

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ. ТЕХНОЛОГИИ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

ЧАСТЬ 2. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖК-ДИСПЛЕЕВ

В.Беляев vic_belyaev@mail.ru

На протяжении уже двух десятков лет плоскочелюстные дисплеи (ППД) применяются практически во всех сферах жизни и деятельности. Каждый человек в течение дня пользуется несколькими десятками ППД, чаще всего жидкокристаллическими (ЖК) панелями разных размеров, цветопередачи, пространственного разрешения. Приближается полувек юбилей изобретения и патентования первых ЖК-индикаторов. Хороший повод проанализировать, что представляют собой современные ЖК-дисплеи (ЖКД), каковы перспективы их развития, какие компоненты ЖК-устройств оказывают влияние на их эксплуатационные и визуальные характеристики, как оценивается рынок этих устройств. Особый интерес вызывают новые технологии и применения, которые описываются в этой части статьи, являющейся продолжением обзора, опубликованного ранее*.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЖК-ДИСПЛЕЕВ

Производители и пользователи дисплеев постоянно сравнивают две технологии – дисплеи на жидких кристаллах и на основе органических светодиодов – с точки зрения их конкурентоспособности. Рассмотрим некоторые критерии сравнения применительно к ЖКД и основные направления развития технологий.

Толщина дисплея. Одна из важных характеристик ЖКД, определяющих его конкурентоспособность, – геометрический размер, в частности, толщина дисплея. Толщина обычного ЖКД (около 10 мм) определяется размерами элементов модуля подсветки (светодиодов, световодной пластины и оптических пленок).

Типовая толщина панели OLED-телевизоров составляет около 5 мм. Поэтому производители ЖК-телевизоров преследуют цель разработать ЖК-панели толщиной не более 4,9 мм за счет уменьшения толщины оптических элементов и лучшего использования внутреннего пространства телевизора. В частности, компания Sony

официально запустила в производство две ЖК-модели с таким параметром – Bravia X900C и X910C.

Однако уменьшение толщины вследствие применения новых технологий приводит к увеличению стоимости – ультратонкий ЖК-модуль в 1,7 раза дороже стандартного ЖК-телевизора (толщиной 10 мм) с диагональю 55 дюймов (56 см) и разрешением 4К, а аналогичный OLED-телевизор дороже втрое.

Ориентация ЖК. Одним из направлений дальнейшего совершенствования технологии ЖК-дисплеев является создание новых типов покрытий, ориентирующих ЖК. Обычно для получения *планарной* ориентации ЖК идут по пути использования полимеров – полиимидных производных. Пленку, нанесенную на подложку, натирают, чтобы создать направление преимущественной ориентации.

Вертикальная (гомеотропная) ориентация обеспечивается при косом напылении кристаллических пленок или использовании поверхностно-активных веществ, например кремнийорганических соединений.

Новые возможности открывает метод *фотоориентации* с использованием азокрасителей [34]. Молекулы таких веществ, помещенные в ориентирующий слой, изменяют

* См.: Беляев В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2015. № 8. С. 36–47.

свою ориентацию под действием поляризованного света и передают эту ориентацию в ЖК-слой. Данный метод позволяет исключить операцию натирания и создавать так называемую картинную (patterned) ориентацию с двумерным распределением направлений преимущественной ориентации на подложке дисплея.

Угловой диапазон ЖКД. Основной способ расширения углового диапазона ЖКД – использование различных *оптически анизотропных пленок*.

Поскольку на выходе ЖК-ячейки свет, в общем случае эллиптически поляризованный, анализатор всегда пропускает часть светового пучка, уменьшая контраст изображения из-за недостаточно низкого уровня темного состояния. Поэтому основная задача состоит в подборе оптической разности хода двулучепреломляющей пленки, чтобы эллиптически поляризованный пучок был скомпенсирован до линейно поляризованного, а направление поляризации пучка было бы ортогонально направлению главной оси анализатора. Это довольно сложная

задача, так как необходимо, во-первых, учитывать спектральную зависимость показателей преломления и, во-вторых, выполнить условие строгой компенсации поляризации только для конкретной геометрии. В современном ЖКД с углом обзора до 180° (по горизонтали и вертикали) используется несколько оптически анизотропных пленок и элементов. Структура одного из видов оптического компенсатора с сочетанием слоев, имеющих как положительную, так и отрицательную оптическую анизотропию, показана на рис.12.

Оптические пленки в подсветке ЖК-устройств.

