

## РАЗВИТИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОНИТОРОВ

*Статья опубликована в журнале "BROADCASTING Телевидение и радиовещание":*

*1 часть - №2(46) март 2005, с.55-56; 2 часть - №4(48) июнь-июль 2005, с.71-73.*

*Мухин И.А., ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

Дисплеи на жидких кристаллах – LCD (Liquid Crystal Display) появились более двадцати лет назад. Но только в последние годы качество изображения, формируемого этими устройствами, достигло уровня, позволяющего конкурировать с экранами на основе ЭЛТ (электронно-лучевой трубки, кинескопа). Более широкому распространению жидкокристаллических (ЖК) мониторов препятствует ряд недостатков, устранением которых занимаются ведущие фирмы-разработчики.

Принцип действия ЖК-матриц основан на таких физических явлениях, как поляризация света и вращение плоскополяризованного света жидкокристаллическим веществом. Поляризация света происходит при его прохождении через специальное вещество – оптический поляризатор. Пропускаются только те электромагнитные волны, плоскость поляризации которых близка или совпадает с плоскостью поляризации поляризатора. Управление яркостью ячеек ЖК-матриц осуществляется следующим образом. Жидкие кристаллы помещаются между двумя поляризаторами с перпендикулярно ориентированными плоскостями поляризации. При приложении электрического поля к жидкокристаллическому веществу, оно «поворачивает» плоскость поляризации света и ячейка становится светлой.

Матрица ЖК-монитора представляет собой множество пикселей, каждый из которых состоит из трех одинаковых субпикселей, отличающихся только цветом выходного светофильтра (красный, зеленый, синий). Большинство цветных ЖК-матриц работает на просвет. Субпиксели сами не являются источником света, они лишь регулируют интенсивность проходящего сквозь них светового потока. Существует несколько видов матриц, но все они работают по схожим принципам. С тыльной стороны матрицы находится источник неполяризованного света – галогенные или электролюминисцентные лампы с холодным катодом - CCFL (Cold Cathode Fluorescence Light). Естественный свет от ламп проходит сначала через входной поляризатор и становится плоскополяризованным. Далее на него воздействуют молекулы ЖК-вещества, которые находятся в электрическом поле, и изменяют плоскость поляризации на определенный угол – в зависимости от напряженности поля. После этого «закрученный» свет проходит через анализатор.

Напряженность поля, пронизывающего молекулы ЖК-вещества, изменяется в современных цветных матрицах с помощью активных приборов - тонкопленочных транзисторов (TFT – Thin Film Transistor). Каждый субпиксель матрицы имеет индивидуальный электрод, конденсатор памяти и тонкопленочный полевой транзистор. На рис. 1 показано устройство ЖК-матрицы самого распространенного типа – TN (Twisted Nematic).

