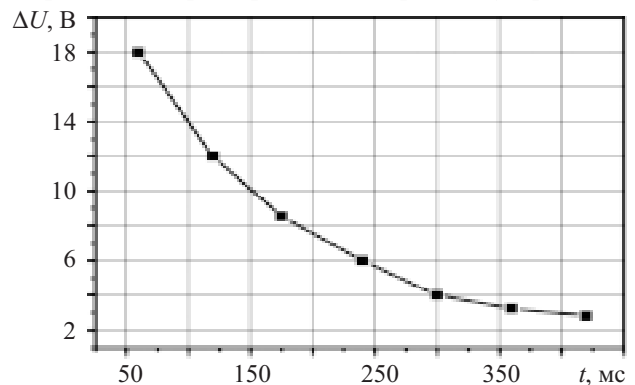


Рис. 2. Зависимость ширины петли динамической гистерезисной характеристики от времени действия удерживающего напряжения

Для реализации электронной схемы управления матричным дисплеем значения $\Delta U=1,5 \dots 2$ В вполне достаточно для эффективного управления строками дисплея. При этом предельное число мультиплексируемых строк может составлять 1000 и более, что обеспечивает возможность управления высокоинформативными экранами типа VGA (640×480 элементов).

Разработанные нами электронные схемы динамической адресации холестерических дисплеев, основанные на использовании особенностей динамической гистерезисной характеристики, отличаются простотой и надежностью, в то время как ряд известных идеологий управления основаны на других принципах, приводящих к усложнению электронных схем управления.

Двухуровневые методы электронного управления матричными дисплеями

Обычно для управления жидкокристаллическими дисплеями используются драйверы, которые способны коммутировать от 4 до 6 уровней напряжений. Такие драйверы сложны и дорогостоящи, особенно при коммутации достаточно высоких уровней напряжений (до 50—70 В). Драйверы, которые в состоянии коммутировать лишь два уровня напряжений, гораздо проще и, как следствие, намного дешевле.

Нами разработаны и реализованы в конкретных устройствах несколько методов управления холестерическими жидкокристаллическими дисплеями, основанных на двухуровневом принципе управления [2—6]. Идея методов основана на использовании особенностей динамической гистерезисной характеристики, приведенной на рис. 1, при подаче на строки и столбцы матричного дисплея при динамической адресации таких последовательностей однополярных импульсов с различной скважностью, чтобы результирующее эффективное напряжение на выбранных и невыбранных элементах изображения строго соответствовало заранее заданной величине.

При амплитуде управляющих импульсов, подаваемых на строки и столбцы дисплея, равной U , для различных разработанных схем управления такие детерминированные значения эффективного напряжения должны составлять, например, $U_{эф} = U/\sqrt{2}$, $U_{эф} = U/\sqrt{3}$ или $U_{эф} = U/\sqrt{2/3}$. Такие эффективные значения напряжений можно реализовать при форме управляющих импульсов, приведенных в табл. 1. В центре таблицы приведены известные аналитические выражения для определения эффективного значения напряжения сложной формы, а справа показаны последовательности однополярных импульсов,

Таблица 1

Формы электрических сигналов управления элементами отображения

Форма управляющего напряжения на элементе отображения	Эффективное значение напряжения	Форма строчных и столбцовых сигналов
	$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = U$	<p>Строка </p> <p>Столбец </p>
	$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \frac{U}{\sqrt{2}}$	<p>Строка </p> <p>Столбец </p>
	$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \frac{U}{\sqrt{3}}$	<p>Строка </p> <p>Столбец </p>
	$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	<p>Строка </p> <p>Столбец </p>

Трансформация структур для различных типов схем управления

Тип схемы управления	Трансформация структур для выбранного элемента отображения	Трансформация структур для невыбранного элемента отображения
$U/\sqrt{2}$	1—3—1—3—0 Г—Г—Г—Г—П	1—3—0—2—0 Г—Г—П*—ФК—ФК
$U/\sqrt{3}$	2—5—3—0 ФК—Г—Г—П	2—2—2—0 ФК—ФК—ФК—ФК
$(U\sqrt{3})^*$	6—7—4—3—0 ФК*—Г—Г—Г—П	6—6—6—2—0 ФК*—ФК*—ФК*—ФК—ФК
$U/\sqrt{2/3}$	8—3—8—3—0 Г—Г—Г—Г—П	8—3—0—2—0 Г—Г—П*—ФК—ФК

Примечание: Г — гомеотропная структура; П — планарная структура; ФК — фокально-коническая структура; П* — переходная планарная структура; ФК* — промежуточная фокально-коническая структура.

