

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.397.46

СОВРЕМЕННЫЕ ДИСПЛЕИ: ПЕРСПЕКТИВЫ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

В.А. ЛАБУНОВ, П.В. ЖАГИРО, П.С. КАЦУБА, А.Г. СМИРНОВ.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 29 апреля 2008*

В статье рассмотрено: положение микродисплеев в общей дисплейной классификации и на рынке устройств отображения информации. Основное внимание уделено физическим и технологическим ограничениям на уменьшение элементов изображения для жидкокристаллических, плазменных, светодиодных и микромеханических дисплеев.

Ключевые слова: микродисплей, пиксель, жидкие кристаллы, плазменные панели.

Введение

Дисплей, согласно формальному определению, - это устройство, отображающее изменяющуюся графическую информацию. В современном мире основной поток информации человек получает через электронные средства коммуникации, и именно дисплеи являются одним из главных связующих звеньев между ними и человеком.

Далее проводится обзор различных видов дисплеев, рассматриваются существующие физические и технологические ограничения, оценивается потенциал предельно достижимых параметров и характеристик. Основное внимание уделяется микродисплеям, их месту в ряду существующих дисплеев, уже применяемым и еще только разрабатываемым конструкциям, технологиям и приложениям.

Классификация дисплеев

Ежегодно в мире производятся миллиарды дисплеев. Они подразделяются на множество типов, видов и подвидов, связанных с особенностями их конструкций и технологий. Однако, наиболее очевидно их различие по размеру. Классификацию, впрочем, корректнее проводить не по размеру дисплея, а по связанному с ним и назначением дисплея параметру, называемому дистанцией наблюдения (D). Если рассматривать крупноформатный дисплей слишком близко, то вместо изображения будут видны отдельные пиксели, а если ноутбук поставить в другом конце комнаты, то работать на нем с текстовыми документами будет проблематично. Оптимальная дистанция наблюдения - это расстояние, с которого человек видит на дисплее четкое, но не дискретное изображение, для полноценного просмотра которого ему не надо напрягать зрение или вращать головой (комфортным считается движение глаза в пределах 24° по вертикали и горизонтали, т.е. 34° по диагонали). Оптимальная дистанция наблюдения связана с особенностями человеческого зрения: человеческий глаз перестает различать отдельные точки изображения, которые расположены на расстоянии меньше угловой минуты. Если дистанция наблюдения больше оптимальной, то пиксели сливаются, но изображение размывается и ин-

формационная способность дисплея падает, а если дистанция наблюдения меньше оптимальной, то становится видна дискретная пиксельная структура.

Соответственно, для нормальной остроты зрения, дистанция наблюдения выражается формулой

$$D = 3500 \cdot A,$$

где A – линейный размер пикселя.

На рис. 1 представлены известные к началу 2008 г. дисплеи с наименьшей и наибольшей дистанцией наблюдения соответственно. Это нанесенная на контактную линзу матрица светодиодов [1] и попиксельно обновляемый рекламный щит вблизи от аэропорта Хитроу [2].



Увеличение дистанции наблюдения

Рис. 1. Дисплей, встроенный в контактную линзу (слева) и вид на ландшафтный дисплей с высоты птичьего полета (справа)

На рис. 2 и в табл. 1 представлены примеры и классификация дисплейных устройств по оптимальной дистанции наблюдения, соответствующей ей площади пикселя, и качеству изображения (разрешения в Мегапикселях).

В зависимости от оптимальной дистанции наблюдения дисплеи подразделяются на:

Ландшафтные/Landscape (дальность наблюдения соизмерима с дальностью горизонта) Ландшафтные дисплеи могут быть видны сразу десяткам тысяч людей. Такие дисплеи применяются на многотысячных концертах, гигантских футбольных аренах и ипподромах. Ранее уже упоминался дисплей вблизи аэропорта Хитроу, который виден только с летящего самолета.

Архитектурные/Architectural (дальность наблюдения десятки метров, соизмерима с размерами зданий). К архитектурным дисплеям относятся дисплеи большой площади, которые соизмеримы с размерами зданий, дорог и прочих архитектурных объектов. К ним можно отнести рекламные щиты, информационные табло, гигантские телеэкраны, устанавливаемые на улицах и концертных площадках.

Комнатные/Indoor (дальность наблюдения в диапазоне от соизмеримой с размерами рабочего стола до соизмеримой с размерами комнаты). Самый распространенный вид дисплеев - это всем известные телевизоры (дистанция наблюдения соизмерима с размерами комнаты), мониторы компьютеров, ноутбуки и игровые приставки.

Карманные/Handheld (дальность наблюдения соизмерима с размерами руки, а габариты дисплея соизмеримы с размерами ладони). Это дисплеи сотовых телефонов, цифровых навигаторов, PDA, фотоаппаратов и плееров.

Микродисплеи/Microdisplays (для наблюдения изображения необходима оптика). Активные элементы микродисплеев не предназначены для непосредственного рассмотрения человеческим глазом, и отсутствие этого ограничения приводит к появлению специфических конструкций и технологий. В частности, можно указать на целый класс высокоинформативных дисплеев, которые не содержат матрицы пикселей, а формирование изображения осуществляют разверткой светового луча. Соответственно, микродисплеи можно разделить на два больших

класса – матричные и сканирующие. Дистанция наблюдения в матричных микродисплеях обычно не превышает нескольких сантиметров, а сами они зачастую выглядят как уменьшенные копии «больших дисплеев». У сканирующих микродисплеев дистанция наблюдения равна нулю, так как они используют коллимированные источники света. И матричные, и сканирующие дисплеи могут использоваться как в проекционных системах, так и в индивидуальных системах, формирующих мнимое (виртуальное) изображение. Соответствующие оптические схемы и конструкции будут подробно рассмотрены во второй части обзора.

Таблица 1. Примеры дисплеев различных типов

N	Название	Размер	Площадь пикселя	Разрешение	Примечание
Архитектурные/Architectural					
1	Mitsubishi Electric	11×66 м	250 мм ²	720×4200	установлен на ипподроме в Токио
2	Daktronics	41×15 м	408 мм ²	820×736	установлен на стадионе в Майями
3	К-Системс	8×6 м	625 мм ²	320×240	массовое производство, светодиодный
4	Ad Air	120×160 м	~90000 мм ²	360×480	попиксельно обновляемый рекламный щит, установлен вблизи аэропорта Хитроу
5	LEDer-board® Display Mitsubishi Electric	1.8×2.4 м	100 мм ²	180×240	могут собираться в крупные блоки
Комнатные/Indoor					
6	Samsung LTA570HS	57" diag.	0.42 мм ²	1920×1080	ЖК
7	Samsung LTM300M1	30" diag.	0.063 мм ²	2560×1600	ЖК
8	Samsung LTN190W1	19" diag.	0.059 мм ²	1680×1050	ЖК
Карманные/Handheld					
9	Samsung LTE700WQ	7" diag.	0.04 мм ²	800×480	ЖК
10	Samsung LTP283QV	2.8" diag.	0.032 мм ²	240×320	ЖК
11	Samsung LTS166QA	1.6" diag.	0.04 мм ²	200×160	ЖК
Микродисплей/Microdisplays					
12	Seiko Epson	1.8" diag.	620 мкм ²	1440×1024	ЖК, HTSP-технология
13	Sharp	2.6" diag.	1440 мкм ²	1280×1024	ЖК, LTPS – технология, Continuous Grain Silicon
14	Kopin	1.5" diag.	144 мкм ²	2560×2048	монохромный ЖК, «Silicon-on-Glass» – технология
15	Kopin	0.44" diag.	125 мкм ²	800×600	ЖК, «Silicon-on-Glass» – технология
16	Displaytech – pico	0.75" diag.	361 мкм ²	800×600	FLCOS проектор со светодиодными излучателями для сотовых телефонов
17	Displaytech – pico color	0.19" diag.	144 мкм ²	320×240	FLCOS проектор, Time-Sequence
18	Texas Instruments XGA	0.7" diag.	196 мкм ²	1024×768	Digital Light Processor (DLP)
19	Texas Instruments SXGA	0.9" diag.	196 мкм ²	1280×1024	Digital Light Processor (DLP)

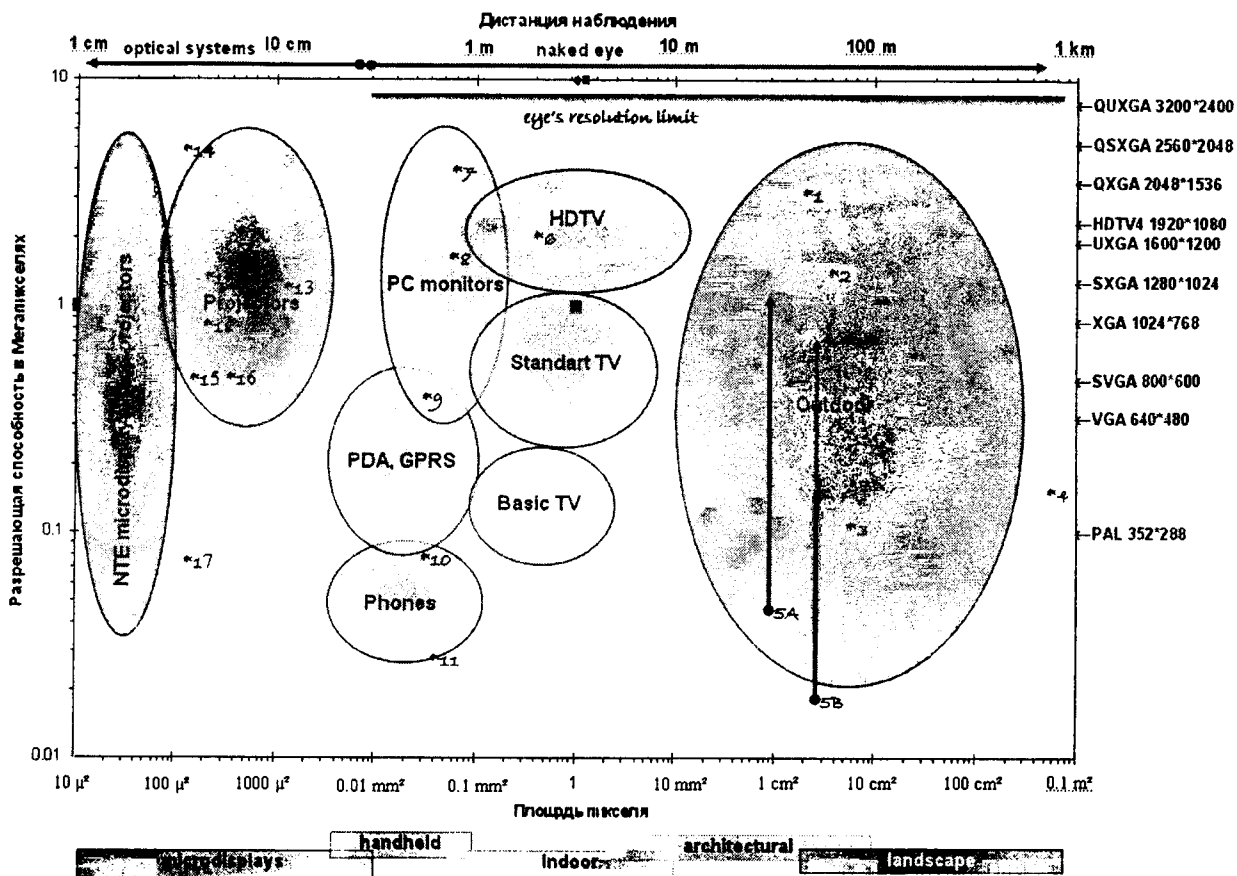


Рис. 2. Классификация дисплейных устройств по оптимальной дистанции наблюдения, соответствующей ей площади пикселя, и качеству изображения