В ЖК-дисплеях для выравнивания поля интенсивности света от источника подсветки применяется ряд элементов. В результате с учетом поглощения света в матрице цветных фильтров, поляризаторах, ТПТ, системе электродов и потерь света в оптических элементах степень пропускания типичной активной ЖК-матрицы составляет всего около 3–4%. В этом ЖК-дисплеи проигрывают дисплеям на основе излучения света – плазменным и на органических светодиодах. Поэтому задача повышения эффективности использования света очень важна. Разработан ряд технических решений, позволяющих конвертировать поляризованный свет, то есть преобразовать его так, чтобы интенсивность не снижалась или снижалась незначительно при многочисленных изменениях направления распространения света и сочетаниях различных оптических элементов.

Самые известные решения – технологии BEF и DBEF (Brightness Enhancement Film и Dual Brightness Enhancement Film, или пленочный усилитель яркости и двукратный пленочный усилитель яркости) [35, 36]. Элементы имеют призматический профиль, что способствует сохранению света внутри них и повторному его использованию (recycling) (рис.13, 14). В элементе DBEF (см. рис.14) происходит также преобразование направления поляризации после отражения от дополнительной поляризационной пленки, а при повторном прохождении первичного светового пучка его яркость увеличивается на 60% при прямой подсветке и на 97% – при торцевой (рис.15).

Технологии квантовых точек. Уже прототипированы образцы дисплеев, у которых в пленочный усилитель яркости встроены *квантовые точки* (КТ). Благодаря этому энергопотребление дисплея вдвое ниже по сравнению с обычным устройством и меньше стоимость изготовления панели. Технологии подсветки с использованием КТ могут значительно улучшить такие характеристики ЖКД, как цветовая гамма, точность передачи цвета, и снизить энергопотребление панели.

Многие компании вводят в производство технологии квантовых точек без кадмия (в связи с законодательством, ограничивающим использование материалов на основе тяжелых металлов из-за экологических

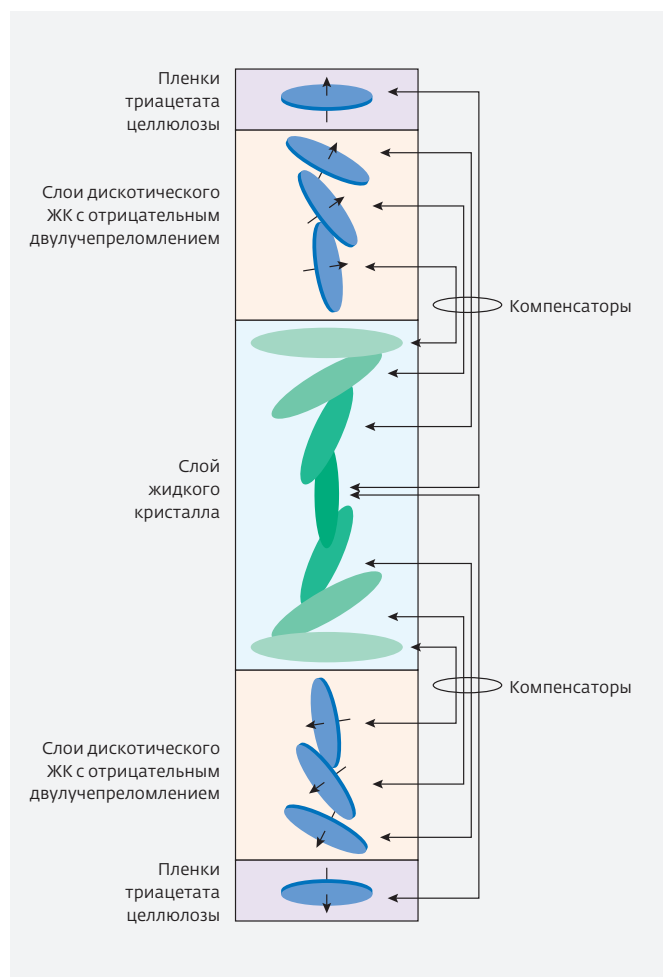


Рис.12. Структура оптического компенсатора со слоями, имеющими положительную и отрицательную оптическую анизотропию

