

## ФОРМИРОВАНИЕ РАСТРА В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЯХ С АКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ

А. В. Авраменко, [artemavramenko@yandex.ru](mailto:artemavramenko@yandex.ru)

И. А. Мухин, [ivanmuchin@yandex.ru](mailto:ivanmuchin@yandex.ru)

О. В. Украинский, [ukrainsk@sut.ru](mailto:ukrainsk@sut.ru)

Опубликовано в журнале «625» №9 (133)/2007, стр. 90 – 94.

Жидкокристаллические дисплеи (ЖКД, LCD – liquid crystal display) – перспективный и наиболее распространенный вид плоскостных отображающих устройств. Благодаря низкому энергопотреблению, высокой разрешающей способности и небольшой массе эти дисплеи широко применяются не только в качестве больших стационарных видеоскранов, но и в различных портативных устройствах, например, сотовых телефонах, фотоаппаратах и видеокамерах.

Существует несколько разновидностей ЖКД, различающихся принципом действия, способом развертки, видом жидкокристаллического вещества (ЖКВ) и ориентацией его молекул. В качестве телевизионных экранов, как правило, используются цветные ЖКД, работающие «на пропускание», с «активной» разверткой изображения и нематическим жидкокристаллическим веществом. Рассмотрим устройство таких дисплеев подробнее.

Основными функциональными элементами ЖКД являются модуль тыльной подсветки и жидкокристаллическая матрица (ЖКМ). В качестве подсветки обычно используются люминесцентные лампы (CCFL – cold cathode fluorescent lamp) или группа «белых» светодиодов. Жидкокристаллическая матрица (ЖКМ) находится непосредственно за рассеивателем модуля подсветки и представляет собой тонкую (2...4 мм) панель, состоящую из множества ячеек – субпикселей. Каждый субпиксель снабжен светофильтром (красным, зеленым или синим) и выполняет функцию регулятора интенсивности проходящего сквозь него светового потока.

Принцип действия субпикселя ЖКМ можно описать следующим образом. Белый неполяризованный свет от устройства подсветки проходит через входной поляризатор и становится плоскополяризованным. Далее свет проходит сквозь слой ЖКВ, где его поляризация изменяется, и попадает на выходной поляризатор (анализатор). Интенсивность пропускаемого анализатором света определяется степенью изменения поляризации света, которая, в свою очередь, зависит от пространственной ориентации молекул ЖКВ. Положение молекул зависит от напряженности электрического поля, которая определяется напряжением на обкладках ячейки. Таким образом, модуляция проходящего светового потока достигается изменением напряжения на обкладках ячейки.

Существует две теории, объясняющие суть изменений поляризации света молекулами ЖКВ. Согласно одной теории, «жидкие кристаллы» являются оптически активным веществом, которое способно вращать плоскость поляризации плоскополяризованного света, не изменяя вида поляризации. То есть на входе в ЖКВ и на выходе из него вид поляризации света один и тот же (колебание в фиксированной плоскости), а вот положение (угол) плоскости поляризации может быть разным. Вращение плоскости поляризации объясняют следующим образом. Плоскополяризованное колебание можно представить в виде суммы левовращающего и правовращающего колебаний, поляризованных по кругу. Из-за особого спиралевидного расположения молекул оптически активного вещества фазовые скорости распространения левовращающего и правовращающего колебаний различаются, что приводит к повороту плоскости поляризации суммарного колебания.

Согласно другой теории, «жидким кристаллам» свойственно двулучепреломление, в результате которого изменяется вид поляризации – с плоской на эллиптическую. Рассмотрим этот процесс на примере матрицы типа TN (Twisted Nematic). При наличии внешнего электрического поля молекулы ЖКВ выстраиваются вдоль его силовых линий (рис. 1).

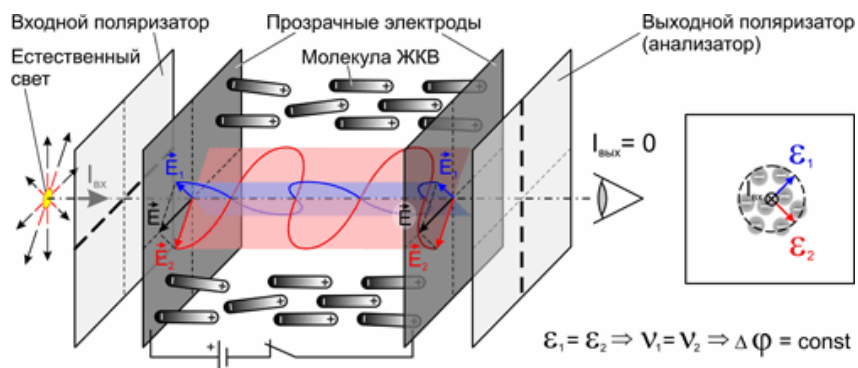


Рис. 1. Прохождение света сквозь ячейку матрицы TN при наличии внешнего электрического поля