Цена за пиксель и объемы выпуска различных типов дисплеев

На массовые модели дисплеев (комнатные и карманные) цены формируются в результате жесткой конкуренции и поэтому характеризуются сравнительно небольшим разбросом для моделей одного класса. На основании информации компании DisplaySearch, по состоянию на январь 2008 нами были пересчитаны цены за 1 пиксель для массовых моделей дисплеев в зависимости от размера пикселя. Из графика (рис. 3), построенного в полулогарифмическом масштабе, видно, что за исключением провала цен для настольных дисплеев (компьютерных мониторов и ноутбуков), цена пикселя пропорциональна логарифму его размера. Провал связан с тем, что объем выпуска настольных дисплеев значительно превосходит объемы выпуска LCD TV (см. рис. 4)

Для архитектурных дисплеев и NTE-микродисплеев цены являются не столь определенными, характеризуются большим разбросом и плохо поддаются анализу. Как правило, цена за пиксель в этих классах значительно выше цены за пиксель обычных мониторов и телевизоров. Цена значительно выше, даже для таких массовых типов дисплеев, как DLP (Digital Light Processor) матрицы, соответствующие значения указаны только в легенде на рис. 4, так как эти величины не вписываются в масштаб графика.

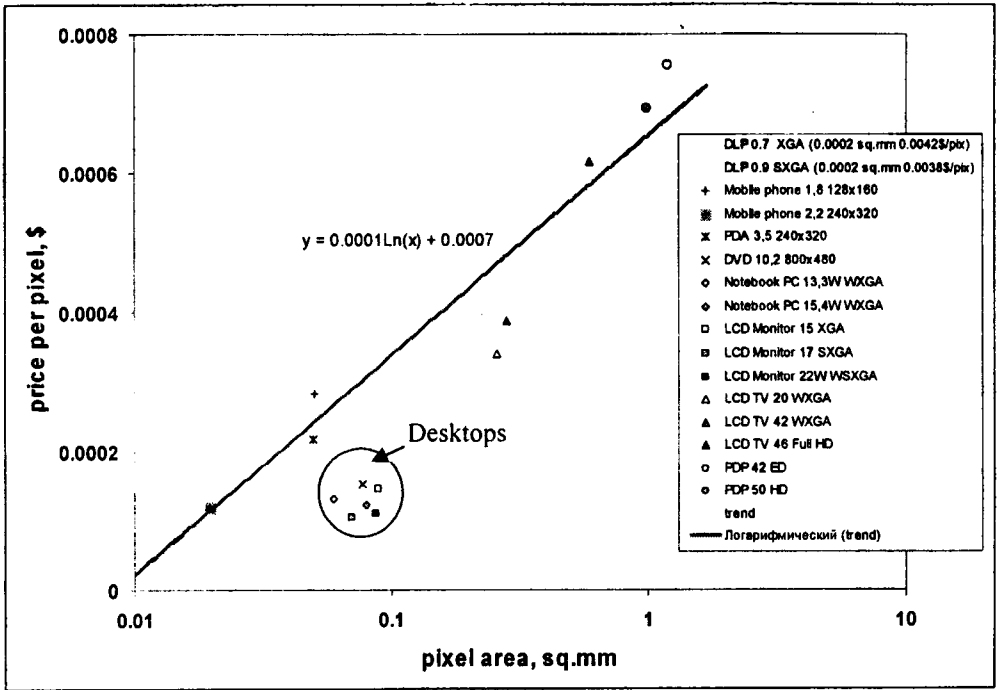


Рис. 3. Цена за пиксель в зависимости от его размера

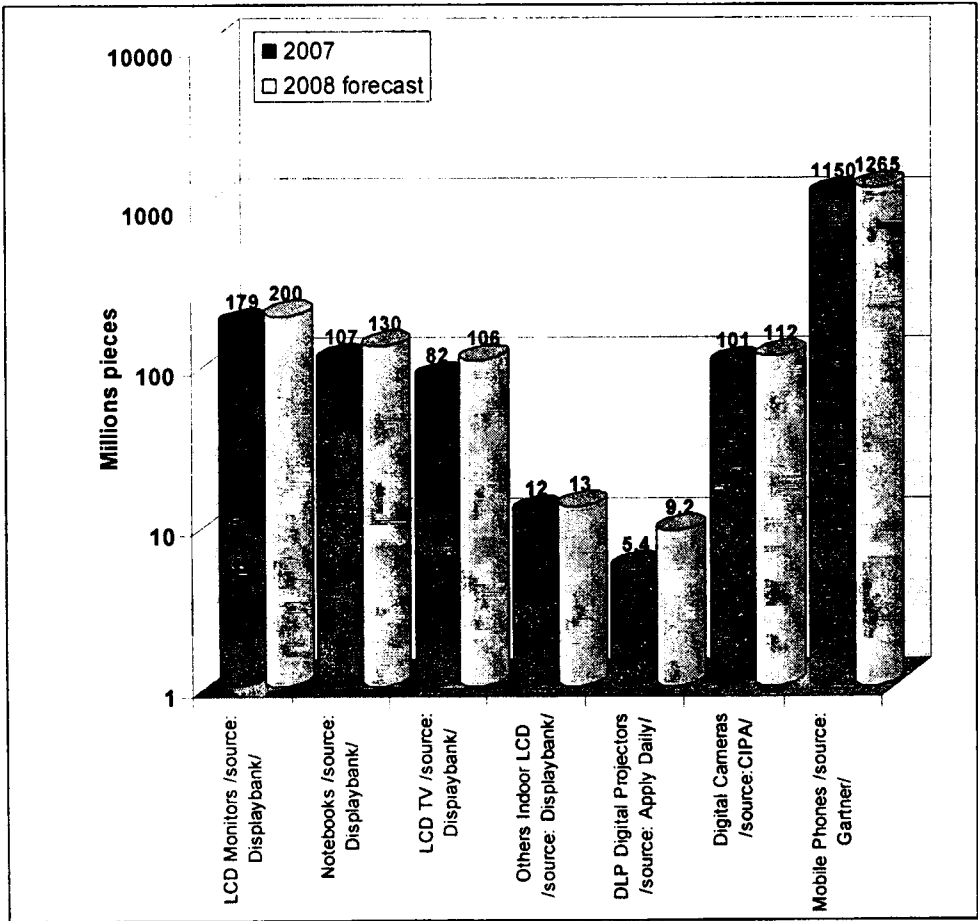


Рис. 4. Объем выпуска различных типов дисплеев

Физические и технологические ограничения для различных типов дисплеев

Как уже указывалось ранее, во многих случаях микродисплей можно было бы изготовить простым масштабированием существующих конструкций, уменьшив их геометрические размеры, но сохранив высокое разрешение. В определенных пределах такой подход вполне допустим и приводит к успешным результатам. Типичным примером является использование ЖК матриц в сравнительно крупных моделях проекторов. Однако, в целом подобное масштабирование наталкивается на физические и технологические ограничения, заставляя искать альтернативные технические решения и использовать новые физические эффекты.

В данном разделе рассматриваются технологические ограничения, свойственные основным категориям дисплеев, с точки зрения уменьшения их геометрических размеров. Также рассматриваются конкретные конструкции и технологии микродисплеев, созданных на базе соответствующих дисплейных технологий.

Жидкокристаллические дисплеи - управляющая электроника активной матрицы

Основным физическим ограничением при микромасштабировании активно матричных дисплеев является величина площади, занимаемой управляющей электроникой. В случае отражающих дисплеев эта величина непосредственно определяет минимально возможную площадь пикселя, а в случае работающих на просвет дисплеев действуют несколько более жесткие ограничения, связанные с уменьшением числовой апертуры и приводящие к снижению яркости и энергетической эффективности. Числовая апертура - это отношение рабочей (пропускающей) площади элемента отображения к его общей площади. Часть площади пикселя активной матрицы занимают элементы управления (шины питания и управления, МОП транзистор), которые снижают эффективную площадь ячейки. Технологически числовую апертуру увеличивают за счет использования полупроводников с более высокой подвижностью носителей, так как увеличение подвижности позволяет пропорционально уменьшить ширину канала и, соответственно, площадь тонкопленочного транзистора (ТФТ). На приведенном ниже рис. 5 можно видеть, что при замене аморфного кремния на поликремний числовая апертура улучшается [3]. В табл. 2 приведены подвижности носителей (μ) для основных типов кремния, применяемых в активноматричных дисплеях [4].

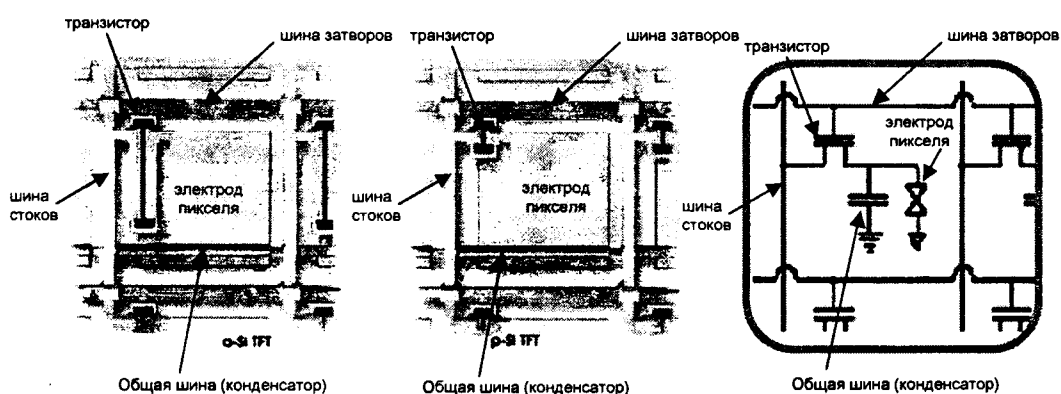


Рис.5. Схематические изображения пикселя с ТФТ на аморфном кремнии (слева), на поликремнии (в центре) и соответствующая электрическая схема (справа)

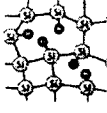
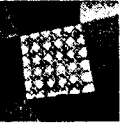
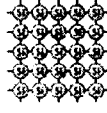
Особый интерес представляет изменение числовой апертуры при масштабировании активной матрицы. В связи с этим ниже рассматриваются основные факторы, влияющие на размер управляющего транзистора. К ЖК пикселю прикладывается переменное напряжение, чтобы уменьшить электролитические эффекты деградации – в четных кадрах прикладывается положительное напряжение, а в нечетных – такое же по величине напряжение, но обратной полярности [4]. Таким образом, максимальный ток через транзистор составляет

$$I = 2 \cdot C \cdot U / (T_0 / M),$$

где U – максимальное напряжение, прикладываемое к ячейке, T_0 – длительность кадра, M – число столбцов, C – емкость конденсатора.