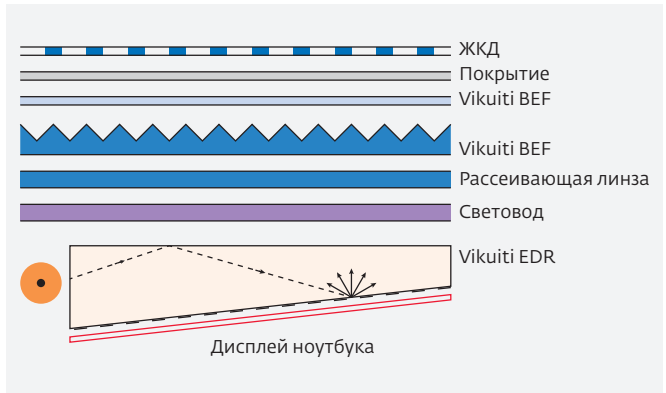
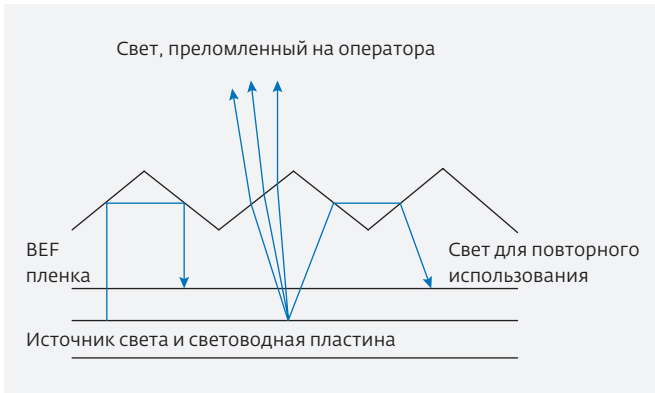


Рис.13. Принцип работы пленки BEF (пленочный усилитель яркости)

Рис.15. Технические решения для повышения эффективности использования света

и токсических проблем, связанных с этими элементами). Ряд фирм (QD Vision, Sony, Nanosys, 3M, Amazon, ASUS) выпускают дисплеи с квантовыми точками с 2013 года. Samsung и LG Electronics начали производство больших ЖК-панелей с квантовыми точками в модуле подсветки в 2015 году.

представила квантовый пленочный аккумулятор света (Quantum Light Accumulation Sheet; QLAS), а американские компании – 3M, владеющая технологиями пленочных усилителей яркости BEF и DBEF, и Nanosys – разработали пленку с квантовыми точками (3M Quantum Dot Enhancement Film; 3M QDEF) [37]. В пленке яркий белый цвет формируется "зелеными" и "красными" КТ, диспергированными в слое полимера, который находится между двумя барьерными слоями (рис.16).

В отчете компании Touch Display Research "Quantum Dot Display Component Market will Reach \$10.6 Billion by 2025" сообщается, что объем производства дисплеев и осветительных приборов с квантовыми точками должен увеличиться с 0,7 млрд. долл. в 2015 году до 10,6 млрд. долл. в 2025 году.

Квантовые точки также используют в качестве добавок к жидким кристаллам для управления физическими свойствами ЖК-материала и, соответственно, электрооптическими характеристиками дисплея [38].

Использование КТ-подсветок позволит продлить период доминирования ЖКД на рынке плоскочелюстных дисплеев. Для расширения цветовой гаммы и повышения световой эффективности подсветки (а, значит, и всего дисплея) ряд фирм разработали новые конструкции модулей с КТ. Например, корейская компания LMS

Жидкие кристаллы и другие оптически анизотропные материалы, например полимерные ЖК, могут быть компонентами оптических компенсирующих пленок. Известны работы по моделированию гибридных ЖК-ячеек с неоднородной структурой ориентации

