

УДК 621.3.049.77.001.2.372.002

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ПО LCOS-ТЕХНОЛОГИИ

А.Г. СМИРНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 9 января 2003*

В статье представлены результаты исследования активно-матричных жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС), изготовленных с использованием LCOS-технологии. Подобные устройства выгодно отличаются улучшенными электрооптическими параметрами и характеристиками, повышенной надежностью и приемлемой стоимостью и широко применяются в современных видеопроекционных системах, а также в сверхскоростных системах обработки оптической информации различного назначения.

*Ключевые слова:* модулятор света, жидкокристаллический, пространственно-временной, активно-матричный.

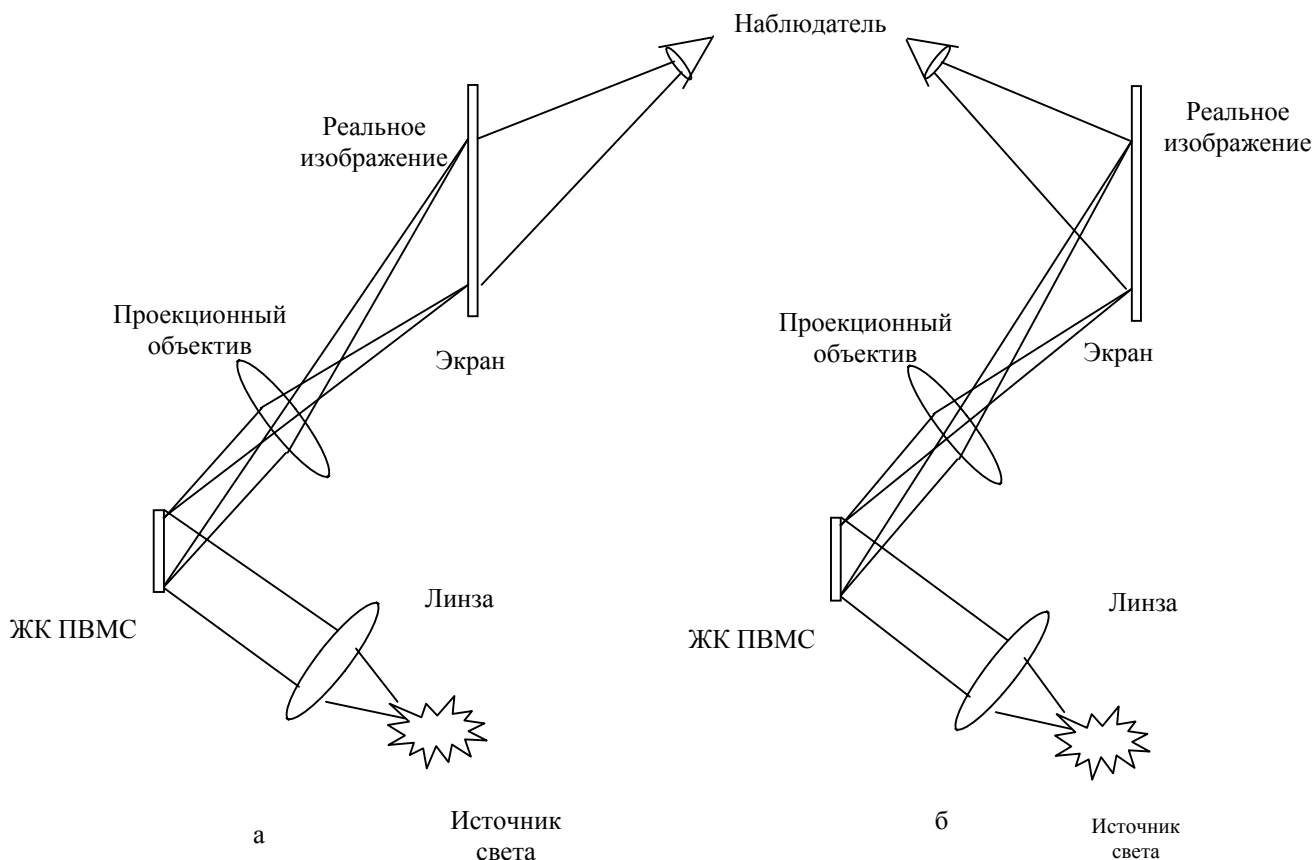
### Введение

В 1990 г. нами был впервые предложен вариант использования LCOS-технологии (Liquid Crystal on Silicon, или "ЖК-на-монокремнии") в электрически адресуемых активно-матричных пространственно-временных модуляторах света [1], а спустя год аналогичный подход использовали разработчики фирмы Hughes (США), предложив применить для адресации слоя жидкого кристалла (ЖК) активную матрицу МОП-транзисторов на кремниевой подложке [2].

