

МОЛИБДЕНОВАЯ И КРЕМНИЕВАЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛОСКИХ АВТОЭМИССИОННЫХ ЭКРАНОВ

КАКАЯ ПЕРСПЕКТИВНЕЕ?

Н. Дюжев, Ю. Тишин

Техника сегодняшнего дня немыслима без средств отображения информации (СОИ) – от простейших индикаторов до цветных кинескопов современных телевизоров и экранов компьютерных мониторов. Мировые продажи СОИ в 1999 году оценивались примерно в 36 млрд. долл. Они могли быть значительно больше, если бы существовала достойная альтернатива громоздким ЭЛТ с присущим им вредным рентгеновским излучением при анодных напряжениях более 15 кВ. Казалось бы, такой альтернативой могли стать интенсивно разрабатываемые свыше двух десятилетий плоские экраны на различных материалах и физических принципах: ЖК-, газоразрядные и электролюминесцентные. Однако ни один из них пока не в состоянии заметно потеснить на рынке более дешевые ЭЛТ, потребляющие меньшую энергию и превосходящие их по диапазонам цветовой гаммы и рабочих температур. В основном это связано с принципом генерации света в ЭЛТ – катодолюминесценцией. Поэтому серьезно противостоять ЭЛТ смогут лишь плоские экраны, также использующие для воспроизведения изображения явление катодолюминесценции, но лишенные их недостатков. Такие приборы есть, и имя им – плоские автоэмиссионные экраны.

Принцип генерации света плоскими автоэмиссионными экранами (ПАЭ) тот же, что у ЭЛТ – катодолюминесценция. Но в отличие от ЭЛТ, ПАЭ не потребляют энергии для разогрева катода. В ЭЛТ электронный пучок каждой из трех пушек с термокатадами попеременно пробегает каждый из элементов изображения RGB-триады. В ПАЭ каждому элементу изображения соответствует свой автоэмиссионный катод, эмитирующий электроны при подаче необходимого напряжения. Число таких катодов достигает сотен тысяч. Причем, если в цветной ЭЛТ теоретически не более ~30%, а практически не более 22-15% эмитированных электронов достигают люминофора [1], то в ПАЭ доля таких электронов близка к 100%. В результате световая эффективность ПАЭ (отношение излучаемого экраном светового потока, измеряемого в люменах, к затрачиваемой при этом мощности, измеряемой в ваттах) без учета потребляемой мощности системы управления при одинаковых анодных напряжениях в три-четыре раза выше, чем у ЭЛТ и приближается к значению световой эффективности люминофора. (При анодных напряжениях ~10 кВ световая эффективность порошковых катодолюминофоров в белом свете превышает 30 лм/Вт.)

В основе работы ПАЭ лежит эффект автоэлектронной (полевой) эмиссии – излучение электронов с поверхности твердого тела при высоких значениях напряженности электрического поля ($E > 10^7$ В/см). При этом зависимость плотности тока эмиссии от напряжения определяется известным уравнением Фаулера–Нордгейма [2]:

$$j \approx A \frac{(\beta U)^2}{\phi} \exp\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{\beta U}\right), \quad (1)$$

Представляем авторов статьи

ДЮЖЕВ Николай Алексеевич. Кандидат физ.-мат. наук, окончил Московский институт электронной техники в 1972 году. Начальник лаборатории ГНЦ “ГосНИИ физических проблем им.Ф.В.Лукина”. Имеет более 50 научных работ. Область интересов – устройства на основе автоэлектронной эмиссии.

ТИШИН Юрий Иванович. Доктор технических наук, окончил Московский физико-технический институт в 1972 году. Главный инженер ГНЦ “ГосНИИ физических проблем им.Ф.В.Лукина”. Имеет более 120 научных работ. Область интересов – устройства приема и отображения оптической информации, аналоговые и аналого-цифровые интегральные схемы.

Контактный телефон: 531-9849.

где A и B – константы, β – форм-фактор, или коэффициент, связывающий напряжение и величину напряженности поля у поверхности автоэмиссионного (холодного) катода $E = \beta U$ и зависящий от его геометрических размеров и взаимного расположения электродов. В конденсаторной структуре форм-фактор плоского катода $\beta = R^{-1}$. В диодной структуре с катодом в виде острия

$$\beta \equiv (\rho \ln(R/\rho))^{-1}, \quad (2)$$

а с катодом в виде лезвия

$$\beta \equiv (\sqrt{\rho R})^{-1}, \quad (3)$$

где R – расстояние *катод-анод*; ρ – радиус скругления вершины катода. Уравнения (1, 2 и 3) отражают сильную зависимость тока эмиссии от напряженности электрического поля, геометрических размеров катода и величины потенциального барьера на границе *катод-вакуум*. Так, при увеличении поля в два раза ток возрастает на три-пять порядков. Причем, как следует из (2) и (3), наиболее чувствительны к изменению радиуса скругления острые катоды.