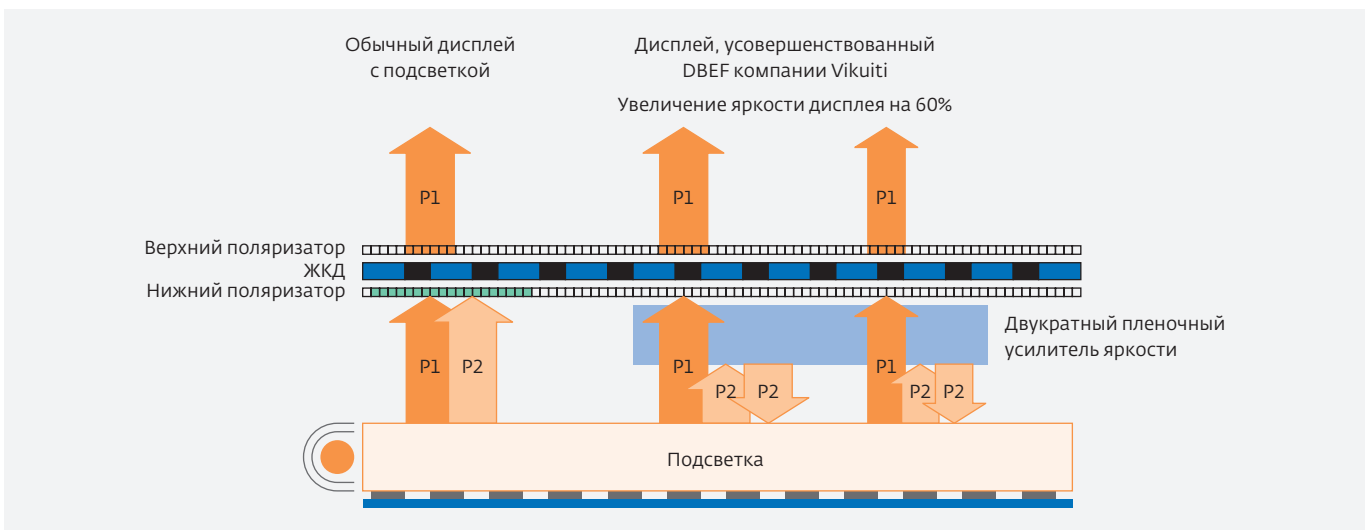


Рис.14. Принцип работы пленки DBEF (двукратный пленочный усилитель яркости)

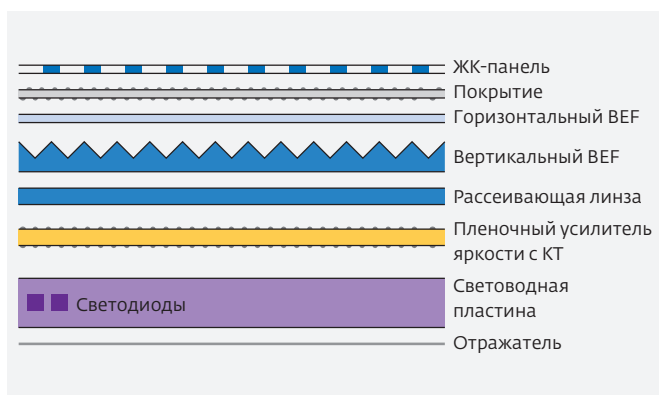


Рис.16. ЖК-панель с подсветкой, в которой используется пленка с квантовыми точками (QDEF)

жидких кристаллов, которые выравнивают угловую зависимость пропускания ЖКД [39, 40].

Наряду с оптическими пленками для повышения контраста рассматриваемого изображения можно использовать и интерференционные антибликовые покрытия, которые подавляют отражение от передней поверхности панели и ухудшают изображение при его малой яркости.

Источники света для подсветки ЖК-панелей.

Для подсветки (backlight) ЖК-панелей применяются два вида источников света: люминесцентные лампы с холодным катодом (Cold Cathode Fluorescent Lamps, CCFL) и светодиоды (LED) (рис.17). При использовании светодиодов они могут располагаться как за панелью, освещая пиксели непосредственно, так и по торцам световодной пластины (Light Guide Plate), по которой свет распределяется на всей площади дисплея. В первом случае подсветка называется прямой (Direct), во втором – торцевой, или краевой (Edge) (рис.18).

Благодаря светодиодной подсветке ЖК-дисплеи получили новые качества и возможности. Если панель обеспечивает контраст изображения до 1000:1 (10 бит), то, изменяя ток, протекающий через светодиоды, можно изменять их яркость тоже не менее, чем в 1000 раз. Уже

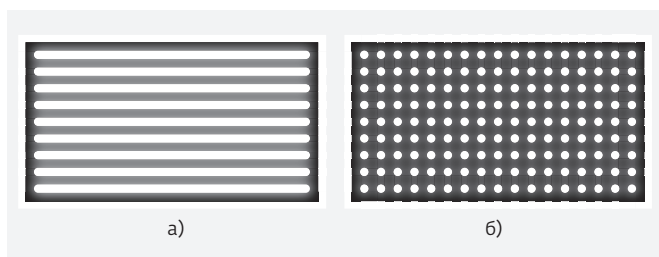


Рис.17. Два вида подсветки ЖК-панелей: а – на основе люминесцентных ламп с холодным катодом (CCFL); б – на основе светодиодов (LED)

есть образцы ЖК-устройств с динамическим диапазоном изменения интенсивности (High Dynamic Range) проходящего света не менее, чем в 1 000 000 раз (20 бит по каждому цвету). Кроме того, появилась возможность изменять яркость светодиодной подсветки не по всей панели, а в отдельных ее блоках. Это позволяет лучше отображать темные участки изображения (функция усиления локального контраста или Local Dimming). Таким образом, техническое решение обеспечивает оптимальное согласование возможностей дисплея по передаче любого уровня яркости со зрительным восприятием изображения [41].