Введение дополнительного конденсатора в схему управления связано с тем, что диэлектрическая проницаемость ЖК зависит от его ориентации, может изменяться почти вдвое, и если использовать в качестве накопительного конденсатора только емкость слоя ЖК, напряжение на ячейке будет меняться в процессе переключения. Так как это искажает передачу серой шкалы в схему вводят дополнительный конденсатор, емкость (C) которого в N (обычно несколько десятков) раз превышает емкость (C_0) слоя ЖК в пикселе. Емкость C_0 пропорциональна площади пикселя.

Таблица 2. Подвижность носителей в кремнии

	Эскиз структуры	Подвижность носителей см ² /(В*сек)	Допустимая температура	Тип подложки
α -Si		0.3-1	~ 300 C	стекло
Low T poly-Si		50-200	~ 500 C	стекло
High T poly-Si		100-300	~ 1000 C	кварц
Crystalline Si		400	~ 1100 C	кремний

При неизменных проектных нормах и длине канала максимальный ток определяет ширину канала и, соответственно, площадь управляющего транзистора. Таким образом, относительная площадь управляющего транзистора

$$S_{TFT} / S_{pixel} \sim N \cdot M \cdot C_0 / (\mu \cdot T_0) \sim M / \mu$$

Из этого выражения видно, что увеличение разрешения дисплея ухудшает числовую апертуру, поэтому увеличение разрешающей способности активноматричных ЖК дисплеев сопровождалось переходом от α -Si к poly-Si, характеризующемуся значительно более высокой подвижностью. Попутно при этом была решена проблема контактных площадок и встроенных драйверов (рис. 6).

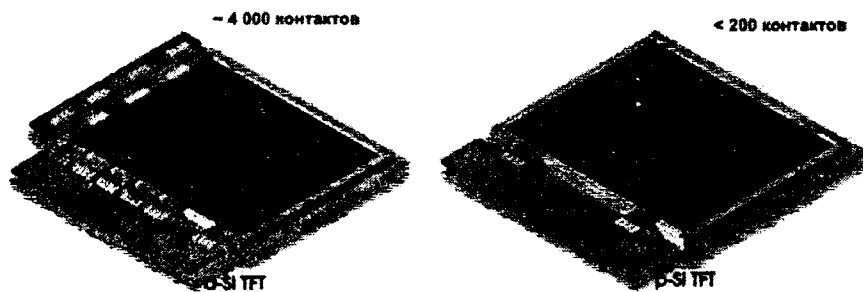


Рис. 6. Решение проблемы контактных площадок и встроенных драйверов при переходе от α -Si к низкотемпературному poly-Si [3]

В то же время, это выражение показывает, что физическое уменьшение пикселей не влияет на числовую апертуру. Т.е. масштабирование может производиться в рамках существующих технологий и не требует замены базовых полупроводниковых материалов. Однако в настоящее время mainstream ЖК технологии ориентированы на сравнительно большой размер пикселей, соответствующих наблюдению невооруженным глазом (телевизоры и мониторы) и близких к ним (настольные и стационарные проекторы). При этом строятся фабрики, со все большими размерами подложек (см табл. 3), но практически с неизменным минимальным физическим размером пикселя ~ 0.2 мм. Характерно, что предыдущие генерации не исчезают бесследно, а возрождаются в промышленном оборудовании для развивающихся дисплейных технологий (LTPS, AMOLED).

Таблица 3. Развитие ЖК технологий

Год	Поколение	Размер подложки /mm
	G 2	400x500
1995	G 3	550x670
	G 3.5	600x720
	G 4	680x880
2001	G 5	1100x1250
	G 6	1500x1800
2004	G 7	1870x2200
2006	G 8	2160x2460
2008	G 9	2400x2800

В то время, как размеры подложек увеличиваются, проектные нормы для управляющих элементов ужесточаются, - в компании Sharp даже считают, что развитие управляющей микроэлектроники на стекле соответствует закону Мура, требующему удвоения количества элементов каждые 18 месяцев. В настоящее время проектные нормы составляют 1-3 мкм, что позволило создать на стекле демонстрационный микропроцессор Z80 с тактовой частотой 3 МГц при напряжении питания 5 В [5]. В ближайшее время Sharp собирается перейти на 0.8 мкм проектные нормы.

Таким образом, нет ни фундаментальных, ни принципиальных технологических ограничений для микроминиатюризации управляющей электроники в рамках концепции "poly-Si on a glass", а получившие распространение технологии изготовления микродисплеев: LCOS (Liquid Crystal On Silicon) и «Silicon-on-Glass» фирмы Kopin Corp., связаны с неготовностью производителей работать с чипами и шинами сверхмалых размеров, типичных для кремниевой микроэлектроники. Вне всякого сомнения, в ближайшем будущем эти технологии будут вытеснены с рынка микродисплеев принципиально более дешевой поликремниевой управляющей электроникой, так как дальнейший потенциал масштабирования, который мог бы быть реализован при использовании технологий монокристаллического кремния, упирается в рассматриваемую в следующем подразделе ограниченную разрешающую способность самих жидких кристаллов.

Жидкокристаллические дисплеи - интерференция пикселей

Общим принципиальным ограничением матричных систем является дифракционное пространственное разрешение оптической системы

Угловое разрешение

$$\alpha = \lambda/B,$$

где B – диаметр объектива

Пространственное разрешение

$$a = \alpha \cdot F = \lambda/(B/F) = \lambda/A,$$

где F – фокусное расстояние объектива, A – апертура объектива

Для красного света ($\lambda = 0.6$ мкм) и объектива без иммерсии $A \sim 1$, получаем минимальный размер пикселя ~ 0.6 мкм. Соответственно, монохромный SVGA дисплей имел бы размер 600 мкм по диагонали. Теоретически, подобное пространственное разрешение может быть получено в AMOLED и SiLED микродисплеях.

В ЖК дисплеях, однако, существует дополнительное ограничение, связанное с ненулевой толщиной слоя ЖК. При толщине слоя ЖК 1...1.5 мкм шаг пикселей должен быть в несколько раз больше – иначе взаимовлияние пикселей будет чрезвычайно сильным. Четкого критерия в этом случае нет, шаг пикселей выбирается исходя из разумного компромисса между уменьшением размеров дисплея и соответствующим ухудшением контраста, цветопередачи и быстродействия. В настоящее время шаг пикселей при использовании технологии «Silicon-on-Glass» приблизился к 7×7 мкм – по-видимому, это предел для монохромных матриц. Для полноцветных матриц (Field-Sequence) при гексагональном расположении пикселей соответствующий шаг пикселей будет около 12 мкм.

Таким образом, при площади монохромного пикселя 100 мкм^2 монохромный SVGA ЖК микродисплей будет иметь размер примерно 10 мм (0.4 дюйма по диагонали). Дальнейшее уменьшение физических размеров цветных ЖК микродисплеев будет, скорее всего, связано не столько с уменьшением толщины слоя ЖК, сколько с переходом от пространственного разделения цветов (Field-Sequence), традиционно реализуемого матрицей светофильтров, к временному (Time-Sequence), реализуемому цветной динамической подсветкой. При этом, помимо трехкратного увеличения разрешающей способности достигается еще и трехкратный энергетический выигрыш. Необходимое для Time-Sequence-процесса формирования цвета быстродействие может быть достигнуто при использовании ферроэлектрических ЖК.

Примеры реализации ЖК микродисплеев

Традиционно микродисплеи изготавливаются на базе ЖК панелей с активной матрицей поликремниевых транзисторов, характеризующихся значительно меньшими геометрическими размерами, высоким быстродействием и лучшими электрическими параметрами, чем транзисторы на аморфном кремнии. Использование поликремниевых транзисторов позволяют решить проблему контактов путем интегрирования управляющих драйверов непосредственно в ЖК панель.

Наилучшие параметры обеспечиваются при использовании высокотемпературного поликремния (HTPS-технология). В настоящее время параметры ЖК панелей этого класса достигли разрешения 1440×1024 , размер пикселя 28×22 мкм, апертура 47.5%, диагональ ЖК панели 1.8 дюйма (*Seiko Epson*). Одним из главных недостатков HTPS-технологии считается необходимость использования дорогих кварцевых подложек.

Более перспективной считается низкотемпературная технология создания поликремниевых транзисторов (LTPS – технология), разработанная фирмой Sharp и использующая техпроцесс Continuous Grain Silicon. На основе этого техпроцесса создана ЖК панель с разрешением 1280×1024 , размером пикселей 45×32 мкм при числовой апертуре 63%, диагональ ЖК панели 2.6 дюйма.

В технологии «Silicon-on-Glass», разработанной специалистами фирмы Korin Corp. (США) (рис. 7), сначала методом ISE (Isolated Silicon Epitaxy) на кремниевой подложке наращивается толстый слой монокремния, в котором стандартными технологическими приемами формируется высокоплотная матрица МОП-транзисторов вместе со строчными и столбцовыми драйверами. Затем этот слой отделяют от кремниевой подложки и переносят на стеклянную подложку. На последней стадии осуществляют сборку ЖК панели. Такая технология позволяет использовать стандартное микроэлектронное оборудование, кремниевые подложки и типовые КМОП процессы, но, в целом, является чрезвычайно дорогой. Одна из последних разработок фирмы Korin – микродисплей с диагональю 1.5 дюйма, содержащий 2560×2048 пикселей с интегрированными драйверами столбцов и строк, для наשלемых проекционных устройств.

Следует отметить, что данная технология является чрезвычайно дорогостоящей, и на фоне стремительно дешевеющих макродисплеев и перехода на LTPS технологию, компании

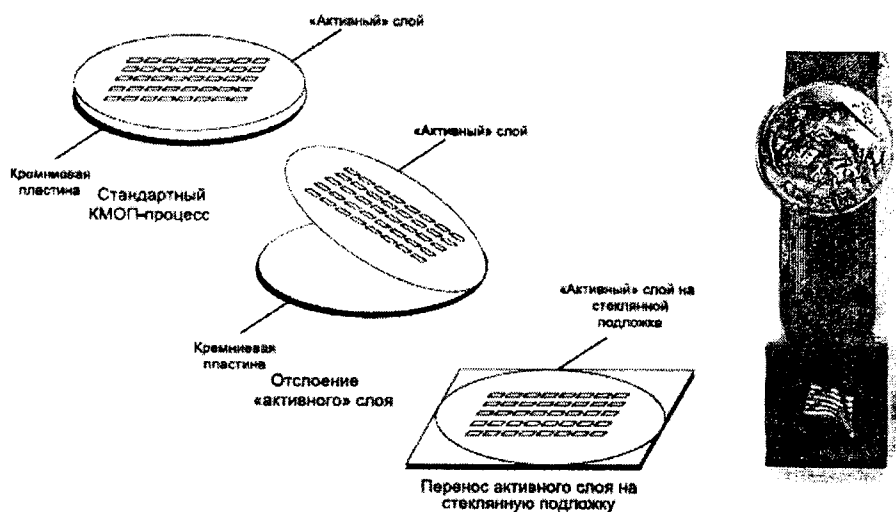


Рис.7. Процесс «Silicon-on-Glass» фирмы Корпн (слева) и SVGA 0.44' микродисплей, изготовленный по этой технологии [6] (справа)

Корпн тяжело сохранять рентабельность, даже несмотря на значительное увеличение объемов выпуска (в I квартале 2008 по сравнению с аналогичным периодом прошлого года продажи микродисплеев выросли с 9 до 17,1 млн долларов, а их доля в обороте компании с 50% до 59% [7]). Изменение курса акций компании представлено на рис. 8.