В зависимости от архитектуры построения устройств и систем на основе жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) и областей их применения можно выделить две большие группы, а именно **видеопроекционные устройства и системы группового типа**, в которых изображение с ЖК ПВМС переносится на экран больших размеров и считывается наблюдателем или группой наблюдателей с достаточного расстояния, желательного большего, чем 5-кратная высота экрана (рис. 1,а). В **виртуальных устройствах и системах персонального типа** изображение увеличивается оптической системой и проецируется непосредственно на сетчатку глаза наблюдателя. Изображение, формируемое во втором случае, находится от глаза дальше, чем сам объект ("виртуальное" изображение), и отличается от "реального", наблюдаемого на экране монитора (рис.1,б).

По способу адресации элементов отображения (пикселей) различают пассивно-матричные и активно-матричные ЖК ПВМС. В первом случае реализуется мультиплексное управление (импульсный режим с разделением во времени), во втором - последовательно с каждым элементом отображения формируется двух- или трехэлектродный элемент (чаще всего диод или транзистор), выполняющий функции электронного ключа и обеспечивающий независимую аналоговую или цифровую адресацию каждого элемента отображения.

Градации серой шкалы (или полутонов) в ПВМС на основе нематических ЖК обеспечиваются прямой модуляцией управляющего напряжения, так как нематический ЖК-материал обладает пропорциональной и воспроизводимой вольт-контрастной характеристикой.



LCOS-технология позволяет создавать светомодулирующие устройства отражательного типа, содержащие интегрированные на кремниевом кристалле активно-матричные структуры и микросхемы адресации строк и столбцов [3-6].

Рис. 1. Архитектура ЖК ПВМС для видеопроекционных (а) и виртуальных систем (б)

### Конструктивно-технологические варианты ЖК ПВМС

Разработка конструктивно-технологических вариантов ЖК ПВМС отражательного типа была проведена в рамках республиканской ГНТП 27.04р "ЖК-устройства", ГБЦ 00-3034 и совместных работ с датским исследовательским центром RISO в рамках европейской программы "Esprit" [7,8].

Нами были проанализированы три основных варианта конструктивного исполнения ЖК ПВМС с разрешением  $320 \times 288$  элементов отображения с точки зрения таких показателей, как длительность и стоимость технологического процесса, общее количество сварных и паяных соединений и перспективы комплексной микроминиатюризации. Первый вариант аналогичен традиционному методу изготовления ЖК ПВМС, когда используются практически три независимых процесса: а) изготовление активной матрицы (АМ); б) изготовление печатной платы с корпусными микросхемами управления; в) сборка ЖК ПВМС. Основным недостатком такого варианта — большое количество соединений и, следовательно, высокая стоимость и низкая надежность всего устройства. Общее число сварных или паяных соединений определяется как  $N = N_{стр} + N_{стб} + 100n$ , где  $N_{стр}$  и  $N_{стб}$  — количество строк и столбцов активной матрицы,  $n$  — количество 100-выводных микросхем управления типа КР1835ВГ12, 13. Нетрудно подсчитать, что общее число соединений для ЖК ПВМС с разрешением  $320 \times 288$  составит 1408.

Второй вариант исключает процесс изготовления печатных плат и предполагает формирование коммутационно-управляющей системы на кремниевой подложке в едином технологическом цикле с процессом формирования активной матрицы. При этом кристаллы микросхем управления развариваются на контактные площадки, связанные металлизацией со строками и столбцами активной матрицы. В этом случае число межсоединений уменьшается до 800, повышается надежность устройства при одновременном снижении его стоимости.

И, наконец, третий вариант предполагает полную интеграцию активной матрицы с КМОП БИС управления, снижение количества сварных соединений практически до нуля, обеспечение максимальной степени микроминиатюризации и надежности при минимальной стоимости устройства. Однако его применение в условиях НПО "Интеграл" в настоящее время не представляется возможным из-за больших финансовых затрат на отработку технологии и повышение выхода годных как самих кристаллов микросхем управления, так и активно-матричных структур. Поэтому в качестве основного нами был выбран второй вариант, позволяющий решить поставленную задачу с минимальными затратами средств.