подаваемых на строки и столбцы дисплея, обеспечивающие заданную форму результирующего сигнала.

Задача синтеза управляющих однополярных импульсов, подаваемых на строки и столбцы дисплея, заключается в нахождении таких последовательностей импульсов, которые обеспечивают результирующие формы сигналов на элементах отображения, показанные в табл. 1. При разработке простых двухуровневых схем управления матричными дисплеями мы остановились на трех типах последовательностей импульсов, обеспечивающих эффективные значения напряжения на элементах индикации, $U/\sqrt{2}$, $U/\sqrt{3}$ и $U/\sqrt{2/3}$. По этой причине разработанные схемы матричной адресации названы соответственно схема $U/\sqrt{2}$, схема $U/\sqrt{3}$ и схема $U/\sqrt{2/3}$.

Для наглядного представления особенностей каждой схемы управления рассмотрим гистерезисную характеристику холестерического дисплея, показанную на рис. 1. Отмеченные на этой характеристике точки 0—8 соответствуют некоторым эффективным значениям напряжений, которые последовательно подаются на элемент отображения, причем для каждой схемы управления эти последовательности приведены в табл. 2. В таблице наглядно показана трансформация структур холестерического жидкого кристалла (ХЖК) в зависимости от положения точек на гистерезисной характеристике рис. 1.

При реализации этой идеологии управления для адресации холестерического дисплея наряду с гистерезисными свойствами ХЖК используются особенности этих материалов, связанные с процессом релаксации из гомеотропного в планарное состояние (Г—П-переход). ХЖК при Г—П-переходе образует промежуточную нестабильную спиральную текстуру П*, аналогичную стабильному планарному состоянию, но с шагом спирали приблизительно в два раза большим [7]. Время образования этой текстуры (Г—П*-переход) для различных ХЖК составляет величину от единиц до десятых долей миллисекунд.

Поскольку переходная планарная структура неустойчива, под действием поля она может перейти или в гомеотропную структуру (когда напряжение превышает напряжение полной раскрутки спирали или равно ему, точка 8 рис. 1), или в конфокальное

состояние (когда воздействующее напряжение лежит в диапазоне от 0 до напряжения начала раскрутки спирали, точка 2 рис. 1). Благодаря малому времени Г—П*-перехода и гистерезисным свойствам ХЖК возможно создание простой идеологии управления холестерическими дисплеями со временем адресации одной строки порядка нескольких миллисекунд [2, 5].

На рис. 3 показаны реальные управляющие последовательности электрических импульсов, подаваемых на строки и столбцы дисплея, состоящего, для примера, из трех строк и двух столбцов. Как видно из этого рисунка, только двух уровней напряжения (U и 0) достаточно для реализации эффективного управления матричным дисплеем.

Схематическое представление последовательности эффективных напряжений на пикселях n -й строки ХЖК-дисплея с общим количеством строк N при адресации по идеологии управления $U/\sqrt{2}$ приве-

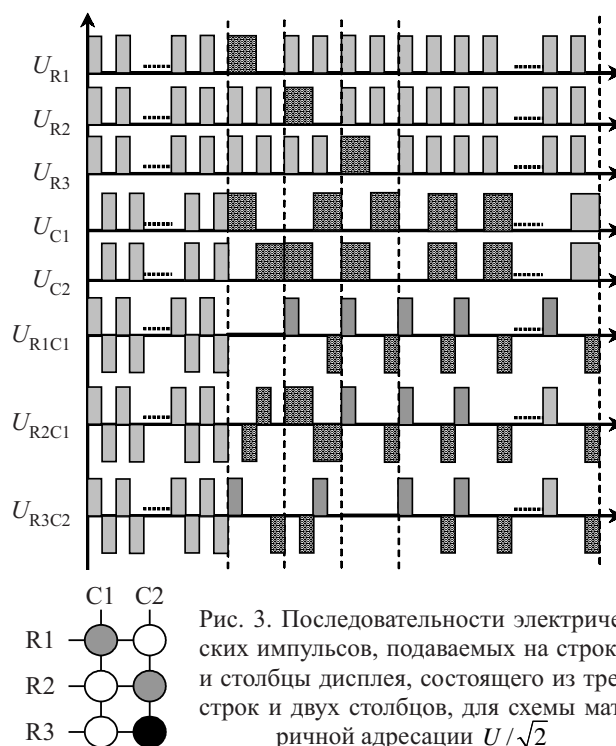


Рис. 3. Последовательности электрических импульсов, подаваемых на строки и столбцы дисплея, состоящего из трех строк и двух столбцов, для схемы матричной адресации $U/\sqrt{2}$

дено на **рис. 4**. Из рисунка видно, что управляющая последовательность может быть разбита на следующие четыре стадии: подготовительную, стадию выборки, удерживающую и эволюционную.