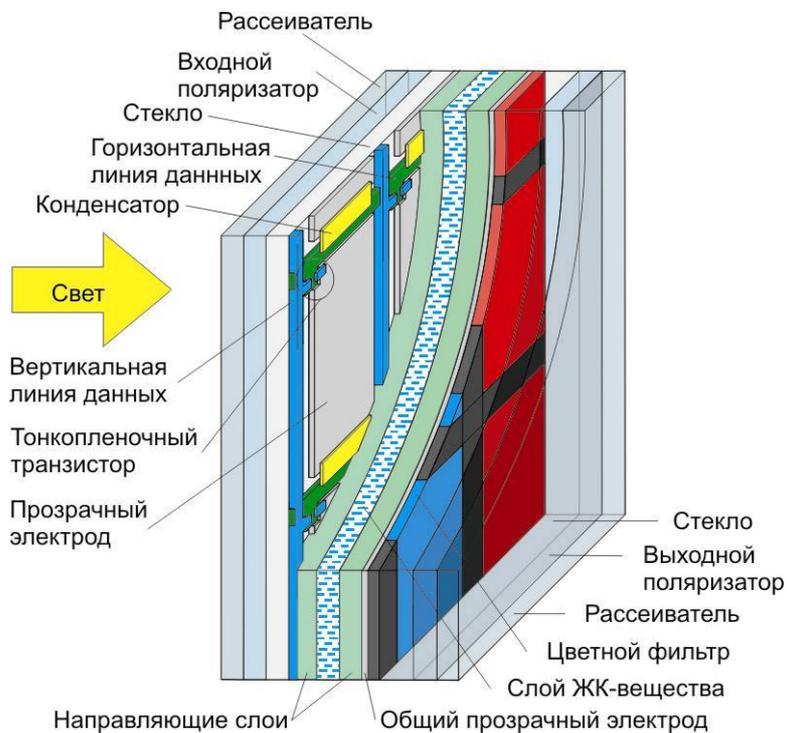


Рис. 1. Устройство активной TN-матрицы

Полевой транзистор подключен стоком к вертикальной линии данных, затвором – к горизонтальной линии данных, а истоком – к индивидуальному электроду. Формирование изображения в активных ЖК-панелях очень упрощенно можно представить так. Входной видеосигнал первой строки изображения поступает на вертикальные линии данных. Напряжения на каждой из линий соответствуют яркостям субпикселей первой строки. После этого на горизонтальную линию данных первой строки поступает импульс, который открывает все транзисторы (TFT) этой строки. Через открытые транзисторы заряжаются конденсаторы всех субпикселей первой строки до значений на вертикальных линиях данных. После этого импульс с горизонтальной линии данных первой строки исчезает и все транзисторы закрываются. Но конденсаторы продолжают хранить заряд, поэтому напряженность поля и, соответственно, угол разворота ЖК-кристаллов в ячейках первой строки остаются постоянными. Далее все повторяется уже для второй, третьей и последующих строк. Прозрачность, а значит и яркость каждого из субпикселей остается без изменений в течении всего периода обновления экрана. То есть даже если бы экран обновлялся всего раз в секунду (частота – 1 Гц!), то он все равно бы не мелькал. Для качественной передачи движущихся объектов желательна частота смены (обновления) кадров всего порядка 20...25 Гц, но для облегчения совместимости с широко распространенными видеоадаптерами, а также для упрощения отображения телевизионного изображения или видеофильмов, современные ЖК-мониторы работают на частотах 60, 75 или 85 Гц.

ЖК-экраны обладают рядом достоинств:

- Малая глубина (толщина). В отличие от устройств на ЭЛТ, глубина которых составляет 30-50 см, ЖК-мониторы имеют очень небольшую толщину, порядка 5-10 см. Благодаря этому такой монитор занимает меньше места на рабочем столе или вообще может быть подвешен на стену.

- Плоский экран. Многие плоские мониторы на ЭЛТ являются плоскими только снаружи, а внутри они сферические, что приводит к появлению геометрических искажений. ЖК-монитор не имеет такого недостатка.
- Высокая четкость изображения. Матричная структура дисплея избавляет его от таких распространенных дефектов ЭЛТ-мониторов, как нарушение чистоты цвета, несведение, расфокусировка и нелинейность развертки.
- Отсутствие вредных излучений. В отличие от ЭЛТ, ЖК-монитор не является источником ни рентгеновского, ни электромагнитного излучения.
- Отсутствие мельканий. Каждый пиксель ЖК-матрицы светится постоянно, меняя яркость только при смене кадра, тогда как люминофор ЭЛТ светится лишь короткий промежуток времени, после того, как на него попадет электронный луч.
- Большие размеры рабочей части экрана. ЖК-монитор 15" имеет рабочую часть экрана, сравнимую с рабочей частью 17" ЭЛТ-монитора, так как в случае с ЭЛТ, 17" – это размер колбы кинескопа, а не размеры формируемого раstra.

К сожалению, LCD имеют ряд недостатков. Один из них – **появление тянущихся продолжений** («хвостов», «призраков») за движущимися предметами. Это обусловлено тем, что при частоте обновления 85 Гц кадры изображения поступают из видеоадаптера к монитору каждые 11,8 мс. Но вот само изображение, формируемое матрицей, не успевает обновляться с такой высокой частотой из-за инерционности жидких кристаллов. Напряжения на индивидуальных электродах субпикселей могут меняться быстро, а вот для того чтобы жидкие кристаллы соответственно переориентировались нужно время – **время отклика**. Чем меньше это время, тем быстрее исчезает старое изображение и появляется новое, то есть тем меньше эффект тянущихся продолжений за движущимися объектами. Для отображения динамичных сюжетов (игры, видеофильмы), желательна матрица с временем отклика не более 20 мс.

Другой недостаток – **низкое качество изображения при несовпадении разрешений**. Дело в том, что качественное отображение картинки на экране возможно только в том случае, если число строк разложения входного сигнала (режим работы видеоадаптера компьютера) соответствует физическому разрешению экрана. Зачастую это условие не выполняется. Например, физическое разрешение 17" LCD монитора – 1280×1024 пикселя, а видеоадаптер работает в режиме 1024 на 768 точек. Чтобы получить качественную картинку, можно использовать не все пиксели панели, а только матрицу 1024 на 768 (рис.2).