Распространение ПАЭ сдерживают трудности изготовления катодов требуемой формы и обеспечения стабильности автоэлектронной эмиссии. Основные причины нестабильности эмиссии катодов – изменение их геометрических размеров в результате бомбардировки поверхности ионами остаточных газов и изменение потенциального барьера на поверхности вследствие адсорбции и химического взаимодействия с остаточными газами. Основную роль играет ионная бомбардировка, поскольку она активизирует все другие механизмы деградации катода. Расчеты показывают, что интенсивность ионной бомбардировки и, соответственно, скорость распыления поверхности катода зависят от анодного напряжения и прямо пропорциональны давлению остаточных газов и плотности тока эмиссии. При анодном напряжении менее 100 В интенсивность ионной бомбардировки резко уменьшается и исчезает при значениях напряжения, меньших, чем потенциал ионизации остаточных газов, величина которого колеблется от 12,6 эВ для O_2 и H_2O до 24,5 эВ для He.

Поскольку плотность тока эмиссии экспоненциально падает с увеличением толщины диэлектрического слоя на катоде, важную роль играет химическое взаимодействие нейтральных и ионизованных молекул остаточных газов с материалом на его поверхности. Но при $E \geq \epsilon\phi/d$ и $d < 2-3$ нм (d и ϵ , соответственно, – толщина и диэлектрическая проницаемость слоя) эмиссия практически не зависит от d [3]. Однако лишь небольшое число катодных материалов позволяют выполнить эти условия. Наиболее перспективный из них – кремний. Если для стабильной эмиссии металлических катодов требуется сверхвысокий вакуум, то стабильная эмиссия с кремниевых пленочных катодов, как было продемонстрировано ГосНИИФП, возможна в атмосферном воздухе в течение 7 тысяч часов [4].

Одно из основных требований к СОИ – обеспечение равномерной яркости свечения экрана. В ЭЛТ это достигается за счет высокой однородности люминофора и контроля тока электронного пучка. В ПАЭ для обеспечения равномерной яркости свечения по площади экрана не хуже $\pm 10\%$ от среднего значения необходимо прежде всего добиться равномерности эмиссионных свойств катодов. А это предполагает контролируемое формирование катодов и зазоров малых размеров ($\rho \equiv 10$ нм, $R \equiv 1$ мкм) с чрезвычайно малым разбросом величин ρ и R (порядка нескольких процентов). Из уравнений (2) и (3) следует, что к разбросу радиусов скругления лезвийных катодов предъявляются в два раза менее жесткие требования, чем к острым.

Поскольку в ПАЭ число электронных пучков равно числу элементов экрана, возникает дополнительная проблема, связанная с раз-

бросом токов пучков при едином управляющем напряжении. Ситуация усугубляется сильной зависимостью тока эмиссии от напряжения холодных катодов. Решить проблему можно путем применения в каждом элементе экрана управляемого генератора тока. Ток каждой ячейки может задаваться либо цифровым кодом, либо аналого-

вым сигналом в зависимости от конструкции генератора. Особенность генератора – наличие задающего ток катода регулируемого элемента с напряжением пробоя, близким к анодному напряжению (рис. 1). Падение напряжения на этом элементе равно 10-30% анодного напряжения (U_a), т.е. при $U_a = 5-10$ кВ оно превышает 1 кВ. Такое решение препятствует интегральному исполнению генератора и к тому же повышает энергопотребление экрана на 10–30%. По такому варианту со стабилизирующим резистором в цепи катода могут изготавливаться алфавитно-цифровые экраны. Однако в этом случае следует учитывать различие значений напряжения на катодах, что приводит к необходимости изоляции их друг от друга.