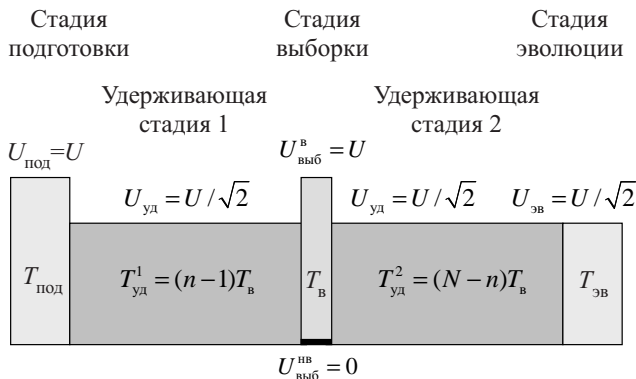


Рис. 4. Схематическое представление последовательности эффективных напряжений на пикселах n -й строки дисплея с общим количеством строк N при адресации по идеологии управления $U/\sqrt{2}$

Подготовительная стадия предназначена для перевода всех пикселей дисплея в гомеотропное состояние. Для этого в течение времени $T_{\text{под}}$ на все пиксели дисплея подается напряжение $U_{\text{под}}=U$, которое должно быть больше критического напряжения холестерико-нематического перехода.

Стадия выборки является определяющей для конечного состояния ХЖК в пикселах дисплея. В течение стадии выборки ($T_{\text{выб}}$) на выбранные пиксели подается напряжение $U_{\text{выб}}^{\text{в}}=U$, а на невыбранные — $U_{\text{выб}}^{\text{вб}}=0$. Напряжение $U_{\text{выб}}^{\text{в}}=U$ удерживает гомеотропное состояние ХЖК в выбранных пикселах. Напряжение $U_{\text{выб}}^{\text{вб}}=0$ позволяет ХЖК совершить переход Γ - П^* в невыбранных пикселах за время $T_{\text{в}}$.

Удерживающая стадия разбивается на две части (первая часть — после окончания подготовительной стадии до начала стадии выборки, вторая часть — после окончания стадии выборки до начала эволюционной стадии). Во время удерживающей стадии ($T_{\text{уд}}$) на все пиксели дисплея подается напряжение с эффективным значением $U_{\text{уд}}=U/\sqrt{2}$. Первая часть удерживающей стадии предназначена для поддержания гомеотропного состояния ХЖК во всех пикселах дисплея в течение времени $T_{\text{уд}}^1=(n-1)T_{\text{в}}$. Вторая часть удерживающей стадии удерживает в выбранных пикселах гомеотропное состояние, а в невыбранных инициирует переход ХЖК из переходного планарного состояния в фокально-коническое (конфокальное) состояние. Продолжительность второй части поддерживающей фазы $T_{\text{уд}}^2=(N-n)T_{\text{в}}$.

Для всех пикселей дисплея суммарная продолжительность поддерживающей фазы одинакова и определяется выражением

$$T_{\text{уд}} = T_{\text{уд}}^1 + T_{\text{уд}}^2 = (n-1)T_{\text{в}} + (N-n)T_{\text{в}} = (N-1)T_{\text{в}}. \quad (2)$$

В течение эволюционной стадии на все пиксели дисплея подается напряжение $U_{\text{эв}}=U_{\text{уд}}=U/\sqrt{2}$, которое удерживает в выбранных пикселах гомеотропное состояние и способствует ЖК-материалу в невыбранных пикселах перейти в конфокальное состояние.