Плоскополяризованное колебание  $\mathbf{E}$  можно представить в виде суммы плоскополяризованных колебаний  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$ , распространяющихся во взаимно ортогональных плоскостях. Нетрудно заметить, что диэлектрические проницаемости среды в этих плоскостях ( $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ) одинаковы. Следовательно, одинаковы и фазовые скорости распространения колебаний  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$ , так как фазовая скорость связана с диэлектрической проницаемостью следующим соотношением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon}},$$

где  $v$  – фазовая скорость волны,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\epsilon$  и  $\mu$  – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Таким образом, колебания распространяются с равными скоростями, и сдвиг фаз  $\Delta\phi$  между ними сохраняется равным нулю. Следовательно, на выходе из ЖКВ суммарное колебание имеет плоскую поляризацию того же направления, что и до входа в ЖКВ.

При отсутствии электрического поля «жидкие кристаллы» скручиваются в спирали (рис. 2), и можно выделить два направления, ортогональных нормали к экрану, для которых диэлектрическая проницаемость среды максимальна ( $\epsilon_1$ ) и минимальна ( $\epsilon_2$ ).

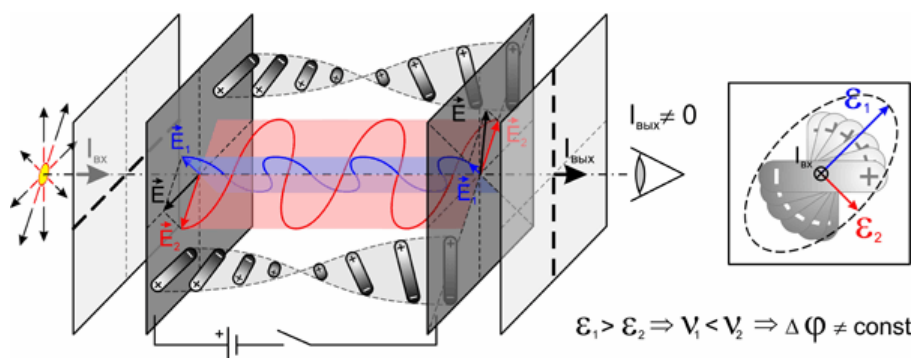


Рис.2. Прохождение света сквозь ячейку матрицы TN при отсутствии внешнего электрического поля

Колебания  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  в этом случае можно назвать обыкновенным и необыкновенным лучами, как это принято для кристаллов, обладающих двулучепреломлением. Фазовые скорости распространения этих лучей различны. На выходе из ЖКВ колебания складываются уже с иной фазой, поэтому поляризация суммарного колебания преобразуется из плоской в эллиптическую. Процесс изменения вида поляризации показан на рисунке 3.

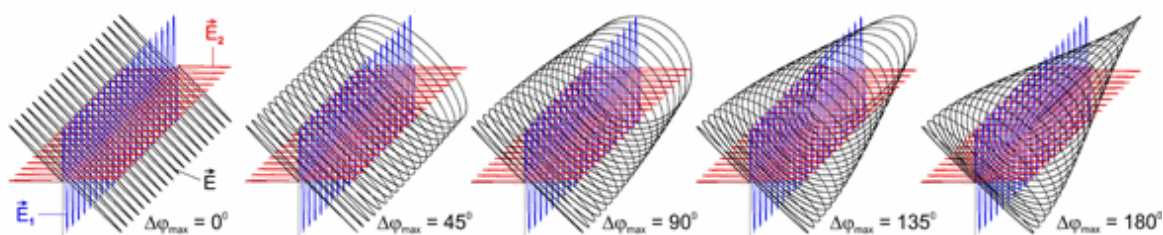


Рис. 3. Изменение формы эллипса поляризации при уменьшении напряженности внешнего поля

Интенсивность проходящего через анализатор эллиптически поляризованного света определяется формой и наклоном эллипса, которая, в свою очередь, определяется положением жидких кристаллов, и, следовательно, напряжением между обкладками ячейки.