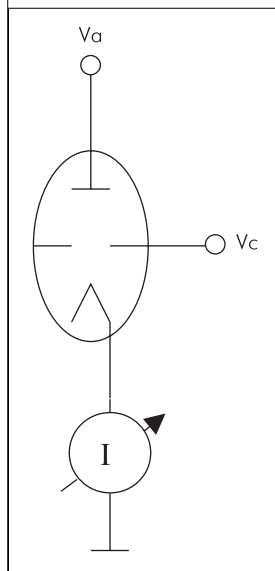


Рис. 1. Электрическая схема ячейки экрана с генератором тока

Второй вариант управления током пучка может быть реализован только в триодной ячейке экрана (рис.2). В этом случае ток каждого катода (и, следовательно, элемент экрана) определяется значением напряжения управляющего электрода, задаваемым выходным сигналом усилителя, на вход которого подается сигнал, пропорциональный току катода. При таком варианте напряжение схемы управления не превышает напряжения управляющего электрода, которое может быть менее 100 В и даже составлять 10 В. Благодаря этому появляется возможность изготовления всех схем управления на одной подложке с катодами, что позволит существенно снизить стоимость и повысить надежность ПАЭ. Вместе с тем, к технологическим проблемам создания надежного катодного узла с воспроизводимыми параметрами добавляется схемотехническая проблема управления током каждой ячейки ПАЭ, осложняемая достаточно большими рабочими напряжениями экрана.

В простейшем диодном варианте ПАЭ строки объединяют катоды, расположенные на нижней (катодной) пластине, а столбцы – участки катодолюминофора, нанесенного на прозрачную анодную пластину. При подаче напряжения на катодную строку и анодный столбец в области их пересечения создается необходимая для автоэлектронной эмиссии напряженность электрического поля. Несмотря на кажущуюся простоту и дешевизну, этот вариант не лишен определенных недостатков. Это прежде всего – высокая стои-

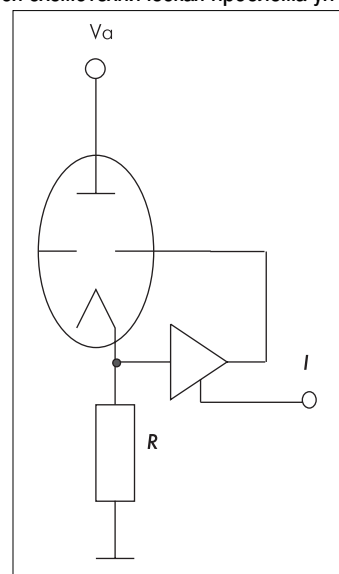


Рис. 2. Электрическая схема ячейки экрана с регулировкой тока по сеточному напряжению

мость. Во всех известных диодных ПАЭ рабочее напряжение *катод-анод* превышает 300 В, а это значит, что стоимость всех драйверов даже для экрана VGA-формата (320x240x3 пикселей) составляет несколько тысяч долларов независимо от его размера. Серьезные трудности вызывает и обеспечение равномерности зазора *катод-анод* по всей площади экрана, и устранение любых частиц из межэлектродного пространства (при том, что на практике используются порошковые катодолюминофоры). Поэтому известные фирмы серьезно не рассматривают этот вариант.

Все крупные проекты предусматривают разработку триодного варианта с дополнительным управляющим тонкопленочным металлическим электродом (сеткой), отстоящим от вершины катода на доли микрометра (рис. 3). В таком экране строки по-прежнему образуют катоды на нижней пластине, а столбцы – элементы сетки. Катодолюминофорные участки одного цвета на верхней прозрачной пластине также объединены в строки с общим для каждого цвета

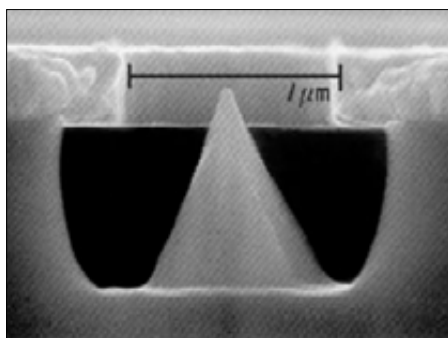


Рис.3. Поперечный разрез триодной катодной матрицы с молибденовыми катодами (источник – рекламный буклет фирмы Futaba)

потенциалом. Благодаря малому зазору *катод-сетка* управляющее напряжение невелико – обычно не более 100 В, стоимость драйверов также достаточно низкая. В этой конструкции не предъявляются жесткие требования к величине и равномерности зазора *катод-анод*. И, что важно, можно произ-

вольно выбирать напряжение катодолюминофора, так как благодаря взаимному расположению электродов эмитируемые электроны будут бомбардировать анод, даже если его напряжение меньше напряжения сетки. В результате при использовании современных катодолюминофоров с значениями рабочего напряжения менее 20 В и порогом распыления более 20 эВ (а таких сегодня множество) можно существенно снизить ионную бомбардировку и даже устранить ионное распыление катода.