Активную матрицу (АМ) из 320×288 р-канальных МОП-транзисторов с поликремниевым затвором и самосовмещенной структурой формировали на 100-миллиметровой кремниевой пластине *n*-типа с применением проекционной литографии при пошаговом мультиплицировании ее фрагментов [9]. Для уменьшения поверхностных токов утечки и исключения инверсии поверхности полупроводника при рабочих напряжениях использовали подлегирование подложки (*n*<sup>+</sup>-слой). В качестве одной из обкладок конденсатора использовали *n*<sup>+</sup>-слой. Слои SiO<sub>x</sub> разной толщины служили в качестве межкомпонентной изоляции диэлектрического слоя конденсаторов и затворного диэлектрика МОП-транзисторов. Двухуровневая алюминиевая металлизация, формируемая контактной фотолитографией, обеспечивала коммутацию элементов АМ с микросхемами управления, а также формирование нижнего отражательного электрода ЖК-ячеек. Интеграция микросхем управления с АМ позволило уменьшить число внешних выводов с 608 до 19, снизить стоимость устройства и резко повысить его надежность. Прозрачный токопроводящий общий электрод из ИТО формировали на внутренней стороне стеклянной пластины, которую располагали с требуемым зазором, задаваемым спейсерами.

Общий вид и конструкция разработанного ЖК ПВМС в разрезе представлены на рис. 2.

Каждая элементарная ЖК-ячейка состоит из набора одинаковых элементов, имеющих следующие размеры в микрометрах: элементы отображения — 90×90, канал МОП-транзистора — 10×15, области стока и истока МОП-транзистора — 15×15, ширина алюминиевой столбцовой шины — 10, ширина поликремниевой шины строки — 10, контакт — 1 к областям сток-исток и поликремниевым обкладкам конденсаторов — 5×5, расстояние от края контакта до края диффузионной области — 4, контакт — 2 к обкладкам конденсатора — 10×10, размер конденсатора — 85×85. Следует отметить, что топологические размеры не являются критическими как для проекционной литографии, так и для контактной. Однако применение проекционной литографии для формирования активно-матричной структуры целесообразно, прежде всего, для снижения уровня ее дефектности, обеспечения требуемого выхода годных и получения работоспособного устройства.

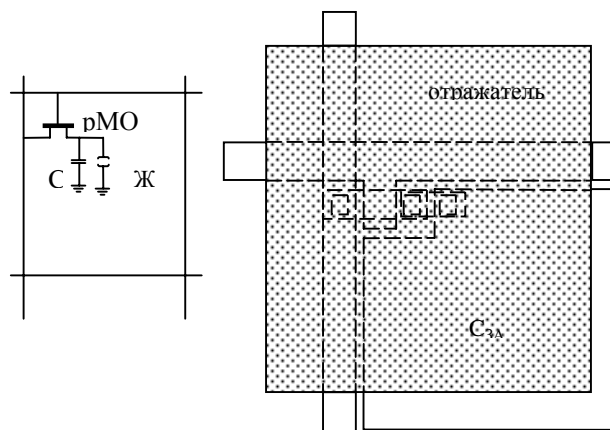




Рис. 2. Общий вид и конструкция ЖК ПВМС с разрешением 320×288 элементов отображения

В процессе разработки данного ЖК ПВМС были решены три основных задачи: 1) найдены и исследованы электрооптические эффекты и соответствующие ЖК материалы, обеспечивающие эффективную работу в отражательном режиме; 2) отработаны технологические варианты планаризации поверхности отражателей; 3) найдены и исследованы методы создания прецизионного и контролируемого зазора, а также сборки ЖК ПВМС.

### Техпроцесс изготовления ЖК ПВМС

Разработанный техпроцесс ДРО 734943 МК, включающий 114 технологических операций, базируется на хорошо отработанных на НПО "Интеграл" (СКБ "Немига", завод ФО-ТЕК) технологических процессах изготовления КМОП ИС и ЖКД. Единственное отличие заключалось в том, что впервые нами использовались одновременно два типа фотолитографии (проекторная и контактная), поэтому соответствующее фотолитографическое оборудование требовало состыковки для обеспечения совмещаемости слоев, для чего был разработан специальный фотошаблон с метками совмещения, расположенных с шагом, кратным шагу мультиплицирования (в нашем случае 10×10 мм).