Для формирования полноценного изображения необходимо управлять напряжением на обкладках всех субпикселей матрицы. Учитывая, что количество субпикселей, как правило, очень велико, очевидно, что организовать произвольный доступ ко всем ячейкам не представляется возможным из-за большого количества электродов. Одним из решений этой проблемы является объединение обкладок субпикселей. Например, тыльные обкладки объединяются в вертикальные прозрачные электроды, а фронтальные обкладки – в горизонтальные электроды. Подобным образом устроены так называемые пассивные матрицы. Нетрудно

заметить, что при этом существует возможность одновременного сканирования (управления яркостью) субпикселей только одной строки матрицы.

На первый взгляд может показаться, что этого более чем достаточно для формирования раstra с высокой частотой обновления, особенно если вспомнить, что, например, при развертке изображения в цветной ЭЛТ одновременно сканируется не целая строка, а всего один пиксель (под сканированием в данном случае понимается возбуждение люминофора тремя электронными лучами). Однако нужно учитывать, что в ЭЛТ подобный способ развертки возможен благодаря двум особенностям свечения люминофора: очень быстрому «разгоранию» (доли микросекунды) и очень медленному «затуханию» (единицы миллисекунд).

К сожалению, «жидким кристаллам» свойственна большая инерционность, причем, что очень важно, не только при «затухании» ячейки, но и при ее «разгорании». Под «разгоранием» понимается увеличение «пропускной способности» субпикселя. Например, в матрицах TN со скрещенными поляризаторами («Normally White») увеличению интенсивности проходящего света соответствует снижение напряженности внешнего электрического поля и движение жидких кристаллов под действием сил межмолекулярного взаимодействия. Этот процесс длится 20...40 мс. Следовательно, для получения максимальной яркости субпикселей строки время ее сканирования должно быть очень большим. Если матрица содержит, например, 768 строк, то для формирования раstra понадобится 15...30 секунд. Таким образом, подобный способ развертки изображения неприменим для получения яркого и контрастного изображения на матрицах, содержащих большое количество строк.

Для повышения частоты обновления необходимо, чтобы сканирование строки (указание уровней прозрачности каждому из ее субпикселей) производилось как можно быстрее, но при этом напряжение на обкладках каждой из ячеек оставалось на уровне заданного как можно дольше. Добиться этого удалось в так называемых «активных» матрицах.

Ячейки активной матрицы обладают долговременной памятью, то есть способны длительное время сохранять заданную при сканировании строки напряженность электрического поля. Каждая ячейка активной матрицы имеет свой собственный индивидуальный электрод (ИЭ), конденсатор и тонкопленочный транзистор (TFT – thin film transistor). Сток TFT соединен с ИЭ, исток – с вертикальной шиной данных, а затвор – с горизонтальной шиной выбора строки (рис. 4).