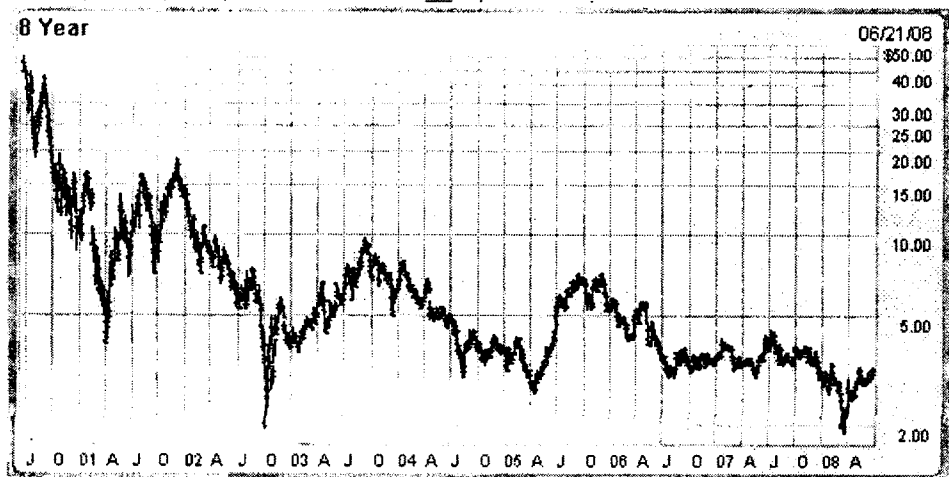


Рис.8. Изменение курса акций компании Корпн за 2000-2008 г. [8, «КОРПН»]

При изготовлении микродисплеев для проекторов и особенно для pico-проекторов широко используется технология LCOS (Liquid Crystal on Silicon), так как объемы выпуска пока не велики и использование существующего микроэлектронного оборудования и отлаженных технологий позволяет быстро освоить производство. LCOS микродисплеи представляют собой сверхминиатюрные активно-матричные ЖК дисплеи отражательного типа. От обычных ЖК микродисплеев просветного типа они отличаются тем, что одна из стеклянных подложек с поляридом заменена на кремниевый кристалл, в котором формируется активная матрица. Для

проекторов отражательного типа не требуется прозрачность подложки, поэтому использование кремниевого кристалла не требует специфических дополнительных технологий, подобных процессу «Silicon-on-Glass», однако из соображений совместимости с существующим микроэлектронным оборудованием размер кристалла не должен превышать одного дюйма по диагонали.

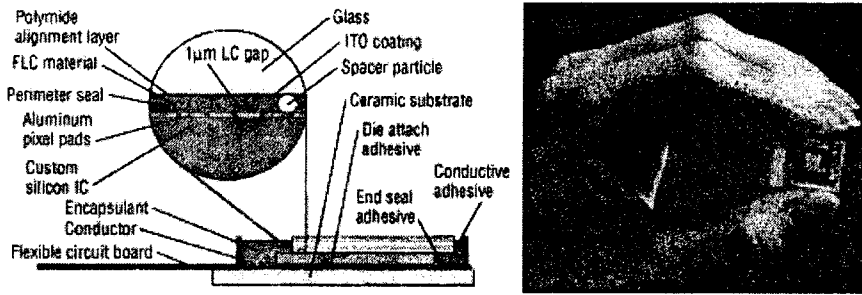


Рис. 9. Структура и внешний вид микродисплея фирмы Displaytech FLCOS (ferroelectric liquid crystal on silicon display), time-sequence color 0.19' QVGA -320×240 pixels [9]

Помимо изображенного на рис. 9 QVGA микродисплея, в линейке pico-дисплеев фирмы Displaytech представлены также VGA и SVGA модели. FLCOS микродисплей для pico-проектора со светодиодными излучателями для сотовых телефонов имеет размер 11.5×15.3 мм (0.75 дюйма по диагонали) с разрешением 800×600 и шагом пикселей 19 мкм [9].

Особого упоминания заслуживают голографические проекционные микродисплеи. Компания HOLOEYE в 2007 году продемонстрировала голографический проектор, рассчитывающий и генерирующий цифровые голограммы на обычном персональном компьютере (320×240, 30 кадров/с) в реальном времени (рис. 10).

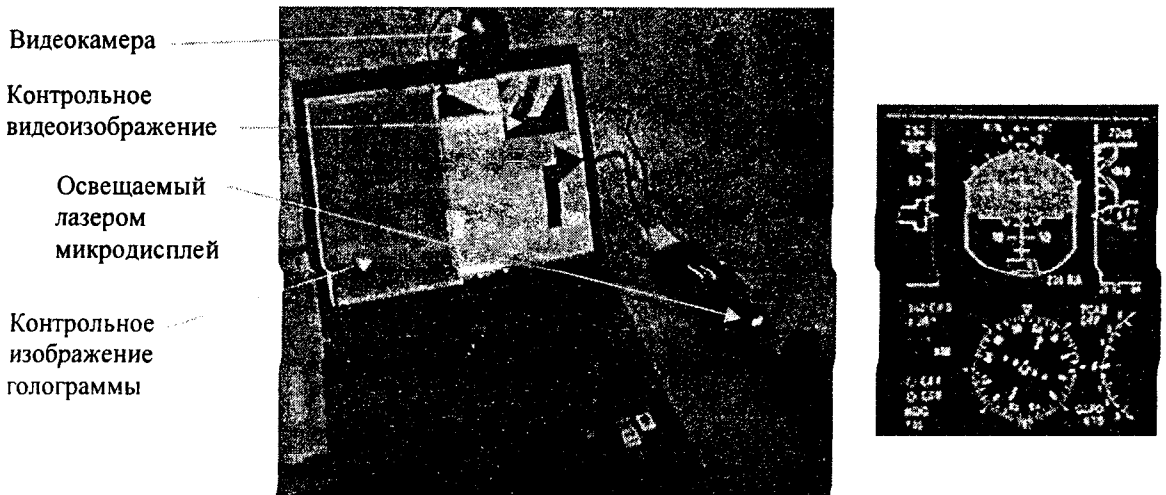


Рис. 10. Голографический проектор фирмы HOLOEYE (слева) и информационная панель на его основе (справа)

Голографические системы могут быть как с амплитудной модуляцией (обычно они базируются на DLP микродисплеях), так и с фазовой (базируются на LCOS микродисплеях без поляридов). Одним из основных преимуществ голографических систем является простота оптической схемы – проектор может вообще не иметь линз, а фокусировка на удаленный экран осуществляется программной коррекцией голографической структуры. Другим важным преимуществом является высокоэффективное использование светового потока – голографический принцип позволяет не затенять, а перераспределять свет: например, весь световой поток может

быть сведен в одну яркую точку или линию. Пример информационной панели, реализованной с использованием голографического проектора, приведен на рис. 10 (справа).

Светоизлучающие дисплеи

Светоизлучающие дисплеи имеют наиболее простое конструктивно-технологическое исполнение, поскольку не требуют внешнего источника излучения и сложной оптики. В то же время разработка и производство высокоинформативных светоизлучающих дисплеев сталкивается с труднопреодолимыми технологическими трудностями и нерешенными научными проблемами. Как уже указывалось ранее, для решения «проблемы выводов» микродисплеи необходимо интегрировать с драйверами и единственно приемлемый с коммерческой точки зрения вариант для мегапиксельных микродисплеев – использование кремния или поликремния. Сами же излучатели могут быть самыми разными. Так, в активно-матричных электролюминесцентных микродисплеях компании Planar Systems используется тонкопленочная технология для последовательного нанесения металлических, диэлектрических и люминофорных слоев поверх активной матрицы, изготовленной фирмой Korin. Planar Systems продемонстрировала образцы микродисплеев с диагональю 0.7 дюйма и разрешением 640×480 и 1280×1024 пикселей. Основные недостатки подобных дисплеев связаны с высокими рабочими напряжениями (80 В переменного тока), сложностью изоляции высоковольтных сигналов от невыбранных элементов отображения и логики при столь плотном размещении элементов, а также, низкой эффективностью синих люминофоров и соответствующими проблемами при формировании полноцветного изображения [10, 11]. Компании Display Research Labs, Ise Electronics разработали VF (Vacuum Fluorescent)-on-Si микродисплеи, а компании Micron и Motorola - FE (Field Emission) микродисплеи [12]. Использование углеродных нанотрубок является одним из основных направлений развития FE дисплеев и микродисплеев. Применение упорядоченного массива углеродных нанотрубок, локализованных в порах анодного окисла, описанное далее в настоящем журнале, открывает новые возможности по повышению яркости, увеличению срока службы и интеграции с кремниевой подложкой FE светоизлучающих элементов.

В настоящее время лидирующие позиции занимают активноматричные микродисплеи на органических светодиодах, однако соответствующий сектор рынка активно развивается и видоизменяется: в ближайшее время можно ожидать смены лидера и появления новых игроков.

Плазменные панели

Плазменные дисплеи характеризуются высокой яркостью и контрастом, широким углом обзора, насыщенными цветами. Сами по себе разрядные источники света характеризуются высокой энергетической эффективностью, но в плазменной панели длина разряда чрезвычайно мала и весь разряд локализуется в малоэффективной области приэлектродного темного пространства. Однако газоразрядные панели все же остаются сопоставимыми с ЖК панелями по эффективности, т.к. в ЖК дисплеях из-за потерь в поляроидах, светофильтрах и пространственного разделения RGB-ячеек пропускание света составляет всего ~ 5%. Ситуация может радикально измениться в ближайшем будущем, при увеличении быстродействия ЖК и перехода на «Time Sequence» светодиодную подсветку – это даст ЖК панелям дополнительный 3х-кратный выигрыш как по энергетической эффективности, так и по разрешению. Но в настоящее время плазменные панели являются конкурентноспособными и занимают определенную рыночную нишу.

Как видно из рис.11, плазменные панели не содержат полупроводниковых слоев, их матрица, за счет использования особых запоминающих свойств газового разряда, является по сути пассивной. Это позволяет использовать низкотемпературные подложки и существенно удешевляет процесс изготовления по сравнению с активно-матричными ЖК панелями. Однако масштабирование плазменных панелей наталкивается на целый ряд существенных ограничений. Одним из главных конструктивных ограничений является проблема контактных площадок. Т.к. матрица не содержит полупроводниковых слоев, она не может быть интегрирована

с драйверами, соответственно, число выводов должно измеряться тысячами, что при сверхмалых размерах матрицы приводит к трудноразрешимым проблемам.