Для снижения паразитных емкостей, обусловленных перекрытием сток-истоковых областей, выбрана технология с самосовмещенным затвором, при которой затвор формируется до операции создания сток-истоковых областей. При этом уменьшается вероятность брака из-за неперекрывания затвором сток-истоковых областей. При этом особое внимание уделяли обработке технологических операций травления слоев металла и поликремния в местах «сшивания» мультиплицируемых фрагментов, а также в местах "сшивания" поликремниевых и металлизированных шин на участках, полученных проекционной и контактной фотолитографией.

При контроле дефектности слоев следует учитывать специфику дефектов для полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Для полупроводниковых слоев характерны: а) дефекты, приводящие к браку по токам утечки и пробивным напряжениям; б) закоротки между проводящими участками, находящимися под разным потенциалом; в) обрывы проводящих участков. Специфика дефектов в диэлектрических слоях связана с а) неполным вскрытием контактных окон и отсутствием по этой причине омического контакта; б) неоднородностью слоев по толщине, наличием сквозных и несквозных пор и отверстий, вызывающих снижение пробивных напряжений или короткое замыкание между двумя проводящими слоями. Для металлических слоев характерны обрывы токопроводящих шин и закоротки между шинами.

### Контроль электрооптических параметров ЖК ПВМС

ЖК ПВМС как объект управления представляет собой динамическую память (DRAM) емкостью  $320 \times 288$  элементов с микросхемами адресации типа КБ1835 ВГ12 и КБ1835ВГ13.

Для управления ЖК ПВМС нами разработан и изготовлен блок управления на базе ПК класса notebook с управляющей программой test.exe, которая формирует следующие управляющие логические сигналы: CWR — строб данных, WR — строб строки, COSL — полярность управляющих напряжений, SRH — сброс, D0–D3 — данные [10].

Входные временные диаграммы управления приведены на рис. 3 при  $t_{cwr} < 500$  ns,  $t_{wr} < 50$   $\mu$ s,  $t_{srh} < 14,8$  ms. При четном кадре изображения на затвор подается  $-15$  В, на исток  $-10$  В, на сток  $+5$  В. При нечетном - соответственно  $15$  В,  $-20$  В,  $+5$  В.