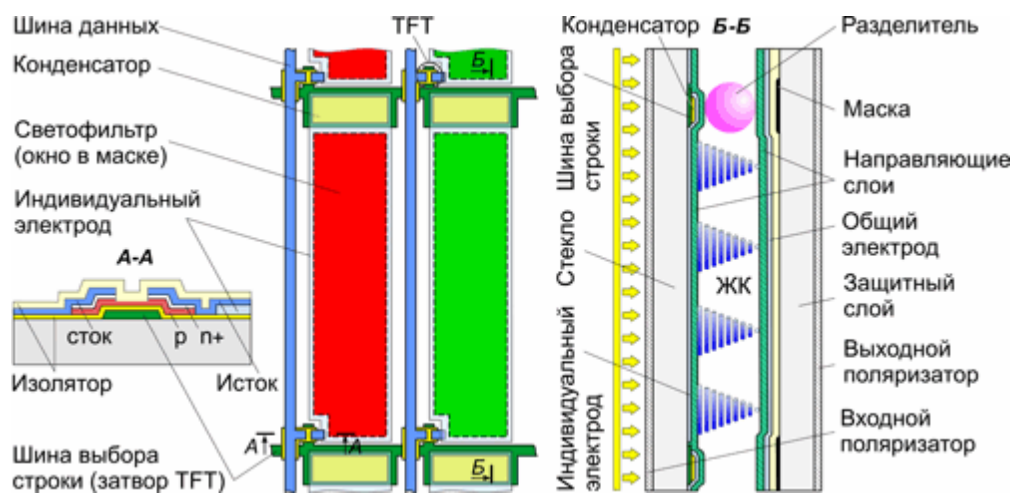


Рис. 4. Устройство активной матрицы

Для увеличения длительности хранения заряда применяется конденсатор, одна обкладка которого соединена с верхней частью индивидуального электрода, а вторая подключена к горизонтальной шине выбора предыдущей строки, либо к независимой дополнительной горизонтальной шине. Вторым электродом у всех ячеек матрицы общий. Он расположен на внутренней поверхности фронтального стекла (защитного слоя), обычно имеет нулевой потенциал, и, так же, как и ИЭ, выполнен из прозрачного материала ITO (indium tin oxide). Горизонтальные и вертикальные шины управления активной матрицы значительно уже, чем у пассивной матрицы, и выполнены из непрозрачного, но хорошо проводящего ток материала.

Развертка изображения осуществляется следующим образом. При подаче положительного напряжения на горизонтальный электрод строки с номером N транзисторы всех ее ячеек открываются. Одновременно на горизонтальные шины данных подаются напряжения, соответствующие яркостям отдельных ячеек заданной строки. Через открытые транзисторы производится перезаряд конденсаторов и межэлектродных емкостей ячеек. Благодаря хорошей проводимости вертикальных шин данных, этот процесс длится всего 10-20 мкс. Таким образом, время сканирования строк очень мало, и, следовательно, частота обновления изображения (частота кадров) может быть высокой (60-85 Гц при 768-1080 строках). По окончании процесса перезаряда

емкостей на горизонтальный электрод подается нулевой потенциал, и все транзисторы строки закрываются. Индивидуальные электроды ячеек отключаются от шин данных, но, благодаря наличию конденсаторов, напряженность поля в ячейках сохраняется на прежнем уровне весь цикл развертки – вплоть до очередного сканирования. Следовательно, процесс переориентации молекул ЖКВ длится не только во время сканирования строки, но и после. Таким образом, несмотря на то, что время сканирования строки крайне мало, молекулы ЖКВ успевают повернуться на заданный угол, а ячейка принимает заданное значение яркости. Описанный выше процесс развертки может быть схематично и упрощенно представлен следующим образом (рис. 5).

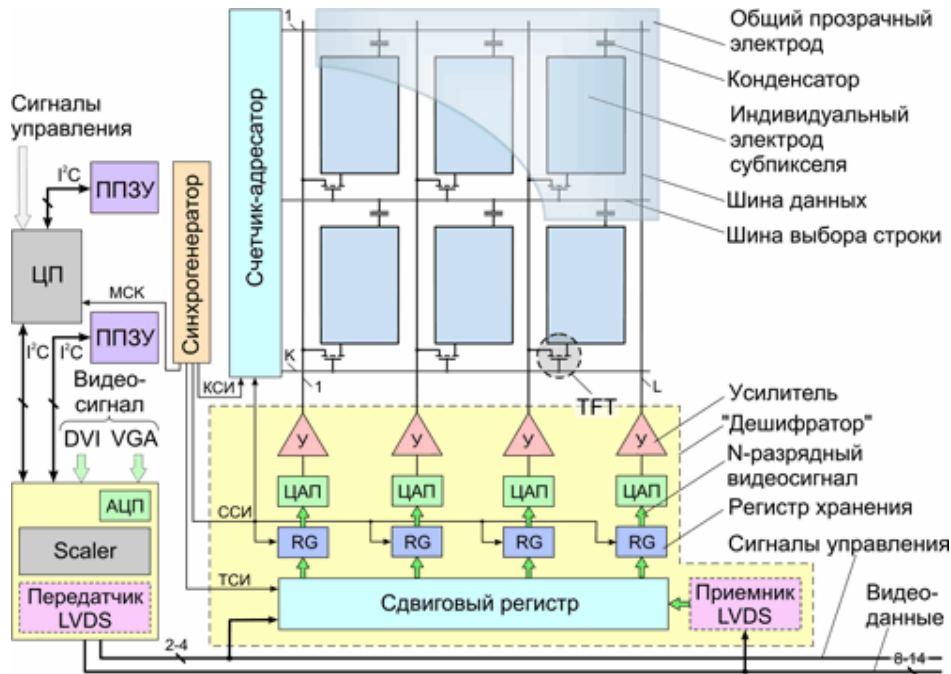


Рис. 5. Развертка изображения в активной матрице

Видеосигнал в цифровой форме поступает на специализированную интегральную схему – скейлер (scaler), где преобразуется в соответствии с физическим разрешением матрицы ( $K$  строк,  $L$  элементов в строке). С выхода скейлера  $N$ -разрядный (обычно 8 бит) видеосигнал  $K$ -й строки поступает на  $N$ -разрядный сдвиговый регистр, который управляется тактовыми синхроимпульсами (ТСИ). Частота следования ТСИ равна частоте следования элементов изображения (рис. 6).