Таким образом, по окончании управляющей последовательности (при полном отключении напряжения на строках и столбцах) в выбранных пикселах происходит переход жидкого кристалла из индуцированного гомеотропного состояния в стабильное планарное состояние, а в невыбранных пикселах образуется стабильная конфокальная структура. Отметим, что результирующее состояние ХЖК во всех элементах изображения дисплея определяется в течение стадии выборки. При этом полное время записи дисплея для рассматриваемой схемы управления составляет

$$T_{\text{кадра}} = (T_{\text{под}} + NT_{\text{в}} + T_{\text{эв}}). \quad (3)$$

Принципы работы других вариантов схем управления ($U/\sqrt{3}$, $U/\sqrt{2/3}$, $U/\sqrt{3}^*$) подробно описаны в [2, 4, 8]. Сравнение характеристик перечисленных схем управления холестерическим дисплеем показывает, что важным преимуществом схемы $U/\sqrt{2/3}$ является уменьшение амплитуды управляющего напряжения на 13% по сравнению со схемой $U/\sqrt{2}$, на 29% по сравнению со схемой $U/\sqrt{3}$ и на 33% по сравнению со схемой $(U/\sqrt{3})^*$.

Индикатрисы контраста высокоинформативных холестерических дисплеев

Угловые характеристики распределения контраста холестерических дисплеев в сильной степени зависят от ориентационных граничных условий для поверхностно-стабилизированных планарных структур. Возможные варианты ориентированных планарных структур показаны на **рис. 5**. Поскольку так называемая «фен»-структура планарно-ориентированного холестерического жидкого кристалла позволяет получить наиболее широкие углы обзора, при создании высокоинформативных матричных холестерических дисплеев мы использовали технологические методы создания именно фен-структуры.

На **рис. 6** приведены экспериментально снятые на измерительно-вычислительном комплексе СМ-100 угловые характеристики распределения контраста, приведенные в полярной системе координат (рис. 6, *а*), а также представленные как эквиконтрастные характеристики (рис. 6, *б*). Нетрудно заметить явные преимущества индикатрис контраста холестерических дисплеев. Помимо большого угла обзора (практически до 75°), они отличаются высокой равномерностью распределения контраста в диапазоне азимутальных углов от 0 до 360° , что приближает характеристики холестерических дисплеев к характеристикам бумажных носителей информации.