Многие компании в разрабатываемых модулях подсветки используют лазерные светодиоды (красный или циан, один из пурпурных цветов) в качестве одного из источников света. Это делает живым изображение, воспроизводимое ЖК-телевизором. На основе лазерных диодов в корпорации Mitsubishi был создан тонкий (27 см) проектор, размер изображения – до 65 дюймов (165 см), а цветовая гамма вдвое превосходит цветовую диаграмму обычного ЖК-телевизора.

С технологией жидких кристаллов конкурирует технология органических светодиодов (ОСД, хотя теперь чаще употребляют название OLED), которые априори имеют лучшую световую эффективность из-за отсутствия поляризаторов и оптических пленок. Кроме построения изображения с использованием ОСД, органические пленки применяют также в качестве источника подсветки ЖКД.

Высокая эффективность свечения и переключаемый насыщенный цвет коллоидных квантовых точек позволили коммерциализировать энергосберегающее освещение дисплеев с высоким качеством цвета. В тонкопленочных светодиодах с квантовыми точками, возбуждаемыми электрическим полем (QLED), квантовая эффективность излучения превышает 18%, яркость составляет 50 000 кд·м⁻² при управляющем напряжении в несколько вольт [42].

Созданы также гибридные образцы дисплеев, называемые трансфлективными [43, 44]. В зависимости от внешних условий освещения они работают как отражательные

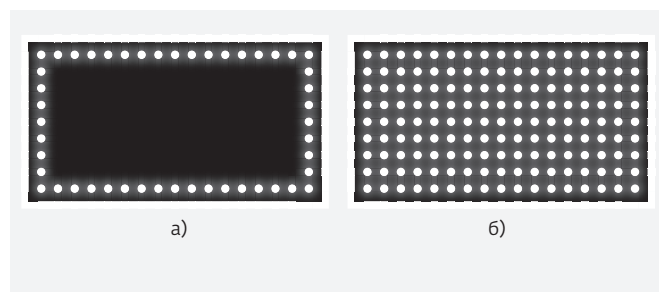


Рис.18. Расположение светодиодов в светодиодной подсветке: торцевое или краевое (а) и прямое (б)

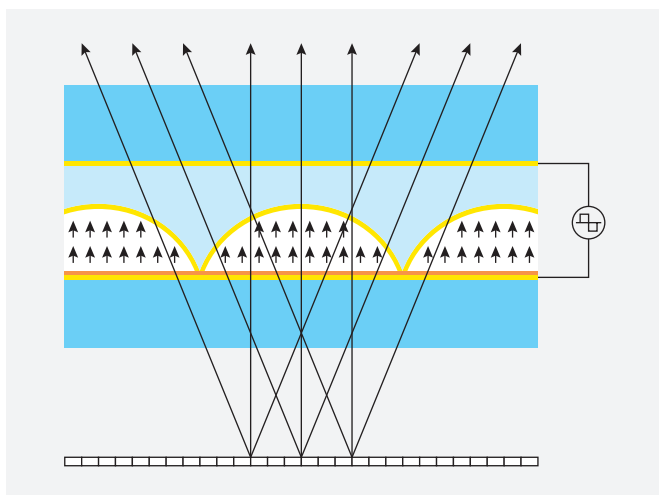


Рис.19. Схема принципа работы переключаемого микролинзового раstra

ЖКД (днем) или как излучательные ОСД-панели (вечером и ночью).

НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖК-ДИСПЛЕЕВ

В мире ведутся работы как по совершенствованию и удешевлению известных типов ЖКД, так и по созданию новых устройств и материалов с дополнительными функциональными возможностями и более широкой областью применения.

Дисплеи сверхвысокого разрешения. Уже сообщалось о дисплеях сверхвысокого разрешения (QUHD, 8K×4K или четырехкратная сверхвысокая четкость), изогнутых панелях и т.п., с помощью которых создается эффект погруженности (immersion) [45].

Сегодня мониторы сверхвысокого разрешения с четырьмя тысячами столбцов (UHD 4K; 3840×2160 пикселей) – не только выставочные образцы. Из 133 млн. ЖК-мониторов, произведенных в мире в 2014 году, 2 млн. – это UHD 4K мониторы. К 2017 году их доля на рынке составит 8%. При этом ожидается снижение средней цены устройств с 1347 долл. в 2014 году до 927 долл. в 2017-м. Области применения таких устройств – компьютерная графика, обработка фотоизображений, автоматическое проектирование, одновременное выполнение множества действий. Основные производители UHD 4K мониторов: Sharp, Innolux, LGD, AUO и Samsung.

Еще более высокая динамика прогнозируется в отношении ЖК-телевизоров UHD 8K (7680×4320 пикселей), производство которых возрастет с 2700 шт. в 2015 до 911 тыс. шт. в 2019-м. Почти половина этих устройств будет поставлена в Китай.