Рис. 6. Временные диаграммы сигналов синхронизации схемы развертки изображения



При появлении каждого импульса цифровая последовательность в регистре смещается влево. Когда количество поступивших импульсов равно горизонтальному разрешению матрицы, цифровые данные яркостей пикселей оказываются на соответствующих выходах сдвигового регистра. В этот момент по переднему фронту строчного синхроимпульса производится запись цифровых  $N$ -разрядных кодов в  $N$ -разрядные регистры хранения, а состояние счетчика-адресатора увеличивается на единицу и на шину выбора строки  $K$  подается положительное напряжение. Данные с регистров хранения преобразовываются в аналоговые сигналы, которые поступают через открытые транзисторы на ячейки  $K$ -й строки и перезаряжают их емкости. Одновременно с процессом перезаряда емкостей ячеек  $K$ -й строки в сдвиговом регистре накапливаются данные следующей (первой) строки. По окончании процесса накопления данные из сдвигового регистра записываются в  $D$ -триггеры, а счетчик-адресатор сбрасывается кадровым синхроимпульсом в единицу. Начинается процесс перезаряда емкостей ячеек 1 строки и накопление данных второй строки.

Таким образом, основные элементы схемы развертки выполняют следующие функции. Счетчик-адресатор преобразует последовательность импульсов в унитарный (позиционный) код. Сдвиговый регистр, по сути, является преобразователем последовательного цифрового кода в параллельный. А регистры памяти выполняют две функции – выборки и хранения, запоминая сигнал на выходах сдвигового регистра только в те моменты времени, когда там накопились данные целой строки.

Для уменьшения габаритов ЖКД функции сдвигового регистра, регистра хранения, ЦАП и усилителей объединены в специализированных интегральных схемах, называемых иногда «дешифраторами». В матрицах с диагональю более 2 дюймов используется, как правило, несколько «дешифраторов» (рис. 7).

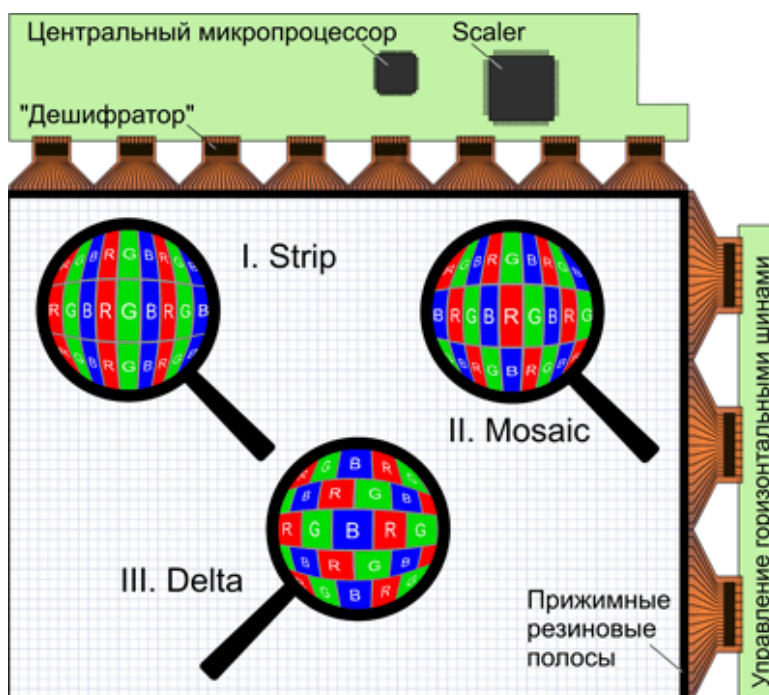


Рис. 7. Коммутация активной матрицы

Из-за высокой плотности выводов (5-8 выводов на 1 мм) «дешифраторы» располагаются непосредственно на гибких шлейфах, соединяющих основную плату с матрицей. При этом обычно используется технология TAB (tape automated bonding). Передача данных от скейлера к «дешифраторам» осуществляется обычно с использованием интерфейса LVDS (low voltage differential signaling).