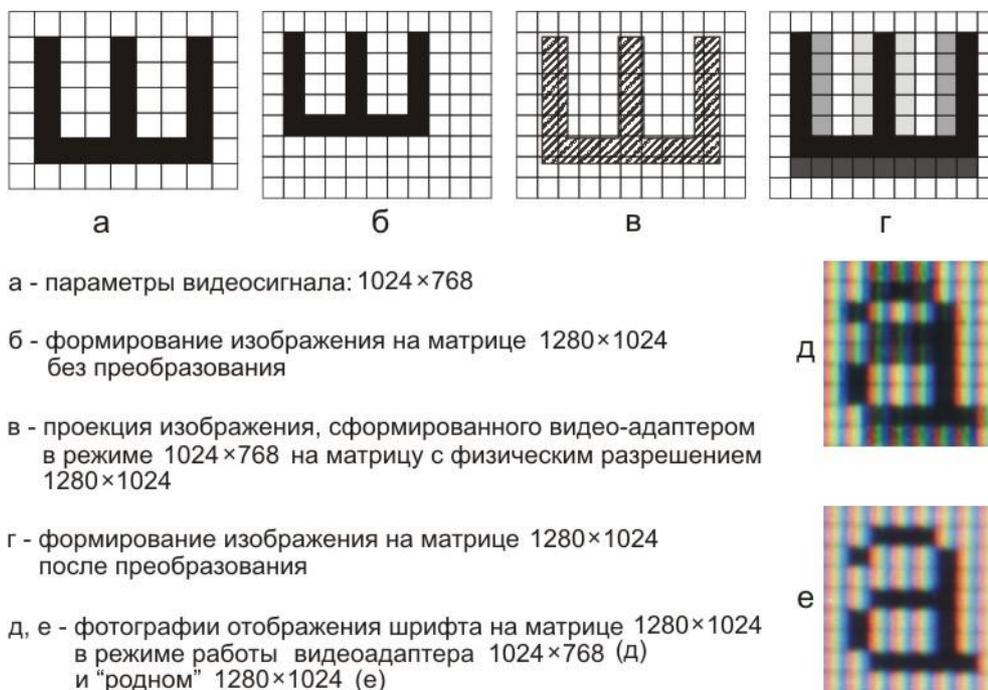


Рис.2. Формирование изображения ЖК-панелью при различных режимах работы видеокарты

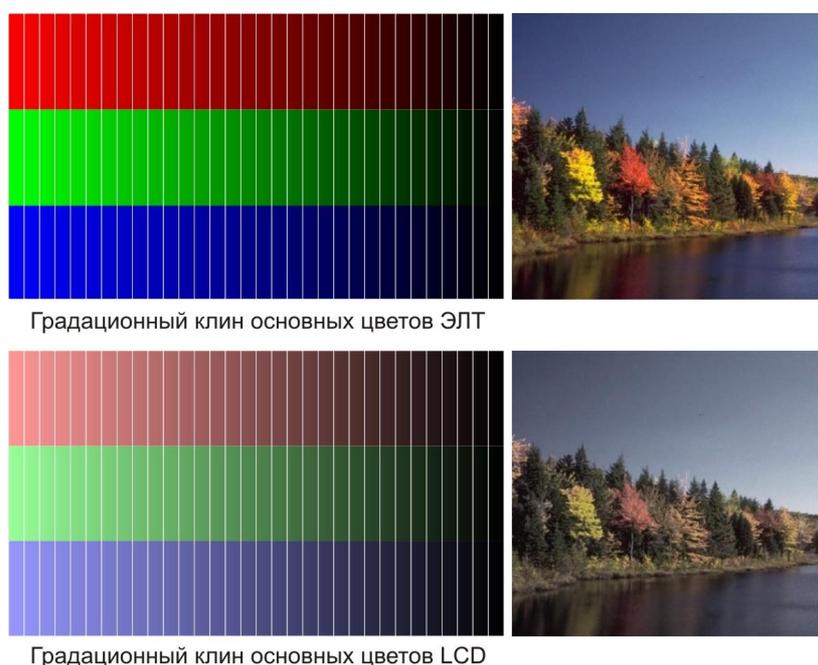
Но при этом, очевидно, изображение будет занимать лишь часть рабочей поверхности экрана. Чтобы развернуть изображение на весь экран, применяется метод нелинейной интерполяции, когда одно разрешение пересчитывается в другое. Например, фирма Samsung разработала и реализовала функцию усовершенствованного масштабирования изображения (**IEF** – Image Enhancement Function). Но так как разрешения экрана и сигнала не являются кратными, такой метод не дает хороших результатов. В итоге, мелкий шрифт на полученном изображении воспроизводится с заметными искажениями, а некоторые вертикальные или горизонтальные линии имеют зачастую удвоенную толщину либо вовсе исчезают. Картинка кажется «нерезкой, расфокусированной». Поэтому для работы с мелким текстом или графикой при различных режимах работы видеокарты больше подходит экран на основе ЭЛТ.

Следующий недостаток – **невысокий контраст** формируемого LCD изображения - примерно 250:1 – 500:1 (при 600:1 -1000:1 для PDP). Контраст – это отношение яркости самых светлых участков изображения к самым темным. Следовательно, чем ярче светлые участки и чем темнее темные, тем выше контраст. Яркость современных ЖК-панелей достаточно высока (300-500 кд/м<sup>2</sup>) и причина низкого контраста – в повышенной яркости темных участков изображения. Дело в том, что поляризатор и анализатор не идеальны. Анализатор просто подавляет, но не задерживает полностью свет, направление поляризации которого ортогонально направлению поляризации поляризатора. Поэтому «закрытая» ячейка пропускает свет. В результате, черные детали изображения становятся серыми, что приводит к уменьшению контраста. Измерять контраст можно несколькими способами, поэтому у разных производителей контраст изображения, воспроизводимого одной и той же матрицей может значительно различаться.

Другой неприятной особенностью ЖК-панели является **неравномерное распределение яркости** по полю экрана. Для подсветки используется несколько тонких и длинных ламп, поэтому,

несмотря на применение всевозможных отражателей и рассеивателей, добиться равномерной освещенности ЖК-матрицы затруднительно.

Кроме того, ЖК-экраны имеют **плохую цветопередачу**. Дело в том, что субпиксели ЖК-матрицы не являются светоизлучающими элементами, а представляют собой фильтры, пропускающие свет от белых ламп подсветки. Спектральные характеристики пропускания фильтров делают широкими, чтобы увеличить яркость. Поэтому цвета субпикселей получаются ненасыщенными, а значит, панель имеет небольшой цветовой охват. Это означает, что хоть она и передает 16,8 миллионов цветов, среди них нет таких, которые может передать, например, ЭЛТ или плазменная панель. Важно не только количество передаваемых цветов, но и то, какие это цвета. На рис.3 показаны градации основных цветов для ЭЛТ и LCD.