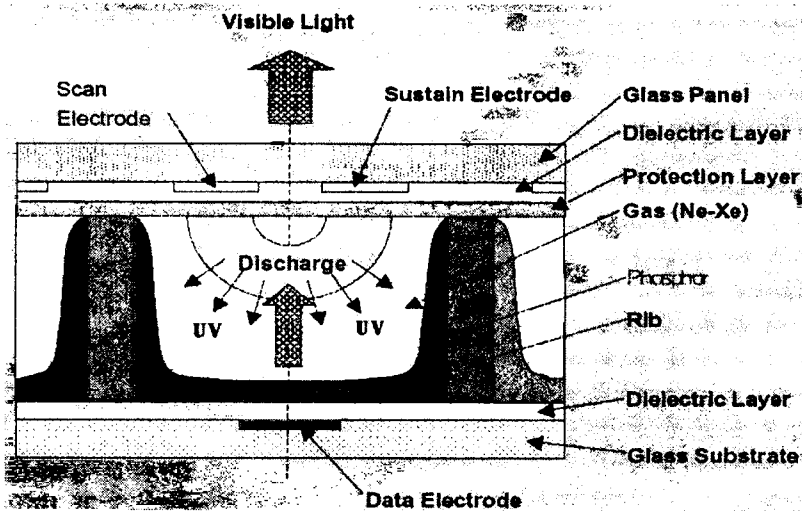


Рис. 11. Конструкция и принцип работы плазменной ячейки [13]

Основной же технологической проблемой является необходимость увеличения давления газа при сокращении длины разряда. Обычно панели заполнены неоном с небольшой примесью более тяжелого инертного газа (аргона, ксенона). Такие смеси имеют пологую зависимость напряжения зажигания от длины разрядного промежутка при сравнительно низком рабочем напряжении (рис. 12). Как видно из рис.12, минимальное напряжения разряда имеет место при $p_0 \cdot d \sim 30$ Па·м.

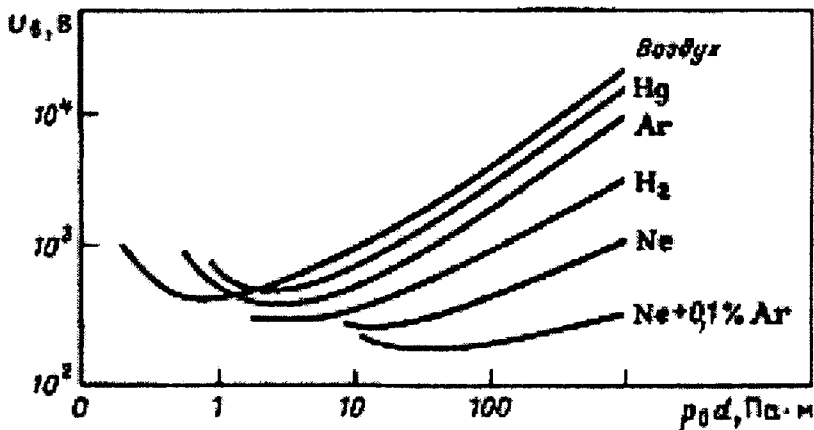


Рис. 12. Кривые Пашена для различных газов [14]

Т.е. уже при размере пиксела 300 мкм давление газа должно превышать атмосферное (10^5 Па). При размере пикселя 30 мкм давление газа должно быть порядка 10 атмосфер, что создает труднопреодолимые технологические и конструктивные препятствия при сборке и эксплуатации устройства. Замена газа с целью уменьшения $p_0 \cdot d$ приводит к повышению рабочего напряжения, снижению стабильности и эффективности функционирования.

Таким образом, масштабирование плазменных панелей сопряжено со значительными технологическими и конструктивными трудностями, приводит к снижению эффективности функционирования устройства и, в целом, делает плазменные микродисплеи неконкурентоспособными на рынке.

Инжекционные кристаллические светодиоды

Дискретные светодиоды широко используются в дисплеях больших форматов, соответствующие примеры были рассмотрены ранее в разделе «Классификация дисплеев». Безусловно, светодиоды по совокупности параметров являются наилучшими источниками света, однако отсутствие методов их интеграции с высокой плотностью на кремниевой подложке пока не позволяет создавать микродисплеи на их основе.

Кремниевые лавинные светодиоды

В сильных электрических полях в кремнии развивается лавинный пробой с образованием горячего электронного газа. Условия, необходимые для лавинного пробоя можно создать, прикладывая обратное смещение к р-п переходу или диоду Шотки. Горячий электронный газ излучает видимый свет, сталкиваясь с атомами решетки/внедренными атомами, находящимися в области сильного поля либо на расстояниях, соизмеримых с длиной свободного пробега (~7-20 нм) от нее [15]. Использование диода Шотки на основе пористого кремния позволило непосредственно в области сильного поля расположить химически и физически модифицированную поверхность кремния и его нанокристаллиты, что значительно увеличило интенсивность электролюминесценции в видимой области. Светоизлучающие структуры на основе пористого кремния характеризуются большим сроком службы (>10000 часов); непрерывным спектром, позволяющим выделить цвета RGB; невысоким рабочим напряжением (менее 12 В) с крутой ВАХ; малым временем отклика (единицы нс); высокой допустимой плотностью рабочего тока (до 8000 А./см²).

Указанные свойства кремниевых светодиодов и совместимость процесса их изготовления со стандартной КМОП технологией позволяют проектировать высокоэффективные и недорогие пассивно-матричные микродисплеи интегрированные с управляющими драйверами.

В этом журнале в статье «Микродисплей светоизлучающего типа на основе наноструктурированного кремния» рассматриваются базовые принципы, технологии и достижения в исследовании и разработке кремниевых светоизлучающих микродисплеев высокого разрешения.

Органические светодиоды

Органическая электролюминесценция впервые наблюдалась в 1963 на кристаллах антрацена при напряжениях порядка 400 В [16]. Впоследствии была обнаружена жидкофазная низковольтная электролюминесценция (электрохемилюминесценция - electrochemiluminescence) и низковольтная постоянно-токовая тонкослойная электрохемилюминесценция. В статье «Electrochemiluminescence: from submicron cells to matrix displays» этого журнала рассматриваются особенности этого физического явления и его применение в дисплейных технологиях. В 1987 Ching W. Tang и Steve Van Slyke создали первый твердотельный органический светодиод (OLED) [17]. Уже первый OLED имел впечатляющие характеристики: 1% внешнюю квантовую эффективность, яркость 1000 кд/м² и рабочее напряжение ~ 10 В. В 1990 были разработаны полимерные светодиоды (PLED) на основе PPV (см. рис. 13), они излучали в желто-зеленой области спектра с внешней квантовой эффективностью ~ 0.05% [18].

Первый коммерческий OLED дисплей (панель автомагнитолы) был произведен в 1997 компанией Pioneer Electronics.

На рис. 13 изображена базовая структура OLED. В коммерческих реализациях обычно вводится еще несколько дополнительных слоев, улучшающих функционирование светодиода. Большое количество разнородных, тонких (от субмикронных до нанометровых) слоев резко ограничивает возможности формирования локальных структур, например, вместо типичных в микроэлектронике операций фотолитографии и локального травления приходится использовать операции осаждения сквозь металлические маски или струйную печать.

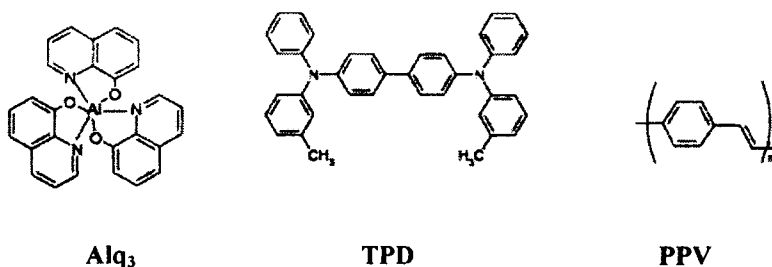
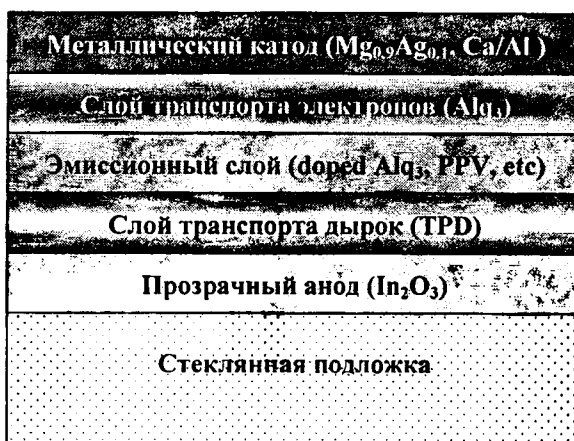


Рис. 13. Структура OLED и используемых материалов

На рис. 14 изображена диаграмма функционирования OLED [19]. При приложении достаточного по величине напряжения дырки инжектируются из анода на наивысшие занятые молекулярные орбитали (HOMO - highest occupied molecular orbital) органических молекул прианодного слоя, формируя катион-радикалы. В свою очередь электроны инжектируются из катода на наинизшие незанятые молекулярные орбитали (LUMO - lowest unoccupied molecular orbital) органических молекул прикатодного слоя, формируя анион-радикалы. Анион-радикальные и катион-радикальные состояния мигрируют в электрическом поле, рекомбинируя и излучая свет при столкновениях друг с другом. Материалы и толщины слоев подбираются таким образом, чтобы количество инжектируемых дырок было примерно равно количеству инжектированных электронов, их рекомбинация была возможно более полной, а излучение света - максимально эффективным.