В конце 2014 года средняя цена ЖК-монитора составляла 171 долл. Доля больших мониторов с диагональю от 20 дюймов (51 см) увеличилась до 64%, а доля

мониторов с высоким разрешением (1920×1080 пикселей и более) составила 55%. При этом доля мониторов с широким углом обзора на основе эффекта планарного переключения (IPS/FFS) и вертикальной ориентации приближалась к 19%.

Создание эффекта погруженности связано с формой окружающего пространства. Широкое поле зрения должны обеспечить *изогнутые, искривленные (curved) панели*, которые разрабатываются корейскими компаниями Samsung и LG как для ЖК-телевизоров, так и для телеприемников на органических светодиодах.

Для автомобилей изготавливаются не только вогнутые, но и выпуклые дисплеи для приборной доски и различных видов "зеркал".

Использование жидких кристаллов для формирования *объемного изображения* – еще одно очень перспективное направление.

Наиболее известным ЖК-устройством, применяемым для получения "глубокого" изображения, являются стереочки с управляемым пропусканием света. К электрооптическим затворам для таких очков предъявляются следующие требования: высокое пропускание (35–40% и больше), высокое отношение пропускания в открытом и закрытом состояниях (около 1000 и больше), малое время переключения (фронт электрооптического отклика не более 1/10 кадрового полупериода). Такие параметры позволяют избежать наблюдения перекрестных изображений (3D crosstalk), когда при рассматривании правого изображения видны следы левой картинки и наоборот. В настоящее время ведутся разработки с использованием ЖК в следующих направлениях.

Сегнетоэлектрические ЖК (СЖК). В ячейках, разработанных и изготавливаемых в Физическом институте РАН им. П.Н.Лебедева, получено время оптического отклика до 24 мкс, частота модуляции света в солитонной моде увеличена до 7 кГц при управляющем напряжении 1,5 В [46]. По мере их использования решается проблема повышения кадровой частоты до 100–240 Гц при переходе дисплеев со стандартными кадровыми частотами 60–120 Гц и формированием цветного изображения с помощью триады цветных фильтров к воспроизведению 3D-изображения. Для устройств отображения на основе метода последовательной во времени смены цветов, который позволяет втрое уменьшить количество дисплейных элементов и получить более цельное и яркое изображение (в результате отказа от триады цветных фильтров), в режиме 3D-отображения можно повысить частоту смены кадров до 540–600 Гц.

Затворы ПДЖК (ЖК, диспергированные в полимерной пленке). Это очень интересное решение [47]. В этом случае затворы работают не по принципу "светло-темно", а по принципу "прозрачно-мутно". Световой поток, попадающий на глаза наблюдателя, практически не меняется.

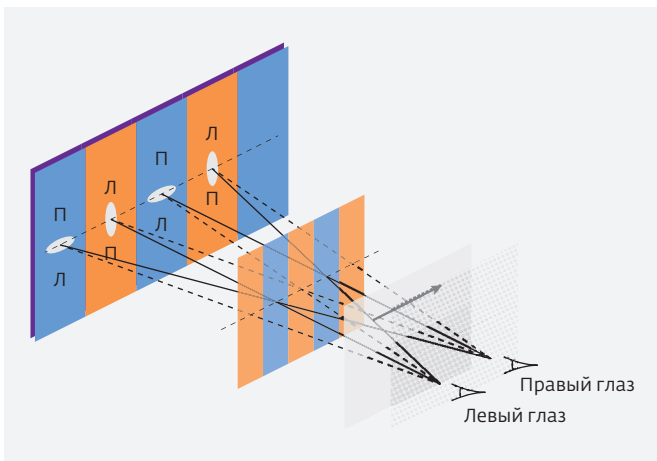


Рис.20. Технология 3D-изображения с использованием двух растров поляризационных элементов

Следовательно, глаза не испытывают больших нагрузок для изменения диаметра зрачка при резкой вариации интенсивности света, как в том случае, когда используются традиционные электрооптические затворы.

Автостереоскопическое изображение. Это решение часто применяется в современных ЖК-телевизорах. Суть его в том, что правое и левое изображения формируются с помощью микролинзового раstra, направляющего их (изображения) в правый и левый глаз соответственно (явление диспаратности).

Такой линзовый растр с использованием электрооптического переключения ЖК реализован в телевизорах нидерландской компании Philips, произведенных по технологии WOWvx [48]. Телевизор позволяет рассматривать обычную двумерную картинку (режим 2D) и при включении раstra в соответствующий режим – трехмерное изображение (3D).