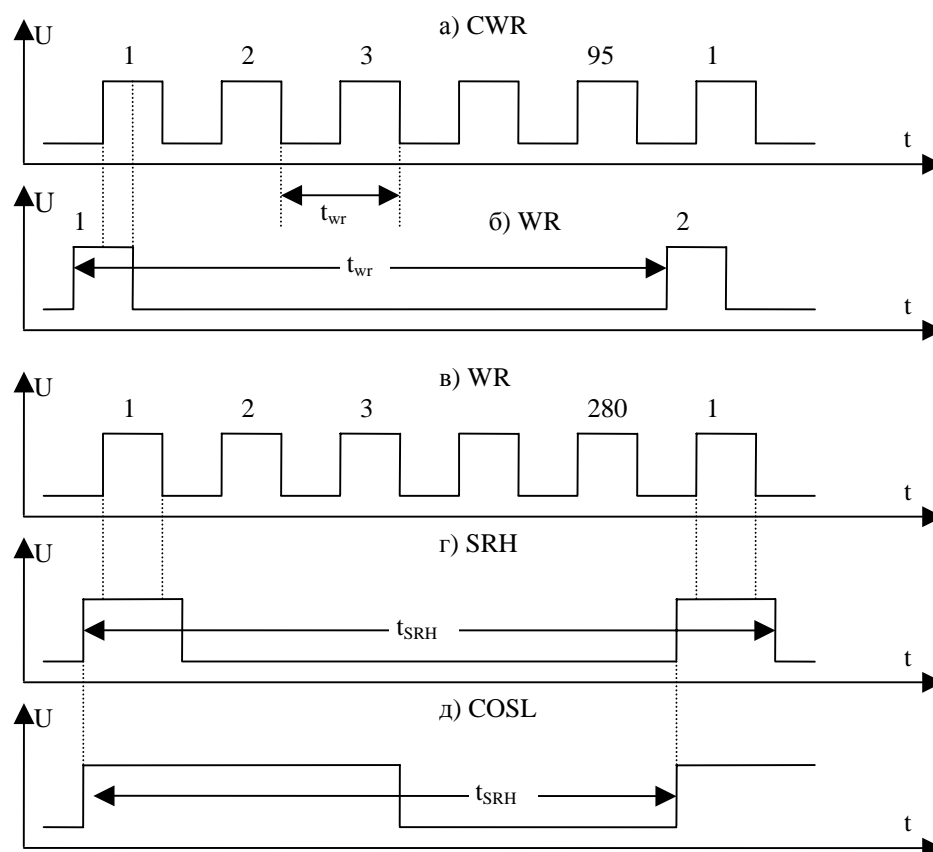


Рис. 3. Временные диаграммы управления ЖК ПВМС

### Бесполяроидные ЖК ПВМС

Кардинальным способом улучшения эксплуатационных свойств ЖК ПВМС является использование бесполяроидных электрооптических эффектов в ПВМС отражательного, а не прожекторного типа на основе капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПЖК, PDLC), впервые описанных в 1986 г. КПЖК-ячейка под действием электрического поля переходит из состояния рассеивания (черная точка на экране при использовании специальной проекционной оптики) в состояние пропускания (белая точка на экране). При правильно подобранной оптике контрастное отношение между обоими состояниями может быть очень большим.

Легко заметить, что при использовании капсулированных ЖК-материалов реализуются следующие преимущества: 1) отсутствуют поляроидные пленки, поглощающие основную долю модулируемого излучения; 2) отсутствуют ориентирующие слои для ориентации ЖК; 3) числовая апертура модулятора может достигать 90 и выше процентов; 4) стоимость одного кристалла мо-

жет быть невелика; 5) обеспечивается полная интеграция на кристалле активной матрицы с микросхемами адресации строк и столбцов; 6) резко снижаются требования к источнику света; 7) используются оптические элементы значительно меньшего диаметра, следовательно, более дешевые.

Нами использовался низковольтный КПНЖК с 1,5–2 микронными включениями ЖК-материала типа 1289, разработанный в Институте физики НАН Украины (г. Киев) на основе многокомпонентной композиции органических соединений, включающей уретаносодержащие олигомеры и олигоэфиракрилаты (соотношение 1:1 по объему), бутилметакрилат и фотоинициаторные добавки [11, 12]. Указанный материал получали методом разделения фаз при фотополимеризации смеси при интенсивности УФ-облучения 0,4 мВт/см<sup>2</sup>. Электрооптические свойства КПНЖК определяются структурой распределения, размером и плотностью ЖК-капель и обеспечиваются точным поддержанием оптимальных величин исходного содержания ЖК в смеси (67% по объему), отношения мономер-олигомер в предполимерной матрице, интенсивности и длительности УФ-облучения, а также температуры процесса. Материал, полученный в оптимальных условиях, обладает сильным рассеиванием в состоянии "выключено" и хорошим пропусканием в состоянии "включено" (более 75%), обеспечивая контрастное отношение между обоими состояниями на уровне 100:1 и выше /5.28, 5.29/. При этом были достигнуты пороговые напряжения 3,3 В на уровне 10% и 9,1 В — на уровне 90% при гистерезисе в пределах 0–2,4% и временах включения 18 мс ( $U_{10\%} \rightarrow U_{90\%}$ ) и выключения 30 мс ( $U_{100\%} \rightarrow U_{10\%}$ ). Указанные параметры позволяют обеспечить отображение телевизионной информации.

Оба описанных выше варианта активно-матричных ЖК ПВМС с разрешением 320×288 использовались при создании видеопроекторных систем различного назначения, которые описаны в работах [13–15].

### **Активно-матричный ЖК ПВМС для когерентного коррелятора изображений**

Активно-матричный ЖК ПВМС для когерентного коррелятора изображений разработан нами совместно с Физическим институтом им. Лебедева (г. Москва), ЦНИИ "Комета" (г. Москва) и датским национальным исследовательским центром RISO (г. Роскилде) в рамках европейской программы "ESPRIT". Такое устройство является ключевым элементом современных устройств и систем обработки оптической информации и оптических компьютеров, обеспечивая в реальном масштабе времени электронную запись, оптическое считывание и сравнение двух изображений по корреляционной функции их фурье-образов.