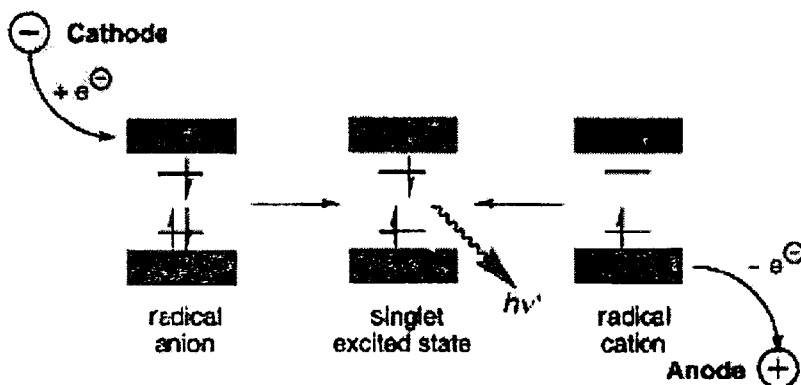


Рис. 14. Процесс излучения света в OLED [19]

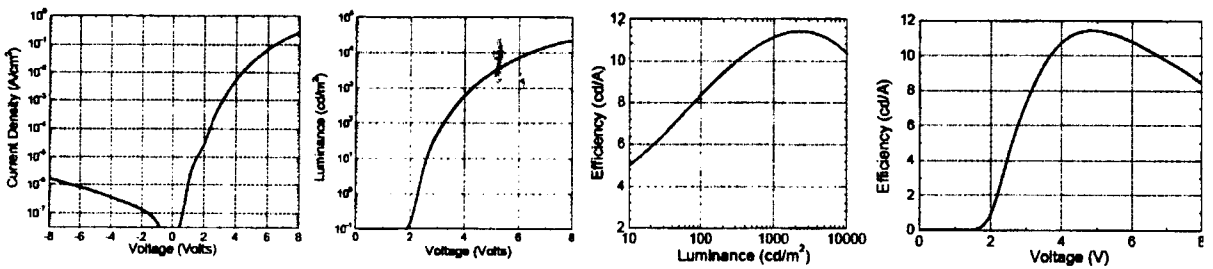
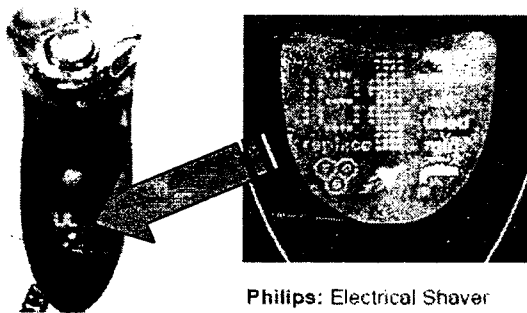


Рис. 14. Типовые характеристики современного OLED [20]

Из приведенных на рис.14 типовых характеристик OLED видно, что максимальная яркость стремится к насыщению при ~ 20000 Кд/м². Уже только это накладывает существенные ограничения на максимальное разрешение пассивной матрицы на основе OLED. Если итоговая яркость экрана должна быть 300 Кд/м², то максимальное количество строк разложения не должно превышать $20000 \text{ Кд/м}^2 / 300 \text{ Кд/м}^2 = 66$.

Пассивно-матричные дисплеи невысокого разрешения и малого размера являются основной областью применения OLED (см. рис. 15). Как будет показано далее, это связано с принципиальными ограничениями максимального физического размера OLED дисплеев и технологическими трудностями изготовления активных матриц для OLED. Разрешения, достигаемого в пассивных матрицах, явно недостаточно для построения высокоинформативных дисплеев, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только активно-матричные OLED дисплеи (AMOLED).



Philips: Electrical Shaver

Рис. 15. Пример пассивноматричного OLED дисплея, расположенного на криволинейной поверхности

Так как OLED в отличие от ЖК управляется не напряжением, а током, элементарная ячейка AMOLED должна состоять, по крайней мере, из двух транзисторов (запоминающего и управляющего) и дополнительной токовой шины, питающей OLED. Принципиальная схема ячейки и топологические варианты ее исполнения («top emission» и «bottom emission») приведены на рис. 16.

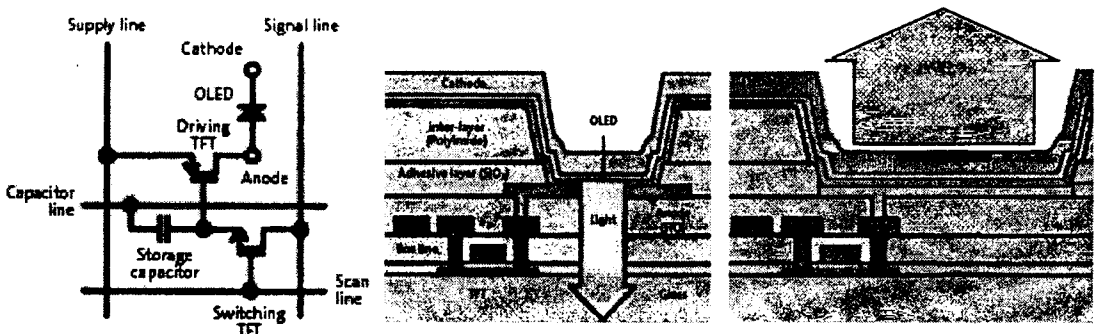


Рис. 16. Принципиальная схема (слева), «bottom emission» (в центре) и «top emission» (справа) топологии AMOLED

Топология “bottom emission”, в сравнении с “top emission”, обеспечивает лучшую защиту слоя OLED, но при этом ухудшается числовая апертура ячейки из-за частичного экранирования излучения транзисторами и проводящими шинами. В случае формирования полноцветного изображения фильтрами, наносимыми поверх OLED, может использоваться только “top emission” топология. Топологическая реализация AMOLED является технологически очень сложной и требует для изготовления порядка 20 операций фотолитографии. Получить приемлимый выход годных AMOLED при переходе к микроразмерам можно только при использовании современных микроэлектронных технологий на кремниевых пластинах. Именно по этому пути пошли производители AMOLED микродисплеев компании eMagin и MicroEmissive Display. Очевидно, что при применении непрозрачных кремниевых подложек, возможно использование только технологии “top emission”.

Формирование цветов в матрице может быть осуществлено использованием отдельных OLED для каждого цвета (“RGB emitters”), переизлучением света синего светодиода локально нанесенными фотолюминесцентными слоями (“Color Changing Media”) и фильтрацией RGB цветов фильтрами из спектра излучения белого светодиода (“RGB filters+white emitter”). Достоинства и недостатки указанных технологий рассмотрены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение технологий полноцветных AMOLED

Технология	“RGB emitters”	“Color Changing Media”	“RGB filters White emitter”
Энергетическая эффективность	Высокая 100%	Средняя ~ 75%	Низкая ~ 30%
Технологичность	Низкая (слои OLED)	Средняя (слои люминофоров)	Высокая (слои фильтров)
Равномерность старения эмиттеров	низкая	высокая	средняя
Прочее	Возможна раздельная оптимизация митеров	Требуется высокостабильный и эффективный синий эмитер	Требуется высокостабильный и эффективный белый эмитер

Из табл. 4 видно, что наиболее технологичный и реализуемый практически во всех выпускаемых моделях AMOLED способ формирования цветов «RGB filters+white emitter», является наименее экономичным из-за потерь энергии в фильтрах. В итоге, подобные AMOLED уступают по экономичности ЖК с «Time-Sequence» формированием цветов.

Как видно из рис.14 яркость 300 Кд/м^2 достигается при напряжении $\sim 3,5 \text{ В}$ и плотности тока $J_{\text{OLED}} = 3 \text{ мА/см}^2$. На подводящих шинах (тонкопленочных аноде и катоде) имеет место омическое падение напряжения ΔU , которое должно быть существенно меньше рабочего напряжения. При равномерном свечении, как дискретного индикатора, так и AMOLED панели, падение напряжения ΔU определяется размером панели (индикатора) L и поверхностным омическим сопротивлением проводников ρ :

$$\Delta U = J_{\text{OLED}} L^2 \rho, \quad \text{откуда следует } L = [\Delta U / (J_{\text{OLED}} \rho)]^{1/2}$$

В случае $\Delta U = 0,5 \text{ В}$ и $\rho = 10 \text{ Ом/}\square$, характерного для высококачественных слоев ИТО, получаем величину максимального размера $\sim 4 \text{ см}$. Если поверх ИТО накладывать проводящую сетку, например, на основе тонкослойного алюминия с поверхностным сопротивлением $0,01 \text{ Ом/}\square$, экранирующую треть активной площади, то максимальный размер составит $\sim 60 \text{ см}$. При использовании технологии «RGB filters+White emitter), обладающей низкой энергетической эффективностью, максимальный размер будет всего $\sim 35 \text{ см}$ или около 17 дюймов по диагонали.

Таким образом, из-за физических и технологических ограничений AMOLED панели не могут стать реальными конкурентами на массовом рынке мониторов и телевизоров. В области микродисплеев часть этих ограничений снимается, но без сопутствующего массового производства AMOLED в смежных секторах, издержки производства микродисплеев оказываются чрезвычайно большими.

На рис. 17 приведены графики курсов акций компаний, специализирующихся на производстве AMOLED микродисплеев: eMagin (скачок в июле 2007 связан с успешной реструктуризацией \$6 млн. долга и переносе его выплаты на 21 декабря 2008) и MicroEmissive Displays (осенью 2007 в Дрездене запущена оснащенная современным кластерным оборудованием фабрика по производству AMOLED микродисплеев).

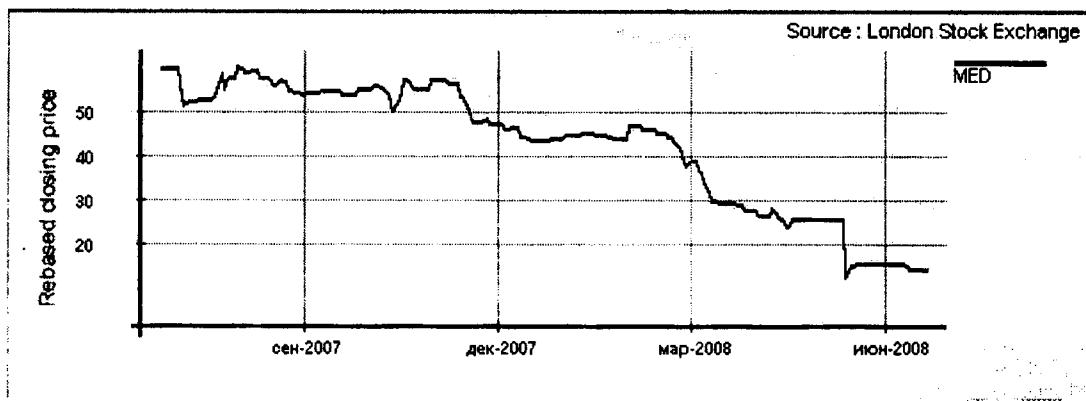
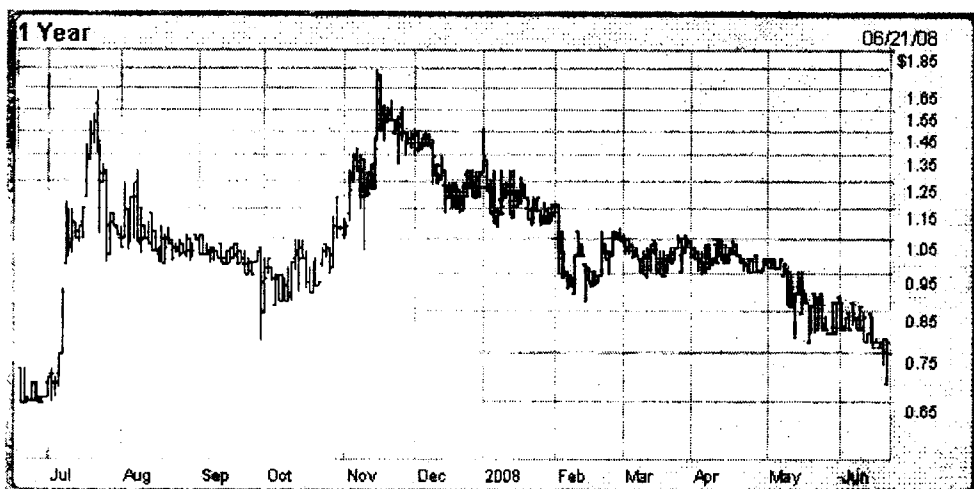


Рис. 17. Биржевые котировки акций компаний eMagin [8 “EMAN”] (вверху) и MicroEmissive Displays [21, “MED”] (внизу)

MEMS (Micro ElectroMechanical System) дисплей

MEMS (Micro Electromechanical System) – это создаваемые с использованием микроэлектронных технологий устройства, содержащие механически перемещаемые элементы. Как правило, такие устройства создаются на кремниевой подложке и наряду с микроэлектромеханическими датчиками и (или) актюаторами содержат сопутствующие электронные схемы управления и (или) обработки сигналов. Для создания дисплея виртуальной реальности или проектора соответствующее MEMS устройство дополняется источником светового излучения и оптическими элементами..