*Рис.3 Сравнение цветопередачи ЭЛТ и LCD*

В обоих случаях количество градаций одинаково, то есть оба устройства передают одинаковое количество цветов. Однако цвета, передаваемые ЭЛТ, имеют насыщенность, изменяющуюся в больших пределах, чем цвета, передаваемые LCD.

Некоторые ЖК-мониторы не удается подключить к видеоадаптеру компьютера по цифровому интерфейсу, (если монитор имеет только аналоговый вход или видеокарта имеет только аналоговый выход D-Sub, который также называют DB-15, HD-15, RGB). При этом на экране могут появиться **дрожащие по горизонтали пиксели** или «снег» (светлые хаотически перемещающиеся точки), хорошо заметный на темном фоне. Дело в том, что и видеокарта, и ЖК-монитор являются устройствами цифровыми. При передаче сигнала в аналоговой форме требуется два преобразования – сначала в видеокарте (из «цифры» в «аналог»), затем, после передачи по кабелю, - в мониторе (из «аналога» в «цифру»). Передача данных в аналоговой форме более подвержена воздействию помех, да и сами процессы преобразования вносят некоторые искажения. Однако проблема эта решается достаточно просто – достаточно передавать информацию с видеоадаптера к монитору по цифровому

интерфейсу DVI (рис.4). DVI (Digital Visual Interface – цифровой видеоинтерфейс) – это стандарт передачи видеоданных, предусматривающий наличие обычного аналогового канала RGB и двух цифровых каналов TMDS (Transmission Minimized Differential Signaling – дифференциальный сигнал с минимизированными переходами).

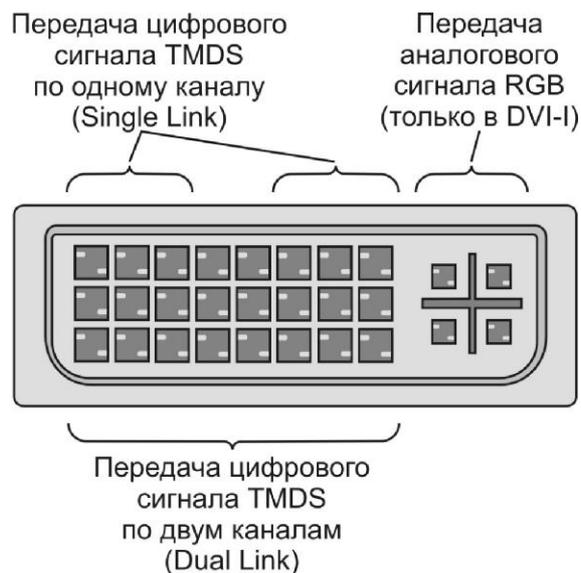


Рис. 4. DVI-разъем

Многие современные ЖК-мониторы и практически все новые видеокарты поддерживают прием и передачу данных по цифровому интерфейсу. Поэтому уже в скором времени проблемы, связанные с ухудшением качества картинки вследствие двойного цифроаналогового преобразования, уйдут в прошлое.

Еще один недостаток ЖК-панелей – **наличие неработающих (выбитых, «мертвых») пикселей**, - точек, которые либо всегда горят, либо всегда темные. Это связано с дефектами TFT-транзисторов, сформированных на кремниевых аморфных (a-Si) или поликристаллических (p-Si) пластинах и управляющих яркостью пикселей. Изготовить такую пластину, не имеющую дефектов очень сложно. Отсюда – низкий процент выхода качественных мониторов (и, следовательно, их высокая цена). Производители допускают наличие от 3 до 7 неработающих точек, (в зависимости от их яркости и расположения). Однако, нужно заметить, что в последнее время все больше появляется мониторов, которые вообще не имеют «мертвых» точек и можно надеяться, что в скором будущем новые технологии позволят забыть о таком дефекте.

Следующая серьезная проблема - ЖК-экраны имеют **небольшой угол обзора**, то есть при наблюдении изображения на мониторе, оно становится блеклым и малоконтрастным, значительно ухудшается цветопередача. Разработчики ЖК-экранов придумывают новые конструкции матриц в основном для того, чтобы увеличить углы обзора и улучшить качество цветопередачи. Поэтому на этом вопросе нужно остановиться подробнее. Рассмотрим процесс прохождения света через ячейку самого распространенного типа матриц – TN (рис.5).