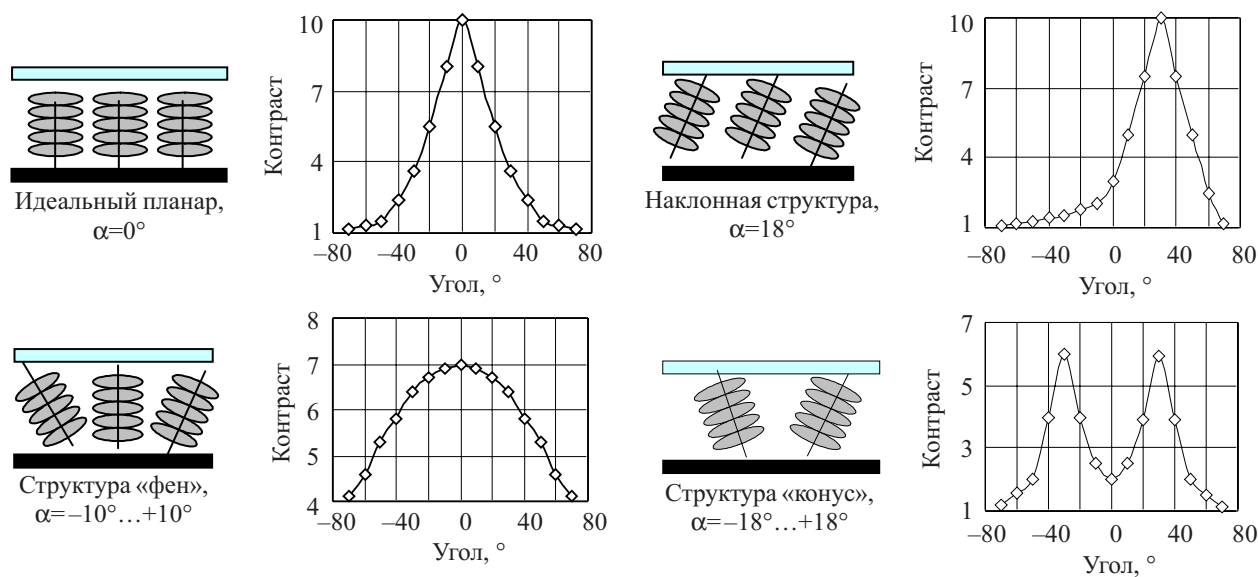


Рис. 5. Варианты ориентированных структур холестерического жидкого кристалла

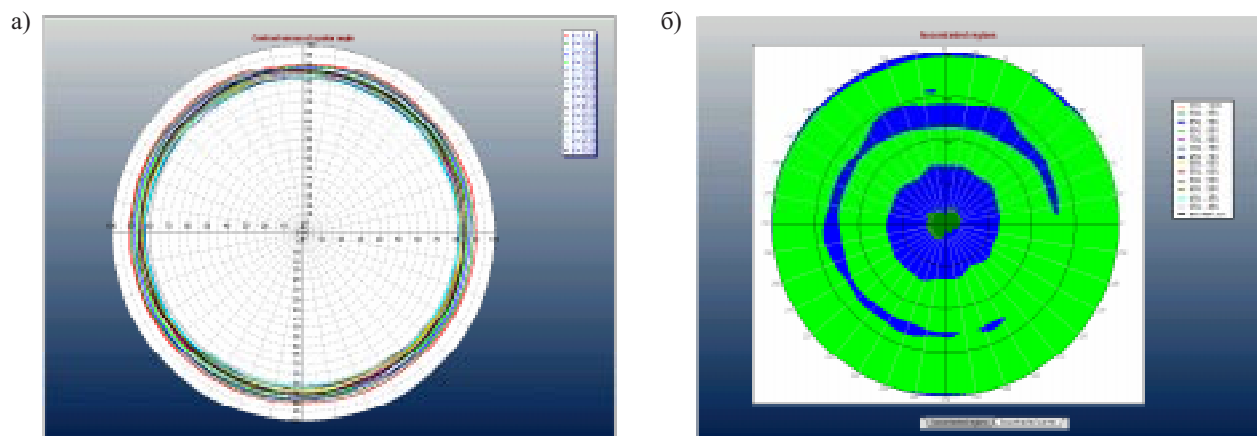


Рис. 6. Индикатрисы контраста разработанного холестерического дисплея, представленные в полярной системе координат (а) и как эквиконтрастные характеристики (б)

Пути совершенствования бистабильных холестерических дисплеев

Несмотря на ряд принципиальных преимуществ отражательных холестерических дисплеев (сравнительная простота технологии создания, широкие углы обзора, эффект «памяти» и др.), создание более совершенных дисплеев указанного типа остается серьезной задачей. Современный уровень науки и технологии не может обеспечить создания электронных дисплеев с параметрами и характеристиками, аналогичными бумажным носителям информации (коэффициент отражения, контраст, углы обзора, цветовая гамма, отсутствие мерцающего изображения, гибкость бумажного носителя и др.). Поэтому приходится ограничиться лишь дополнительными требованиями к холестерическим дисплеям, реализация которых приблизит электронное средство отображения информации по ряду эргономических параметров к бумажным носителям информации:

1. Обеспечение возможности создания тонких и гибких конструкций высокоинформативных холестерических ЖК-дисплеев.

2. Обеспечение возможности создания полноцветных плоских холестерических ЖК-дисплеев.

3. Обеспечение возможности реализации черно-белого изображения на дисплее с максимальной отражающей способностью белого фона и максимальным светопоглощением черного фона.

Первое требование может быть реализовано за счет использования в производстве дисплеев тонких и прочных пластиковых подложек. Сегодня это направление интенсивно развивается при создании дисплеев на нематических жидких кристаллах. Целесообразность развития этого направления диктуется необходимостью создания большого количества малогабаритных гибких пластиковых карт с большим объемом информации, которая должна оперативно меняться (так называемые смарт-карты). На мировом рынке уже появились такие карты на нематических жидких кристаллах с гибкими подложками.

Задача создания таких карт на холестерических жидких кристаллах с памятью несколько усложняется по следующим причинам. Если в нематических ЖК-дисплеях на гибких подложках изображение

постоянно поддерживается управляющим напряжением (что приводит к сохранению информации при деформациях пластиковых карт), то для холестерических дисплеев с памятью механическая деформация слоя жидкого кристалла может привести к нарушению конфокальной структуры (обычно при деформации конфокальная структура трансформируется в планарную) и, как следствие, к искажению записанного изображения.

Для исключения ориентационных конформаций в холестерическом жидком кристалле под действием механических деформаций необходимо создавать специальные ячеистые гибкие пластиковые подложки, каждая ячейка которых полностью изолирована от соседних, при этом размер ячейки должен быть адекватен размеру элемента отображения. Это довольно сложная самостоятельная задача, требующая проведения серьезных исследований.