ЖК ПВМС содержит две планаризованные матрицы рМОП-транзисторов с поликремниевым затвором и самосовмещенной структурой, сформированных в подложке из монокремния диаметром 100 мм [16, 17]. Поскольку сами транзисторы, конденсаторы, а также шины столбцов и строк расположены под алюминиевыми электродами, и не занимают полезной "отражающей" площади, то числовая апертура ПВМС очень высока и в нашем случае приближается к 86 %. Параметры разработанного ЖК ПВМС: разрешение — 2×480×480, размер зоны отображения — 2×26,4×26,4 мм, шаг элементов отображения — 55×55 мкм, размер алюминиевого отражателя — 51×51 мкм, канал МОП-транзисторов — 9×6 мкм, ширина столбцовой шины — 12 мкм, ширина поликремниевой шины строки — 12 мкм, емкость запоминающего конденсатора — 0,18 пФ, пороговые напряжения МОП-транзисторов — 1,4–2 В, пробивные напряжения — >25 В, токи утечки — <0,1 нА.

Транзистор в каждой ЖК-ячейке действует как электрически переключаемый ключ, допуская зарядку емкости  $C_{\text{зап}}$  в состоянии "включено" и изолируя ее в состоянии "выключено". Изменение оптических характеристик твист-нематических ЖК-ячеек обеспечивает формирование и оптическое считывание изображения при его освещении внешним лазерным источником с длиной волны 0,63 мкм. Так как ЖК ПВМС работает в когерентном свете, то особое внимание было уделено обеспечению максимальной плоскостности отражателей за счет введения дополнительных технологических операций по планаризации рельефа АМ перед осаждением алюминия; использования специальной топологии со "сглаженным" рельефом в области отражения; использования специальных электрооптических эффектов и ЖК-материалов, компенсирующих неплоскостность в небольших пределах.

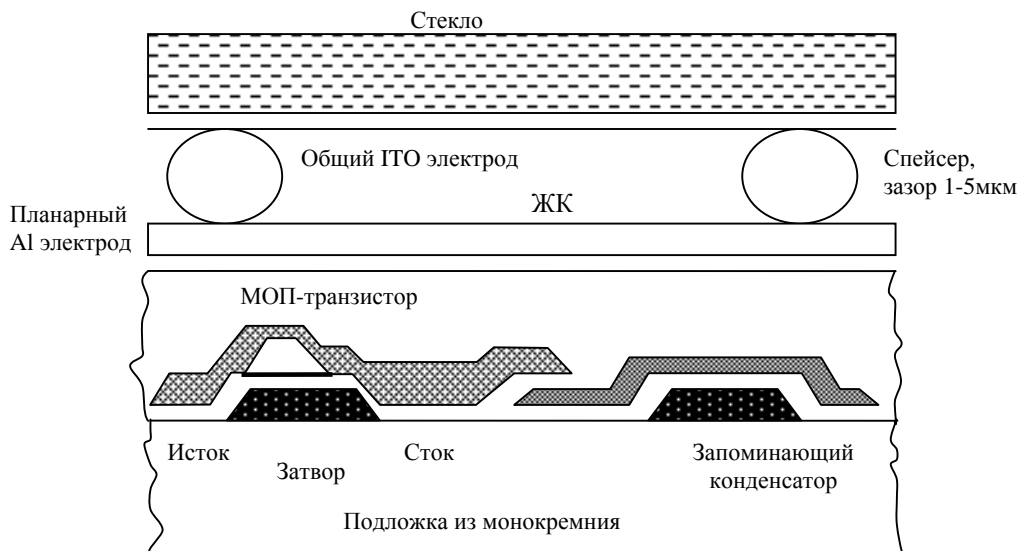


Рис. 4. Внешний вид, электрическая схема и поперечный разрез ячейки ЖК ПВМС

После скрайбирования кремниевая подложка с активной матрицей МОП-транзисторов приклеивается к 10-миллиметровому высокоплоскостному стеклянному основанию при контролируемом внешнем давлении, равномерно распределенном по его поверхности. В качестве верхнего основания использовали 10-миллиметровое стекло типа ВК-7, обработанное по классу 14 и покрытое с внешней стороны антиотражающим покрытием ( $\lambda=0,63 \mu\text{m}$ ), а с внутренней — токопроводящим слоем ITO (93%  $\text{InOx}+7\% \text{SnOx}$ ,  $\rho < 100 \text{ Ом}/\square$ ). Собранный таким образом ЖК ПВМС герметизировали и заполняли в вакууме жидким кристаллом типа НИОПиК 910 с ультранизким значением  $\Delta\epsilon \sim 0,06$ , которое позволяло увеличить зазор до  $10 \mu\text{m}$  и тем самым компенсировать оставшуюся после планаризации неплоскостность.