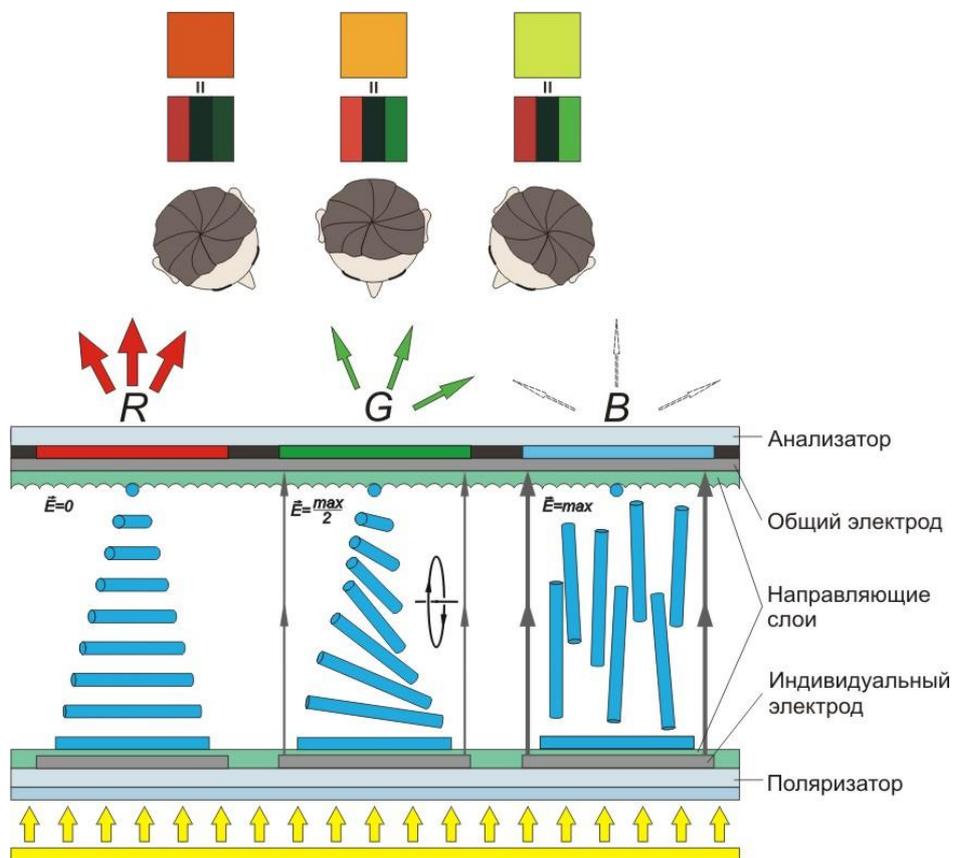


Рис.5 Углы обзора TN-матрицы

Когда электрического поля нет ( $E=0$ ), то все жидкие кристаллы находятся в закрученном состоянии. Такого спиралевидного положения добиваются направляющими слоями, имеющими специальные бороздки. На одной подложке бороздки расположены горизонтально, а на другой - вертикально. Жидкие кристаллы, постепенно перестраиваясь от горизонтального положения к вертикальному, образуют винтовую (твист) структуру. Естественный свет, пройдя поляризатор, становится плоскополяризованным, далее он подвергается скручиванию на  $90^\circ$  жидкими кристаллами и беспрепятственно проходит через анализатор, так как плоскость поляризации закрученного света и плоскость поляризации анализатора совпадают. Диаграмма излучения ячейки получается узкой, но симметричной, так как все жидкие кристаллы, хоть и закручены в спирали, но расположены параллельно экрану.

При появлении в ячейке электрического поля, молекулы жидких кристаллов, не меняя своего положения в плоскости экрана, разворачиваются в плоскостях, перпендикулярных экрану. То есть спиралевидная структура не раскручивается, а просто рушится, так как каждый из составляющих ее кристаллов стремится развернуться в направлении силовых линий электрического поля. Чем выше напряженность поля, тем меньше угол между направлением ориентации жидких кристаллов и перпендикуляром к экрану, то есть тем сильнее разрушается твист-структура и тем меньшая часть света подвергается скручиванию и проходит через ячейку. Ячейка темнеет. Допустим, при некотором среднем значении напряженности электрического поля кристаллы «наклонились» по отношению к экрану на угол  $45^\circ$ . Диаграмма направленности излучения ячейки будет шире, но не

симметрична. Если посмотреть на ячейку так, чтобы направление взгляда совпало с направлением наклоненных жидких кристаллов, то мы увидим темную ячейку, так как в этом направлении свет скручиванию не подвергается, а значит, не может пройти через выходной поляризатор. Зато если посмотреть на ячейку с других направлений, то она покажется нам более яркой.

Когда в ячейке действует электрическое поле максимальной напряженности, все жидкие кристаллы разворачиваются перпендикулярно экрану, диаграмма направленности получается очень широкой и симметричной. С любого направления ячейка будет казаться нам одинаково черной. Таким образом, получается, что воспринимаемая нами яркость субпикселя зависит от угла наблюдения, то есть от диаграммы направленности его излучения. А диаграмма направленности меняет свою форму в зависимости от истинной яркости субпикселя. Например, мы вывели на экран пиксель оранжевого цвета. Это означает, что красный субпиксель имеет максимальную яркость (узкую, но симметричную диаграмму направленности), зеленый пиксель - среднее значение яркости (несимметричную диаграмму направленности), а синий пиксель - нулевую яркость (широкую и симметричную диаграмму направленности). Если мы смотрим на экран под прямым углом, то направленность излучения ячеек нам не важна, цвета трех субпикселей сливаются, и мы видим оранжевую точку. Но посмотрим на нее под углом. Синий пиксель так и останется темным. Яркость зеленого пикселя либо уменьшится, либо увеличится, в зависимости от направления, так как диаграмма излучения при средней яркости несимметрична. А красный пиксель будет немного темнее, но зато с одинаковой яркостью под любым углом. В итоге, цвет точки будет искаженным - она будет иметь либо красный, либо зеленый оттенок.