Важный параметр ПАЭ – величина анодного напряжения. С его увеличением растет световая эффективность люминофора (с 3 лм/Вт при 25 В до 36 лм/Вт при 25 кВ). Но наряду с этим на несколько порядков возрастают скорость распыления поверхности катода и уровень рентгеновского излучения, а также возникают проблемы изоляции катодной пластины от анодной. Сегодня для изготовления катодных ячеек с управляющим электродом наиболее широко используется технология, предложенная в США в начале 60-х годов С.А. Спиндтом [5]. Именно на эту технологию ориентированы все крупные зарубежные проекты. Первоначально на поверхность проводящей подложки наносят слои диэлектрика и металла. После создания в пленке металла отверстий диаметром менее 1 мкм слой диэлектрика стравливают до подложки. Затем на вращающуюся подложку одновременно напыляют, под углом 10 – 15°, слой маскирующего материала, частично затягивающий отверстия, и, перпендикулярно поверхности подложки, – слой материала катода, обычно молибдена. В итоге на дне отверстия формируется конус из молибдена с радиусом скругления острия менее 10 нм. Существенный недостаток метода – необходимость обеспечивать равенство углов напыления материала катода по всей поверхности подложки. Это возможно лишь в центральной ее части, диаметр которой зависит от расстоя-

ния между подложкой и навеской с молибденом, из которой испаряется молибден. Поэтому для изготовления экранов с размером по диагонали 10” (25,4 см) используются специализированные установки электроно-

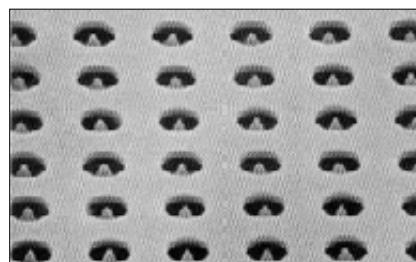


Рис.4. Фрагмент "спиндтовой" катодной матрицы с молибденовыми катодами, иллюстрирующий разброс по величине радиуса скругления вершины катода (источник – рекламный буклет фирмы Futaba)

лучевого напыления металлов с высотой вакуумной камеры до 5 м. К тому же, в технологии Спиндта наблюдается заметный разброс радиуса скругления острия даже близко расположенных катодов (рис.4). Для выравнивания токов и предотвращения чрезмерного увеличения локальных токов эмиссии используют специальный резистивный слой, соединяющий отдельные эмиссионные области.

Основные достоинства этой, так называемой молибденовой, технологии – возможность изготавливать катоды на относительно дешевой стеклянной подложке и их высокая плотность тока эмиссии. Но недостатков больше. Во-первых, молибден активно взаимодействует с остаточными газами, и для обеспечения приемлемой стабильности эмиссии и длительного срока службы в экране должен быть сверхвысокий вакуум (давление в экране фирмы Futaba – примерно 10⁻¹¹ мм рт. ст.). Во-вторых, максимальные размеры обрабатываемой пластины определяются размерами установки вакуумного напыления молибдена, т.е. в стандартной системе можно обрабатывать пластины с размером по диагонали не более 3” (75 мм). В-третьих, значения управляющего напряжения сетки велики (в экранах всех известных фирм пороговое напряжение *катод-сетка* превышает 80 В). В-четвертых, с помощью этой технологии можно изготавливать только острые катоды. И последнее: большинство ключевых патентов на молибденовую технологию или права на производство ПАЭ по ней принадлежат иностранным фирмам.

Сегодня ПАЭ по молибденовой технологии выпускают, да и то малыми сериями, лишь несколько фирм – PixTech, Futaba и Micron Display Technology (табл.).

Кроме того, в июне 1999 года фирмы Candenscent и Sony объявили о начале совместной разработки 13,2-дюймового цветного экрана SVGA-формата (800x600 пикселей), а в ноябре 1999 года фирмы PixTech и Micron Display Technology – о программе разработки для Армии США 12,1-дюймового экрана сначала монохромного (800x600 пикселей), а затем цветного (768x1024 пикселей).