Измерения электрооптических характеристик экспериментальных образцов ЖК ПВМС показали их способность работать в телевизионном режиме, обеспечивая 16 уровней серой шкалы при контрасте не ниже 100:1.

## Заклучение

Нами впервые разработаны и исследованы три конструктивно-технологических варианта активно-матричных ЖК ПВМС, изготовленных с использованием LCOS-технологии. Показано, что подобные устройства характеризуются улучшенными электрооптическими и эксплуатационными параметрами и характеристиками, повышенной надежностью и приемлемой стоимостью и могут быть использованы в современных видеопроекционных системах, в том числе телевизионного типа, а также в скоростных системах обработки оптической информации различного назначения.

## LIQUID CRYSTAL SPATIAL LIGHT MODULATOR FABRICATED ON LCOS-TECHNOLOGY

A.G. SMIRNOV

### Abstract

Results of investigation of active-matrix liquid crystal spatial light modulators fabricated on LCOS-technology are presented. Such devices can provide the improved electrooptical and operational parameters and characteristics, high stability and moderate cost and are widely used in modern videoprojection systems as well as in fast optical processing systems of different applications.

### Литература

1. Смирнов А.Г., Беляев С.В. // Оптико-механическая промышленность. 1990. № 5. С. 38–41.
2. Sielid S.E. et al. // LC application and uses. 1991. Vol. 1. P. 437/
3. Smirnov A. LC-on-Silicon technology: present status and future. Abstr. 13th LC-Conference, September, 1999, Krinica, Poland.
4. Smirnov A. et al., LC microdisplays: present status and future, Mat. 9th SID Symposium on Advanced Display Technologies, October, 2000, Moscow, Russia.
5. Смирнов А.Г. и др. // Электронные компоненты. 2001. № 2. С. 6–14.
6. Смирнов А.Г. и др. // Электронные компоненты. 2001. № 3. С. 2–8.
7. Разработать и исследовать ЖК-светомодулирующие устройства сверхвысокого разрешения на основе матричных структур МДП-транзисторов для систем обработки и отображения информации. Отчет о НИР. Мн., 1995.
8. Микроминиатюрный ЖК-дисплей с активно-матричным управлением для проекционных устройств. Отчет о НИР. Мн., 2001.
9. Drobysch P., Smirnov A. 320×288 nondefectness matrixes of pMOS-transistors on Si-single-crystal substrate for reflection-mode LC-projectors, October, 1992. Zakopane, Poland, 1992. P. 111.
10. Moiseeva O., Smirnov A., Shirokanov Yu., Sergan V. Electrooptics of reflective AM PDLC-module, Abstr. 3th int. Seminar "Optics of Liquid Crystals", October, 1993. Balaton, Hungary, 1993. P. 97.
11. Smirnov A., Nazarenko V., Drobysch P., Gurin Ya. Active matrix PDLC-light valve with integ-rated drivers for projection application, Asia Display-95 Proc., October, 1995. Hamamatsu, Japan, 1995. P. 867–869.
12. Nazarenko V., Sergan V., Smirnov A., Drobysch P. Reflective AM PDLC-panel for projection TV, Abstr. 15th European Conf. on LC's Science and Technology, March, 1993. Flims, Switherland, 1993. P. 99.
13. Sadchikhin A., Trufanov A., Belayev S. et al. AM LCLV projector with cholesteric mirrors as color separation elements, IDRC-97 Proc., Toronto, Canada, 1997. P. 227.
14. Sadchikhin A., Trufanov A., Belayev S. et al. Full color projector with LC/photoconductor light valves and cholesteric mirrors, Aerosense-97 Proc., Florida, USA, 1997. P. 17
15. Smirnov A., Belayev S., Grusevich Yu. et al. LC-projector with improved optical efficiency, Conf. Record 12th Int.Display Res.Conf., Hiroshima, Japan, 1992. P. 889–890.
16. Smirnov A., Drobysch P., Jensen A. et al. Active matrix liquid crystal reflective double-SLM for a joint transform correlator, 14th IDRC Conf.Record, October, 1994. Monterey, USA, 1994. P. 257–258/
17. Smirnov A. AM LC reflective double-SLM, Abstr. Int. ADT School, August, 1994. Lviv, Ukraine, 1994. P. 29–30.