Для уменьшения зависимости яркости и цветопередачи с изменением угла обзора различными фирмами было предложено несколько вариантов решения проблемы. Самый простой способ - **нанесение на верхний слой дисплея рассеивающих пленок**. В этом случае свет, выходящий из панели перпендикулярно ей, окажется переориентированным и будет распространяться от экрана под разными углами. Почти все дисплеи на матрицах типа TN имеют такие пленки. Поэтому такие матрицы иногда называют TN+Film (пленка) или **FTN**.

В 1995 г. компаниями NEC и Hitachi была разработана технология планарной (плоскостной) коммутации (**IPS** – In-Plane Switching). Суть ее в следующем. Оба электрода, создающих управляющее электрическое поле, размещаются не спереди и сзади ячейки, а только сзади – на тыльной подложке, справа и слева от ячейки (рис.6).

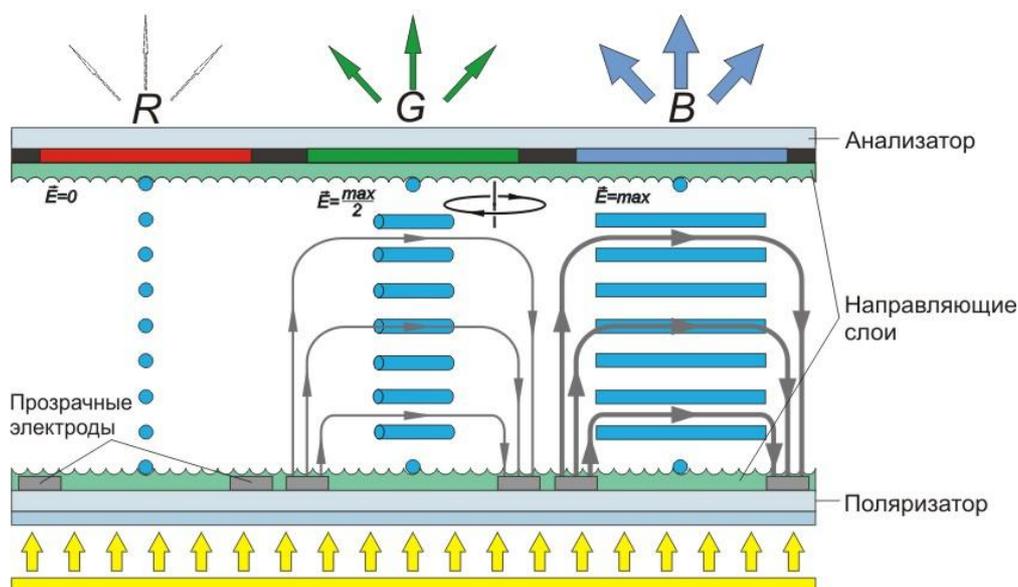


Рис.6 Устройство ячейки IPS

Направляющие слои сформированы таким образом, чтобы все жидкие кристаллы имели одну и ту же ориентацию в пространстве. То есть, в отличие от матриц типа TN, жидкие кристаллы уже не имеют скрученной структуры. При изменении напряжения на электродах все кристаллы одновременно поворачиваются, соответственно меняется угол между плоскостью поляризации анализатора и плоскостью поляризации света, что приводит к изменению интенсивности проходящего излучения. Горизонтальное выстраивание кристаллов приводит к расширению угла обзора, так как при этом боковое рассеяние света больше, чем в случае, когда кристаллы расположены в виде скрученной структуры. Кроме того, диаграмма направленности излучения ячеек не зависит от их яркости, так как кристаллы при любом значении напряженности поля параллельны экрану. При увеличении угла обзора точка темнеет, но не меняет цветового тона.

Матрицы IPS имеют по сравнению с TN более высокий контраст, так как в закрытом состоянии ячейки пропускают меньше света. Недосток – инерционность (время отклика) этих матриц такая же, как и у матриц TN.

Другой способ увеличения угла обзора – многодоменное вертикальное выстраивание (**MVA** – Multi-Domain Vertical Alignment) предложила в 1996 г. компания Fujitsu. В матрицах MVA, в отличие от матриц TN и IPS, используются «негативные» жидкие кристаллы (Negative Liquid Crystal), молекулы которых разворачиваются более длинной стороной не вдоль линий электрического поля, а поперек (рис.7).