Наиболее конструктивно простым дисплейным MEMS устройством является качающееся микрозеркало. Затем следует линейный модулятор света, причем для построения дисплея он должен быть дополнен системой развертки, например тем же качающимся зеркалом. Наиболее же конструктивно сложным изделием является матрица модуляторов. Как правило, все эти системы могут работать не только в видимой области спектра, но и во всем диапазоне от дальнего инфракрасного излучения до дальнего ультрафиолета. Столь широкий спектральный диапазон позволяет реализовывать на MEMS не только дисплеи высокого разрешения, но также системы высокоскоростной безмасочной фотолитографии, высококачественные лазерные принтеры, широкополосные системы телекоммуникации и обработки сигналов.

MEMS дисплеи с качающимися микрозеркалами

Основными разработчиками систем с качающимися зеркалами являются немецкий институт Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems (IPMS) и американская компания Microvision, сотрудничающими друг с другом [22].

На рис. 18 изображена структура и фотография микрозеркальной системы разработки Fraunhofer IPMS. Размер зеркала составляет единицы квадратных миллиметров, а частота развертки – десятки килогерц [23]. В Дрездене Fraunhofer IPMS имеет современные микроэлектронное оборудование, чистые технологические площади, обученный персонал и может выпускать до миллиона MEMS микрозеркал в год. Оба подвеса 2D зеркала в разработке Fraunhofer IPMS имеют электростатическое управление, а в разработке Microvision – внутренний подвес имеет электростатическое управление, а наружный – электромагнитное.

Компания Microvision использует лазеры для формирования полноцветного изображения, однако в настоящее время, единственным техническим решением, обеспечивающим требуемую световую мощность (10-20 Люмен для пико проекторов) и эффективность при малых габаритах является применение лазеров, излучающих в инфракрасном диапазоне на длинах волн 1064 и 1550 нм и системы нелинейной конверсии спектров. Красный цвет (631 нм) получают при сложении излучений обоих лазеров 1064 и 1550 нм, зелёный (532 нм) - удвоением частоты излучения 1064 нм, а синий (448 нм) – сложением излучения 1064 нм и удвоенной частоты излучения 1550 нм. Для получения изображения высокого разрешения лазеры должны иметь быстроедействие управление: частота модуляции при передаче мелких деталей может достигать сотен МГц.

Примеры дисплеев компании Microvision приведены на рис. 19. Следует отметить, что качающиеся микрозеркала практически не используются в офисных проекторах (со световым потоком более 1000 Люмен) из-за чрезмерной тепловой нагрузки на зеркало. Компания Microvision производит также Near-to-Eye (NTE) микродисплеи на основе качающихся микрозеркал, но из-за дороговизны используемых источников излучения, они находят лишь военное применение.



Рис. 18. Структура 2D микрозеркала (слева), микрозеркала в керамическом корпусе (в центре) и монохромного пико-проектора размером 17×7×5 мм (справа) [24]

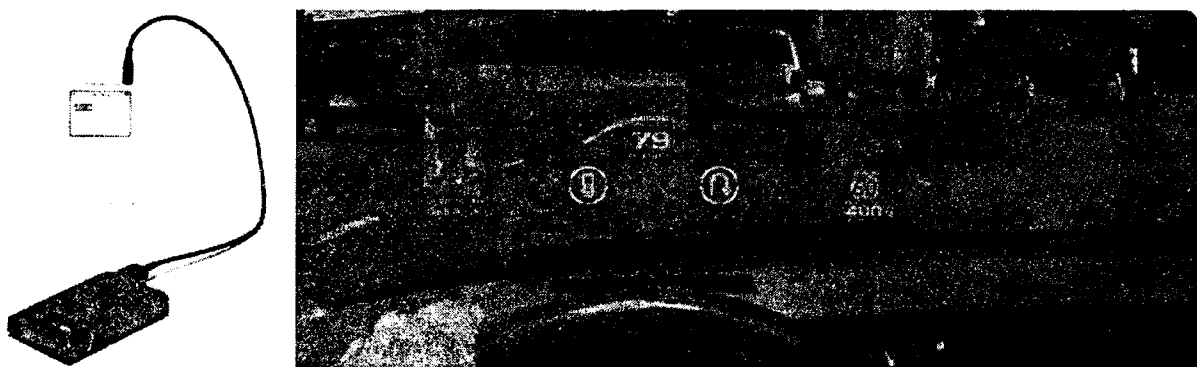


Рис. 19. Пико-проектор (слева) и автомобильный проектор на лобовое стекло (справа) [25]

MEMS дисплеи с решеткой световых затворов

При использовании линейки модуляторов света (решетки световых затворов) можно создать проектор с 1D дополнительной низкоскоростной разверткой и немодулируемыми лазерными источниками света. Соответствующая технология, получившая название Grating Light Valve (GLV), была разработана Дэвидом Блумом (David Bloom) в Станфордском университете. В настоящее время GLV устройства серийно производятся компанией Silicon Light Machines (US). Основу системы составляет решетка микрополосок, которые под действием электростатических сил могут менять свое состояние из отжатого в прижатое и возвращаться обратно под действием сил упругости (см. рис. 20). Если соседние полоски находятся в одинаковом состоянии, то они отражают свет, как плоское зеркало. Если же они находятся в различных состояниях (отличающихся по глубине на четверть длины волны), световые волны отражаются в противофазе и взаимно гасят друг друга. Схема полноцветного GLV дисплея приведена на рис. 21.

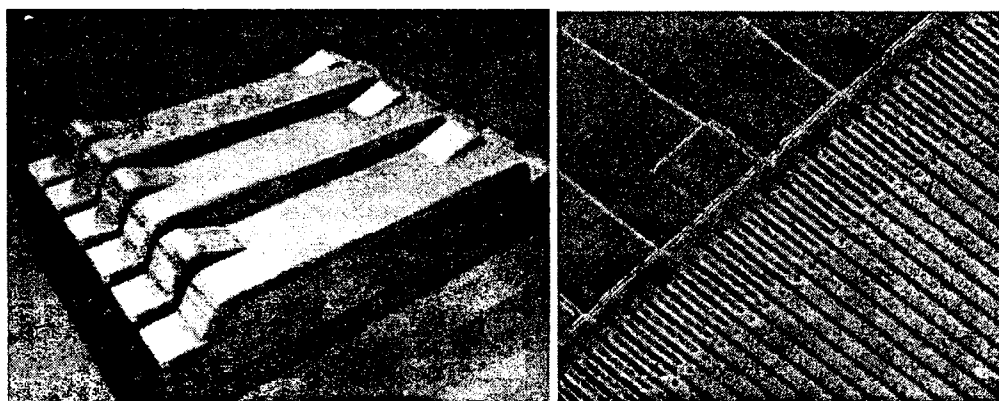


Рис. 20. Структура (слева) и микрофотография (справа) решетки световых затворов (справа) [26]

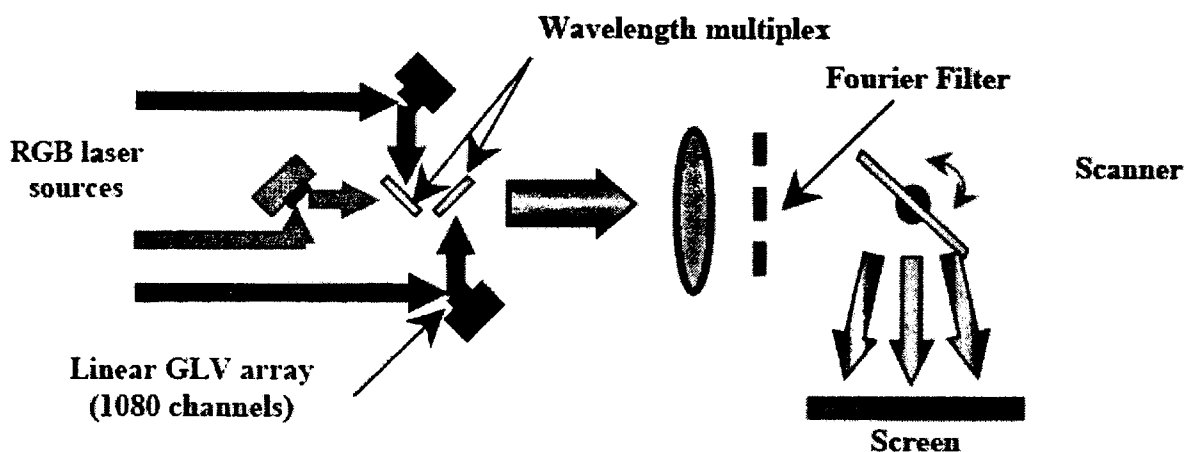


Рис. 21. Структура MEMS дисплея с решеткой световых затворов [26]

По GVL технологии построен 20 Мегапиксельный (4096×5120) проектор для авиатренажёра, установленного в центре подготовки военных пилотов США [27]. Период решётки составляет 3,7 мкм, длина полосок -200 мкм. Полоски дифракционной решётки состоят из плёнки нитрида + оксида кремния толщиной 100 нм, покрытых сверху слоем алюминия толщиной 30 нм. Полоски образуют микроконденсаторную структуру с общим электродом, расположенным на подложке под мостиками-полосками. К каждой полоске подходит свой сигнал управления. Под действием электростатических и упругих сил полоска может менять свое состояние за ~100 нс. Частота кадровой развёртки - 2 кГц. Модулятор имеет только бинарные состояния, поэтому формирование градаций серого осуществляется кодо-импульсным методом. С учетом того, что физиологическое время усреднения цвета ~ 100 мс, фактически это позволяет достичь TrueColor глубины цвета. Проблема выводов решается использованием гибридной технологии с формированием на базовой подложке кристалла GVL, межсоединений и 8-ми схем управления, монтируемых методом перевернутого кристалла.

MEMS матрицы модуляторов света

Использование вместо линейки матрицы затворов позволяет сформировать изображение без дополнительной системы развертки. Такое решение имеет неоспоримые преимущества, но является наиболее конструктивно и технологически сложным.

В 1987 году L. Hornbeck изобрел микромеханическое мультизеркальное устройство с цифровым управлением - матрицу жестких зеркал, имеющих всего два устойчивых положения. Коммерческие продажи начались в 1995 году. В настоящее время лидирующее положение на рынке подобных устройств занимает компания Texas Instruments, производящая MEMS DLP (Digital Light Processor) микродисплеи с годовым объемом выпуска, приближающимся к 10 млн.