Принцип работы такого раstra представлен на рис.19. Используется управление показателем преломления ЖК при переключении электрического напряжения. Внутри каждой линзы раstra жидкий кристалл имеет планарную ориентацию, то есть вдоль ЖК-директора показатель преломления ЖК равен показателю преломления ЖК для необыкновенного луча n_e . Поверх раstra находится полимерная профилированная подложка с показателем преломления, соответствующим показателю преломления ЖК для обыкновенного луча n_o . Поэтому в выключенном состоянии растр перенаправляет лучи так, чтобы формировались два разных изображения для каждого глаза. В результате наблюдается стереоскопическое изображение. При включении напряжения жидкий кристалл в линзе переориентируется почти вертикально. Его показатель преломления равен n_o , и ЖК-растр вместе с полимерной подложкой становится изотропным. Лучи, идущие от ЖК-панели, проходят без изменения

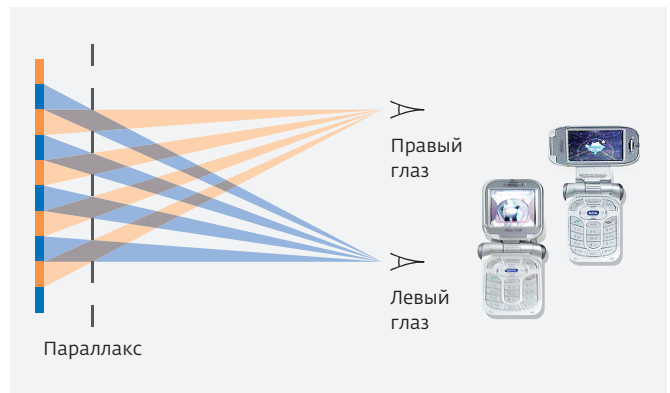


Рис.21. Пример дисплея Swing

направления, и наблюдается обычное двумерное изображение. Для улучшения эффекта автостереоскопический растр повернут на небольшой угол по отношению к направлению столбцов ЖК-матрицы.

В конструкции ЖК-панели, разрабатываемой в Институте общей физики РАН им. А.М.Прохорова, предлагается формировать объемное изображение и наблюдать его с помощью двух растров поляризационных элементов (рис.20) [49]. Они представляют собой жидкокристаллические фазовые полуволновые пластинки. Растры для правого и левого изображений различаются направлениями оптических осей таких пластинок.

Элемент раstra, находящегося ближе к наблюдателю, оставляет неизменной поляризацию пучка света для "своего" глаза и поворачивает ее для "другого" глаза. После прохождения через анализатор на сетчатке каждого глаза формируется "своя" картинка, и изображение воспринимается объемным вследствие стереоскопического эффекта.

Дисплей типа Swing. Стереоизображение в нем формируется за счет колебаний (swing) электрооптического раstra, расположенного перед ЖК-матрицей (рис.21). В одном и том же устройстве дисплей может быть повернут в "книжном" или "альбомном" форматах.

ЖК-затворы, размещенные в пространстве. С помощью набора ЖК-затворов можно формировать реальное трехмерное изображение, то есть изображение поверхности реального объекта будет наблюдаться в пространстве, а не на плоскости. Схема устройства, реализующего такой принцип, показана на рис.22 [50, 51]. По координате Z расположено до 100 ячеек с сегнетоэлектрическим ЖК. Под действием электрического импульса они последовательно изменяют свою прозрачность. При этом на каждую включаемую ячейку проецируется двумерный срез изображения объемного объекта. Срезы формируются так, чтобы за один цикл на всех ячейках получалось реалистичное объемное изображение поверхности этого объекта. Время отклика менее $(1/30 \text{ с}) / N$ слоев.

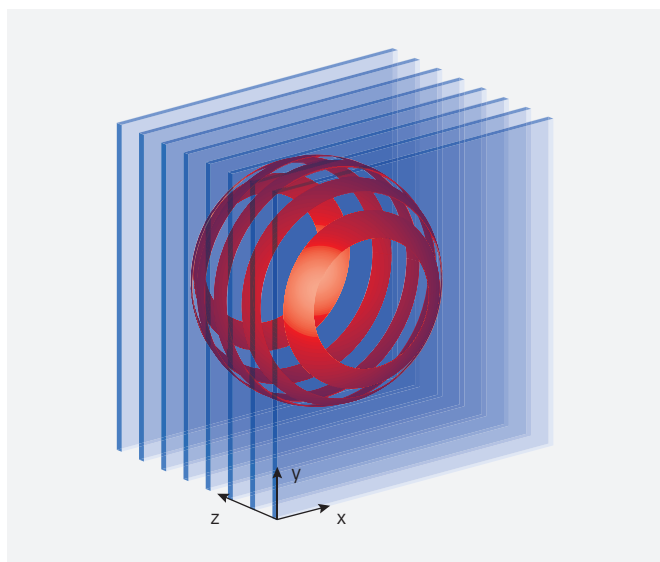


Рис.22. Принцип формирования трехмерной поверхности реального объекта

При наблюдении такой картинки не требуются специальные очки, не надо следить за положением головы (глаз), нет скачков изображения, а глаза и мозг оператора не устают.