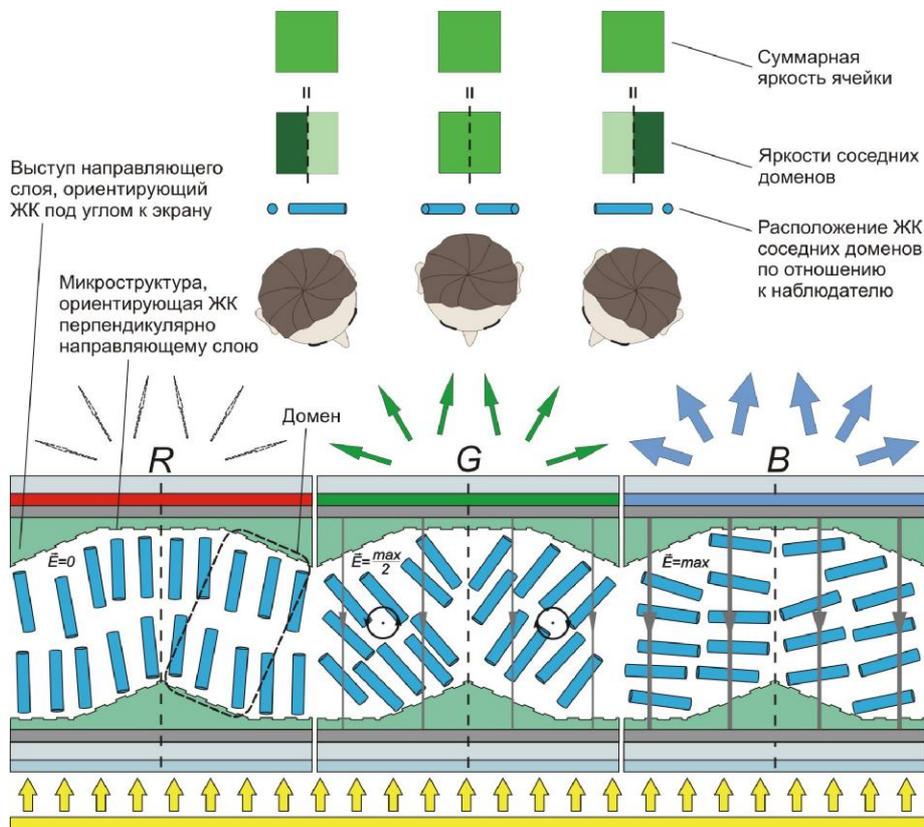


Рис. 7. Устройство ячейки MVA

Жидкие кристаллы каждого из субпикселей ограничены специальными направляющими слоями. Поверхность каждого из слоев похожа на стиральную доску – она образована длинными вытянутыми треугольными выступами («хребтами»). Направляющие слои расположены так, что их выступы параллельны, но расположены не напротив друг друга, а чередуясь (в шахматном порядке). Таким образом, в субпикселе получают домены - области, в которых стенки направляющих слоев параллельны. Благодаря специальной микроструктуре направляющих слоев, при отсутствии электрического поля жидкие кристаллы выстраиваются перпендикулярно стенкам доменов. Но из-за треугольных выступов стенки доменов не параллельны плоскости экрана. Поэтому получается, что жидкие кристаллы не перпендикулярны поверхности экрана; в одних доменах они немного повернуты по часовой стрелке, а в других доменах – против часовой стрелки. Именно это заставляет кристаллы каждого из доменов поворачиваться в нужную сторону при появлении электрического поля. Таким образом, получается, что каждый субпиксель состоит из доменов двух видов, в одних доменах кристаллы разворачиваются, например, по часовой стрелке, а в других – против. Если смотреть на экран под прямым углом, то яркости доменов одинаковы, так как одинаковы углы наклона всех жидких кристаллов относительно направления взгляда. Если же смотреть на экран сбоку, то получается, что жидкие кристаллы одних доменов почти параллельны направлению взгляда, а ЖК других доменов – почти перпендикулярны. В первом случае изменении поляризации света почти не происходит, свет задерживается анализатором и домен кажется темным. Во втором случае наоборот, кристаллы изменяют поляризацию света, и ячейка кажется яркой. Так как размеры доменов очень малы, человек не различает разноярких областей в пределах одного субпикселя. Темный домен компенсируется

более ярким, и даже при значительных углах зрения суммарная яркость ячейки остается постоянной. Однако при наличии только двух доменов угол обзора увеличится только в одной плоскости. Для устранения этого недостатка субпиксель разбивается на две половинки, в каждой из которых направляющие треугольные выступы перпендикулярны друг другу (рис.8).

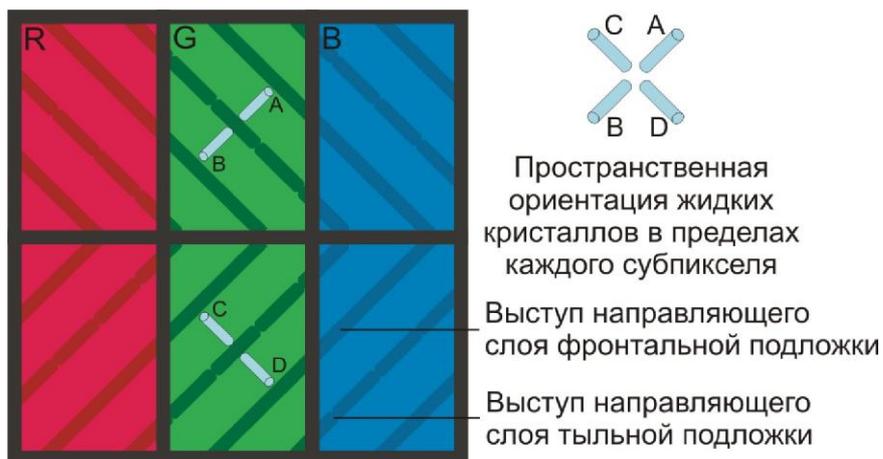


Рис. 8. Взаимное расположение доменов

В итоге получается субпиксель, состоящий из доменов четырех типов.