Базовый элемент DLP представляет собой алюминиевое микрозеркало, которое крепится к жесткой подложке, через подвижные пластины соединенной с основанием матрицы. По углам пикселя размещены электроды, соединенные с ячейками статической памяти (CMOS SRAM). Под действием электрического поля подложка с зеркалом принимает одно из двух положений, отличающихся точно на $\pm 12^\circ$ благодаря ограничителям, расположенным на основании матрицы (см. рис. 22). Эти положения зеркала соответствуют отражению поступающего светового потока либо в объектив, либо в специальный светопоглотитель, обеспечивающий эффективный отвод тепла и минимальное рассеяние света.

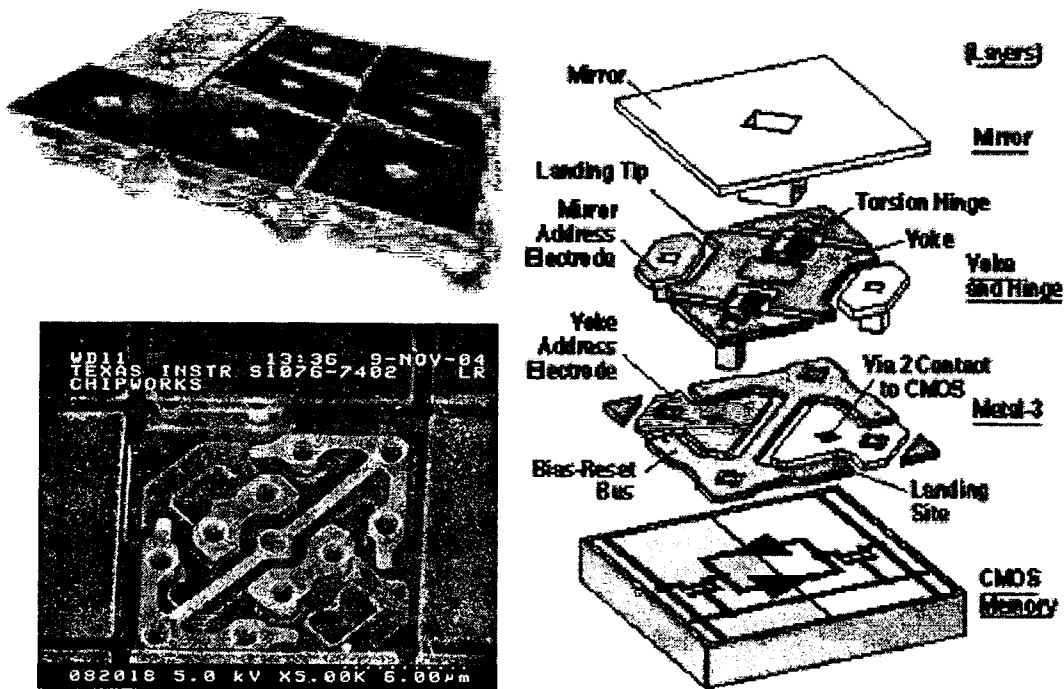


Рис. 22. Вид на DLP матрицу зеркал (слева сверху), вид на пиксель без зеркала (слева внизу) и структура пикселя (справа) [28]

Технология изготовления кристалла является достаточно сложной [29]. DLP микросхема S1076-7402 XGA содержит 1024×768 микрозеркал с шагом 13.7 мкм, каждое из которых сформировано поверх 5-ти транзисторной ячейки памяти. Используется 0.6 мкм КМОП процесс на p-/p+ эпитаксиальных кремниевых подложках. Схема содержит пять уровней металлизации: три для КМОП и два для MEMS. Разварка производится в керамический корпус, имеющий оптическое окно прозрачное в диапазоне от 275 до 2750 нм. Время переключения зеркала ~ 4 мкс, время успокоения зеркала ~ 15 мкс. Формирование градаций серого осуществляется кодо-импульсным методом, при частоте смены кадров 60 Гц достигается TrueColor глубина цвета.

Пико-проекторы (Pico projectors)

Появление спроса на пико-проекторы (встраиваемые в мобильные устройства или дополняющие их миниатюрные и экономичные проекторы). Наличие пико-проектора, даже способного работать лишь с небольшой экранной площадью (обычно не более формата A4, в то время как офисные проекторы работают с форматами A0 и более) и небольшим световым потоком (~ 10 Люмен, в то время как у офисных проекторов 1000 Люмен и более) значительно расширяет функциональные и потребительские возможности сотовых телефонов, портативных компьютеров и цифровых плееров.

По оценкам рыночных аналитиков, приемлемая цена для пико-проекторов в настоящее время составляет $\sim \$400$ и предполагается ее снижение в ближайшие годы до $\sim \$200$. Аналитики считают, что уже в 2008 году 0.0008% сотовых телефонов будет комплектоваться внешним пико-проектором; в 2009 – 0.038%, а 0.0007% - встроенным; в 2010 – 0.1% внешним и 0.034% встроенным; в 2011 – 0.18% внешним и 0.09% встроенным [30]. С учетом того, что годовой вы-

пуск сотовых телефонов уже давно перевалил за миллиард (см. рис. 4), уже в ближайшие годы выпуск пико-проекторов будет исчисляться миллионами.

Компании Texas Instruments и Microvision ожесточенно конкурируют, пытаясь захватить этот сегмент рынка. Microvision предлагает качающееся зеркало и RGB-лазеры, основу цены в этом наборе составляют лазеры. Texas Instruments предлагает пико-проектор на основе своего DLP со светодиодными источниками излучения и миниатюрной проекционной оптикой, основу цены в этом наборе составляет DLP микросхема. Если же для уменьшения размеров Texas Instruments также будет использовать лазеры, цена устройства вырастет почти вдвое. Лидер пока еще не определился, но ставки очень высоки (см. рис. 23).

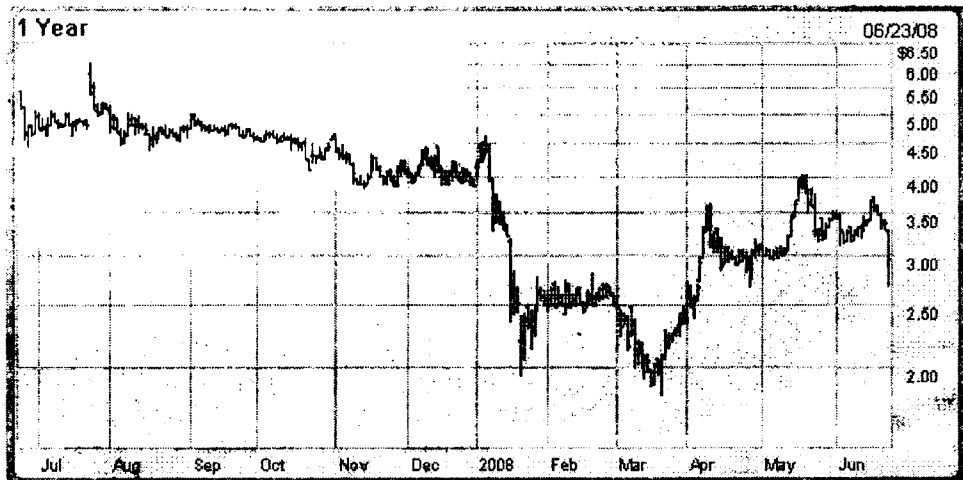


Рис. 23. Биржевые котировки акций компании Microvision [8 “MVIS”]
(В марте 2008 компания продемонстрировала прототип пико-проектора на CTIA Wireless 2008)

Заключение

Микродисплеи имеют свою рыночную нишу, которая динамично расширяется. Однако лидирующие дисплейные технологии (жидкокристаллические, плазменные и OLED) имеют ряд существенных физических и технологических ограничений при масштабировании. В настоящее время лидирующей технологией для микродисплеев является использование микроэлектромеханических систем, но для многих применений они пока еще чрезмерно дороги.

MODERN DISPLAYS: MINIATURIZATION ASPECTS

V.A. LABUNOV, P.V. JAGUIRO, P.S. KATSUBA, A.G. SMIRNOV

Abstract

The place of microdisplays in display classification and display market is discussed. Specific physical and technological restrictions of main display technologies for microdisplay applications are considered.

Литература

1. http://www.eurekalert.org/pub_releases/2008-01/uow-clw011708.php.
2. <http://www.ad-air.com/gallery>.
3. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/lcd/tech/ltps.htm>.
4. *Willem den Boer* Liquid crystal displays. Elsevier, 2005.
5. <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml;jsessionid=1?articleID=22102939>.
6. <http://optics.org/cws/article/industry/32411>.
7. Kopin Reports First Quarter 2008 Financial Results
<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=93548&p=irol-newsArticle&ID=1140758&highlight=>
8. <http://www.nasdaq.com>
9. http://www.laserfocusworld.com/display_article/73171/12/none/none/Feat/Semiconductor-manufacturing-techniques-for-ferroelectric-liquid-crystal-microdisplay.
10. Смирнов А., Пархомчук А., Матюшенко Д., Гореликов С. // Электронные компоненты. 2001. N 2. С. 6-14.
11. Смирнов А., Пархомчук А., Матюшенко Д., Гореликов С. // Электронные компоненты. 2001. N 3. С. 5-9.
12. *Moreau O., Curt J., Leroux T.* // Proceedings of SPIE. Vol. 4207. P. 20-31
13. SID, Eurodisplay. 2007, Tutorials, p. 5.
14. *Гуртовник А.Г., Точинский Е.Г., Яблонский Ф. М.* Электрoвакуумные приборы и основы их конструирования. М., 1988.
15. *Jaguero P.; Ferrari A.; Lazarouk S.* // Proceedings Electrochemical Society. 1998. PV-29. P. 194-205.
16. *Pope M., Kallman H., Magnante P.* // J. Chem. Phys. 1963. Vol. 38. P. 2042-2043.
17. *Tang C.W., VanSlyke S.A.* // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51. P. 913-915.
18. *Burroughes J., Bradley D., Brown A., Marks R., Mackay K., Friend R., Burns P., Holmes A.* // Nature. 1990. Vol. 347. P. 539-541.
19. *Kraft A., Grimsdale A., Holmes A.* // Angew. Chem. Int. Ed. 1998. Vol. 37. P. 402-428.
20. www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt0401a.pdf
21. <http://www.londonstockexchange.com>
22. http://www.ipms.fraunhofer.de/de/y2006/pr_061011micro.shtml
23. <http://www.ipms.fraunhofer.de/common/products/MSD/msm-e.pdf>
24. <http://www.ipms.fraunhofer.de/common/products/SAS/Systeme/laserprojektionsmodul-e.pdf>
25. http://www.microvision.com/pico_projector_displays/index.html
26. *Trisnadi J., Carlisle C.; Monteverde R.* // SPIE Proceedings. 2004. Vol. 5348. P. 52-64
27. *Самарин А.* // Современная электроника. 2007. N. 7. С. 14-19
28. <http://www.dlp.com/tech/default.aspx>
29. http://www.eetasia.com/ART_8800416404_480700_NT_a5fd45ee.htm
30. <http://insightmedia.info/emailblasts/2007-pico-projector.htm>