Активные матрицы в большинстве случаев выполняются цветными, при этом встречается три варианта расположения субпикселей: полосковый, мозаичный и дельтовидный. Первый случай отличается простотой управления, изготовления пикселей и нанесения светофильтров. Однако качество отображения мелких цветных деталей при этом получается низким. Во втором случае качество изображения выше, однако усложняются процессы нанесения светофильтров и управления, так как одна и та же вертикальная шина управляет яркостью субпикселей трех разных цветов. Такие матрицы дороже и встречаются реже. Самым лучшим вариантом с точки зрения качества изображения является третий. При этом процессы нанесения светофильтров и изготовления пикселей усложняются значительно, так как субпиксели располагаются не строго друг за другом, а со смещением на половину ширины. Такие матрицы встречаются довольно редко и используются, как правило, в тех случаях, когда требуется точное отображение мелких деталей и наклонных линий, например, при работе в PCAD, AutoCAD и т.д.

Благодаря наличию памяти каждый субпиксель панели светится весь кадр, то есть мерцания экрана отсутствуют. Однако при этом инерционность ЖКВ остается на прежнем уровне – как в пассивных матрицах. Максимальная длительность разворота молекул (при спаде напряженности поля в ячейке от максимума до нуля) может составлять 20-50 мс, то есть несколько периодов кадровой развертки. Таким образом, скорость обновления изображения в активных панелях определяется не столько частотой сканирования, сколько инерционностью ЖКВ.

Инерционность обычно оценивается по тому, насколько быстро ячейка панели способна изменять свою яркость. Мерой оценки скорости является время перехода (время отклика, response time) от одного уровня яркости к другому. Для матриц типа «Normally Black», которые при отсутствии напряжения не пропускают свет, переход от черного к белому (BTW, black to white) происходит быстрее, чем обратный переход (WTV), так как в этом случае молекулы движутся под действием электрического поля, а не за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Поэтому в рекламных целях в документации на матрицы типа «Normally Black» обычно указывается так называемый «отклик BTW» – время, за которое яркость пикселя увеличивается от минимума до 90% от максимума. В матрицах типа «Normally white» ситуация прямо противоположная и для них обычно указывают «отклик WTV» – время, за которое яркость пикселя уменьшается от максимума до 10% от максимума. Иногда для измерений выбираются промежуточные уровни яркости, например, 30% и 60% от максимума. При этом указывается «время отклика GTG (gray to gray)», но значения уровней не приводятся, поэтому подобная характеристика инерционности малоинформативна. Для уменьшения инерционности ЖКВ применяются различные способы, наиболее распространенным из которых является «OverDrive».

Необходимо также отметить, что наличие памяти у ячеек позволяет добавлять к информационному сигналу еще и некоторую постоянную составляющую, компенсирующую, например, неравные углы поворота плоскополяризованного света с разными длинами волн или управляющую динамическим балансом белого.

По качеству изображения активные матрицы значительно превосходят пассивные, но при этом и они имеют ряд недостатков. Это, во-первых, уже упомянутая выше инерционность смены изображения, из-за которой быстродвижущиеся объекты в динамичных сценах кажутся размытыми. Во-вторых, это небольшие углы обзора. При наблюдении матрицы под углом контраст изображения уменьшается, а цветопередача ухудшается, что, однако, выражено в значительной мере только в матрицах типа TN и менее заметно в матрицах IPS, MVA и PVA. В-третьих, LCD имеют небольшой цветовой охват, то есть невысокое качество цветопередачи. Это связано с тем, что частотные характеристики пропускания фильтров субпикселей нельзя делать очень узкими, так как при этом уменьшается яркость (и контраст) изображения. Кроме того, изготовление таких фильтров – сложная задача. В итоге, насыщенность основных цветов (R,G и B) снижается и площадь цветового треугольника (цветовой охват) уменьшается. Однако нельзя не отметить, что лучшие образцы ЖКД по качеству цветопередачи и углам обзора приближаются к дисплеям на основе ЭЛТ и плазменным панелям. Четвертый недостаток активных матриц – высокая цена, обусловленная необходимостью использования пластин аморфного (или поликристаллического) кремния большого размера, не содержащих на всей площади каких-либо дефектов.

Надо отметить, что прогресс в области ЖКД не стоит на месте, так как есть некоторый запас в развитии технологий их изготовления, и потому с каждым годом эти отображающие устройства становятся лучше.