* * *

Можно констатировать, что среди дисплейных технологий жидкие кристаллы развиваются наиболее динамично. В мире и в России ведутся работы как по совершенствованию и удешевлению известных типов ЖКД, так и по созданию новых устройств и материалов с дополнительными функциональными возможностями и более широкой областью применения. Появляется много перспективных устройств и технологий для фотоники.

Объем статьи не позволил рассказать об использовании ЖК в органической электронике и оптической обработке информации, в частности, с ЖК-линзами и дифракционными элементами. Своей очереди для подробного обзора ждут новые, пока еще экзотические фазы, такие как TGB (зернистая фаза с закрученными границами), лиотропные жидкие кристаллы, и многое другое.

ЛИТЕРАТУРА

34. **Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.-S.** Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications. Wiley. 2008. 248 p.
35. 3M Vikuiti Dual Brightness Enhancement Film // 3M. 2015. URL: <http://www.3m.com/product/information/Vikuiti-Dual-Brightness-Enhancement-Film.html>.
36. Display Enhancement Films [Electronic resource] // 3M. 2015. URL: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/IndustrialFilms/Home/Products/DisplayEnhancementFilms.
37. **Chen J., Hartlove J., Hardev V., Yurek J., Lee E., Gensler S.** High Efficiency LCDs using Quantum Dot Enhancement Films // SID'14 Symposium Digest of Technical Papers. 2014. P. 1428–1431.
38. **Vakulin D.A., Frenkel D.A., Gavrish E.O., Konshina E.A.** Impact of Doping CdSe/ZnS Quantum Dots on the Elasticity Coefficients of Nematic // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2015. V. 612, № 1. P. 110–116. DOI: 10.1080/15421406.2015.1030579.
39. **Belyaev V.V., Solomatina A.S., Kurilov A.D., Chaousov D.N., Mazaeva V.G.** Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // Applied Optics. 2014. V. 53, Iss. 29. P. H51–H57.
40. **Belyaev V.V., Solomatina A.S.** Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) LC Layers with Both Fixed and Unfixed Boundary Conditions // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2015. V. 613, № 1. P. 121–128. DOI: 10.1080/15421406.2015.1032087.
41. **Беляев В.** Светодиоды и плоскостовые дисплеи: Совмещение несовместимых // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 8. С. 82–94.
42. **Bulovic V.** Quantum dots and other materials for extremely thin displays and other active surfaces // SID'2014 Symposium, Seminars, 2014. M-7.
43. Патент РФ № 2324237, МКИ G09G5/00. Гибридный светомодулирующий-светоизлучающий дисплей и способ его изготовления / Гейвандов А.Р., Беляев В.В.; приор. 09.09.2005; Бюл. № 13, 10.05.2008.
44. Патент РФ № 2326448, МКИ G09G3/22. Жидкокристаллический дисплей / Беляев В.В., Гейвандов А.Р.; приор. 23.09.2005; Бюл. РФ № 16, 10.06.2008.
45. **Беляев В.** Погружение в суперреальность: По результатам симпозиума SID 2014 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 6. С. 32–44.
46. **Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N.** Electro-Optical Response of Compensated Helix Ferroelectric: Continuous Gray Scale, Fastest Response and Lowest Control Voltage Demonstrated to Date // SID' 2012 Digest. 2012. P. 452–455.
47. **Belyaev V.V.** PDLC shutters for 3D imaging // Proc. SPIE. Bellingham, USA, 2005. V. 5821. P. 117–121.
48. **de Boer D.K.G., Hiddink M.G.H., Sluijter M., Willemsen O.H., de Zwart S.T.** Switchable lenticular based 2D/3D displays // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV. 2007. V. 6490.
49. **Ezhov V.** Autostereoscopic Imaging with Simultaneous Reproduction of Two Image Elements in One Display Pixel: General Approach and Experimental Results // SID' 2012 Digest. 2012. P. 125–128.
50. **Андреев А., Компанец И.** Жидкокристаллические дисплеи. Перспективы развития. Часть 1 // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2012. № 6. С. 72–88
51. **Андреев А., Компанец И.** Жидкокристаллические дисплеи. Возможные применения ЖК. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2012. № 7. С. 140–144.