Принцип многодоменного выстраивания жидких кристаллов используется также в матрицах **PVA** (Patterned Vertical Alignment) фирмы Samsung. Для разворота кристаллов в разные стороны используются специальные электроды, расположенные на внутренних поверхностях подложек в шахматном порядке (рис.9).

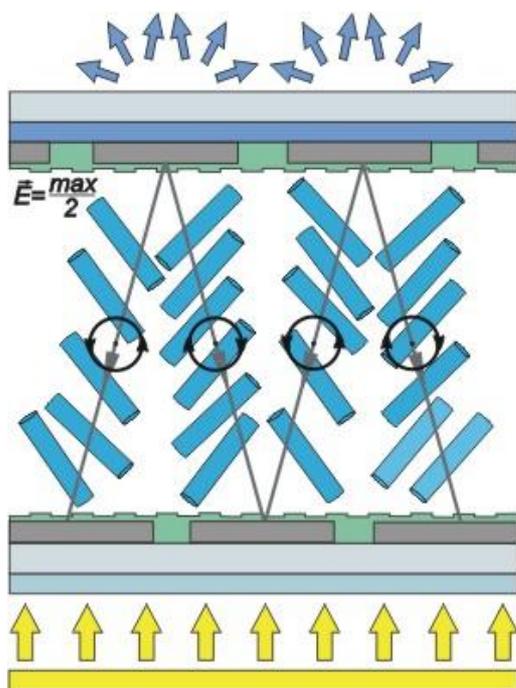


Рис. 9. Устройство ячейки PVA

Благодаря такому расположению линии электрического поля пронизывают объем ячейки не перпендикулярно поверхности экрана, а под углом, причем в двух разных направлениях. Поэтому одни жидкие кристаллы закручиваются, например, по часовой стрелке, а другие – против. Углы обзора матриц MVA и PVA больше, чем у IPS. Кроме того, при увеличении угла обзора яркость трех субпикселей, составляющих пиксель, уменьшается одинаково, то есть пиксель темнеет, но не меняет цветового тона, как это происходит в матрицах TN. То есть при увеличении угла обзора цветопередача этих матриц лучше, чем у матриц типа TN. Матрицы MVA и PVA обладают меньшей инерционностью (меньшим временем отклика), чем матрицы IPS, а потому лучше отображают движущиеся объекты, то есть больше подходят для просмотра видеофильмов и игр. В закрытом состоянии ячейки этих типов матриц пропускают примерно столько же света, сколько и ячейки IPS, зато в открытом состоянии – больше. Поэтому и контраст изображения, формируемый этими типами матриц, выше.

Ниже приведена таблица, в которой указываются основные параметры наиболее распространенных матриц.

Тип матрицы	Угол обзора по вертикали и горизонтали (по спаду яркости в десять раз)	Искажение цветопередачи при увеличении угла обзора	Время отклика (инерционность)	Контраст изображения
TN	70°, 120°	есть	16...22 мс	250:1-300:1
IPS	140°, 140°	нет	16...25 мс	300:1-400:1
MVA, PVA	160°, 160°	нет	12...16 мс	400:1-500:1

Конкуренция фирм, производящих ЖК-панели, стимулирует развитие этих устройств. Совершенствование технологий порождает целые семейства. Например, на основе матриц TN появились матрицы STN (Super Twisted Nematic), где используются жидкие кристаллы закрученные не на 90°, а на 270°, что позволяет получить более высокий контраст. На основе STN, в свою очередь, появились матрицы DSTN (Double STN), где используются две ячейки STN, следующие друг за другом. Затем появились ячейки с компенсирующей пленкой, которые стали называться TSTN (Triple STN) или FCSTN (Film Compensated STN). На основе IPS-матриц также было создано несколько разновидностей: SIPS (Super IPS), SFT (Super Fine TFT), ASFT (Advanced SFT), SASFT (Super ASFT), DDIPS (Dual Domain IPS). Используя основные принципы, по которым работают существующие типы матриц, создают новые устройства. Например, на основе MVA-матриц, фирма Sharp разработала матрицы ASV (Advanced Super View) и ASM (Axially Symmetric aligned micro-cell Mode). В ASV-матрице жидкие кристаллы поворачиваются не в четырех, как у MVA, а во всех возможных направлениях, что увеличивает угол обзора. А в ASM того же эффекта добиваются необычным аксиально-симметричным (наподобие лопастей вентилятора) расположением жидких кристаллов. Кроме того, фирмы-разработчики стараются внедрить собственные дополнения для уже существующих типов матриц. В основном эти дополнения представляют собой технологии увеличения полезной площади ячеек и создания пленок, улучшающих цветопередачу или увеличивающих угол обзора.

В последнее время у жидкокристаллических мониторов появился серьезный конкурент – технология производства отображающих устройств на основе органических светодиодов (OLED). Наряду с другими факторами, это также должно стимулировать разработчиков ЖК-мониторов интенсифицировать свою деятельность по их развитию и усовершенствованию. Поэтому можно надеяться, что уже в недалеком будущем ЖК-мониторы станут лучше и дешевле.