Второе требование сравнительно просто реализуется за счет использования трехслойных конструкций ЖК-дисплея [9], у которых каждый слой представляет собой самостоятельный отражающий дисплей, заполненный ЖК-материалом с максимумом полосы селективного отражения в заданной области спектра (например, в красной, синей и зеленой областях). Цветное изображение реализуется за счет прохождения светового потока от внешнего источника подсветки и отражения его от каждого жидкокристаллического слоя, находящегося в планарном или конфокальном состоянии, или в одном из промежуточных между планарным и конфокальным состояний (так называемая «шкала серого»). При этом для получения большого количества цветовых оттенков необходимо более 16 градаций шкалы серого, что для рассматриваемого класса холестерических жидкокристаллических смесей реализовать трудно.

Третье требование может быть обеспечено за счет использования жидкокристаллических материалов с высокими значениями оптической анизотропии — порядка 0,6. В настоящее время в литературе появилась информация о синтезе таких материалов [10],

однако промышленный выпуск их ожидается лишь в ближайшие годы.

Таким образом, рассмотренный класс жидкокристаллических дисплеев имеет самостоятельные области применения, для которых требуются достаточно долгое (сотни часов) хранение статической информации без потребления энергии, широкие углы обзора и работа на отражение с минимальными оптическими потерями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сорокин В. М., Зелинский Р. Я., Рыбалочка А. В., Олейник А. С. Измерительно-вычислительный комплекс СМ-100 для характеристики жидкокристаллических дисплеев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2008.— № 1.— С. 48—53.
2. Sorokin V., Sorokin A., Rybalochka A., Valyukh S. Electronic addressing reflective cholesteric LCD // Proc. SPIE.— 2001.— Vol. 4511.— P. 169—173.
3. Rybalochka A., Sorokin V., Valyukh S., Sorokin A. Dynamic drive scheme for fast addressing of cholesteric displays // SID Digest.— 2000.— Vol. XXXI.— P. 818—821.
4. Rybalochka A., Sorokin V., Valyukh S., Sorokin A. Simple drive scheme for bistable cholesteric LCDs // Ibid.— 2001.— Vol. XXXII.— P. 882—885.
5. Sorokin V. Simple driving methods for cholesteric reflective LCDs // Asia Display'98.— Seoul.— 1998.— P. 749—752.
6. Rybalochka A., Sorokin V., Valyukh S., Sorokin A. Analysis of drive schemes for bistable cholesteric LCDs // Proc. of the 10th Symposium "Advance Display Technologies".— Minsk.— 2001.— P. 67—71.
7. Yang D.-K., Lu Z.-J. Switching mechanism of bistable cholesteric reflective displays // SID Digest.— 1995.— Vol. XXVI.— P. 351—355.
8. Rybalochka A., Sorokin V., Valyukh S. Bistable cholesteric reflective displays: two-level dynamic drive schemes // Journal of the SID.— 2004.— N 12/2.— P. 165—171.
9. Devis D., Kahn K., Huang X.-Y., Doane J. W. Eight-color high-resolution reflective cholesteric LCD // SID Digest.— 1998.— Vol. XXIX.— P. 901—904.
10. Wu S.-T., Hou J. A., Wu B. J. High brightness and low voltage cholesteric liquid crystal displays // Proc. of the 6th Asia Symposium on Information Display.— China.— 2000.— P. 154—158.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Вигдорович Е. Н. Малоразмерные образования в технологии приборостроения.— М.: МГУПИ, 2008.

В книге представлены результаты работ по развитию технологий малоразмерных образований для создания нового поколения устройств и приборов. Учебное пособие содержит изложение основ физики и химии малоразмерных образований, в том числе наноструктур, — одной из наиболее актуальных и быстроразвивающихся областей физики и технологии веществ. Представлены данные по изменению основных свойств веществ в зависимости от размера образований и возникновения новых фундаментальных и квантоворазмерных эффектов. Рассмотрены различные методы формирования микро- и нанообразований: вакуумные методы получения тонких покрытий, молекулярно-лучевая эпитаксия, методы поверхностного и объемного наноструктурирования, ионная литография и др. Приведены результаты применения технологий малоразмерных образований в различных областях науки и техники. Книга предназначена для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей высших учебных заведений, а также может представлять интерес для специалистов в области приборостроения, физики и химии твердого тела, микро-, нанoeлектроники, оптики, фотоники и др.