Среди многочисленных альтернативных методов изготовления ПАЭ следует выделить технологию, разработанную в ГосНИИ физи-

Технические характеристики современных монохромных ПАЭ

Параметры	Фирма		
	PixTech	Futaba	Micron
Формат, пикселей	320x240	640x480	548x222
Размер по диагонали, дюйм	5,2	7,25	0,55
Активная область, мм	105,6x79,2	147,2x110,4	–
Шаг, мм	0,33	0,23	0,025
Яркость, кд/м ²	100	200–450	100–1000
Пороговое напряжение <i>катод-сетка</i> , В	80	60	80
Анодное напряжение, В	240	200–500	1200
Частота кадров, Гц	50–350 (τ=20 мкс)	–	–
Угол обзора, град.	160	160	160
Рабочая температура, °С	-20...+70	-30...+70	-30...+80

Примечание. Цвет свечения всех экранов – сине-зеленый.

ческих проблем им. Ф.В. Лукина. Ее принципиальная особенность – применение стандартных операций полупроводниковой технологии для формирования лезвийных автокатодов на кремниевых монокристаллических подложках. Зазор *катод-сетка* в этой технологии задается толщиной слоя двуокиси кремния. По этой технологии на стандартном технологическом оборудовании можно формировать матрицы лезвийных катодов с радиусом скругления менее 30 нм и зазором *катод-сетка* около 0,3 мкм (рис.5).

Основные достоинства “кремниевой” технологии – наличие собственного окисла, обеспечивающего стабильность эмиссионных свойств катода даже в химически активной газовой среде, а также возможность формирования как острых, так и лезвийных катодов с большим сроком службы. Изготавливаются ПАЭ на стандартных технологических линиях по производству кремниевых ИС или активных ЖК-экранов. Управляющее напряжение сетки – низкое (в изготовленной ГосНИИФП катодной матрице пороговое напряжение *катод-сетка* равно ~20В). Все это способствует продолжительному сроку службы ПАЭ (более 10 тыс. ч при вакууме $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.). И наконец, эта технология “патентно независимая”.

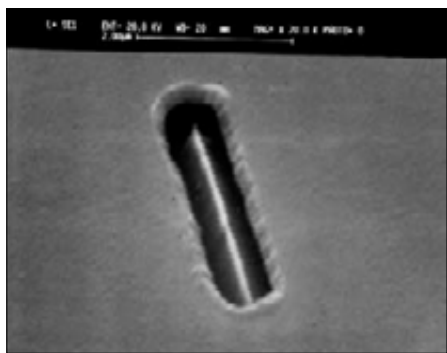


Рис.5. Лезвийный “кремниевый” катод (фотография ГосНИИФП)

К тому же, “кремниевая” технология позволяет создавать принципиально новые конструкции экрана. Так, для обеспечения непрерывного облучения катодолюминофора электронами с целью получения максимальных значений эффективности, яркости и срока службы экрана в каждом элементе изображения размещается транзисторный ключ, позволяющий в совокупности с емкостью запоминать и поддерживать заданное значение яркости в течение всего времени воспроизведения кадра (так называемый матричный активный экран). В такой конструкции на одной кремниевой подложке размещаются катодная матрица, твердотельные транзисторы системы управления и ключи активной матрицы. Реализация ПАЭ с активной матрицей позволит получить яркость в несколько тысяч кандел на квадратный метр.

Но и кремниевая технология имеет свои недостатки. Размер экрана зависит от диаметра пластины, а современное стандартное технологическое оборудование рассчитано на обработку кремниевых пластин диаметром до 200 мм (к обработке 300-мм пластин полупроводниковые фирмы только-только приступают).

И все-таки, кремниевый ПАЭ предпочтительнее молибденового, особенно для применений в тяжелых условиях эксплуатации. Конструкция ПАЭ позволяет собирать его из любого числа кремниевых пластин, причем при сборке экрана из четырех пластин искажения изображения можно избежать. И даже в условиях современного российского производства можно изготовить полноцветный 12”-экран (четыре 150-мм пластины), воспроизводящий изображение без искажения. Возможно и создание экрана большего размера, но уже с заметным эффектом “сетки”. На оборудовании для производства активных ЖК-экранов пятого поколения, позволяющем обрабатывать пластины размером 960x1100 мм, можно было бы изготавливать самые разнообразные типы экранов.

Таким образом, наилучшая совокупность характеристик ПАЭ может быть получена при изготовлении катодного узла на кремниевой

подложке. Эта технология позволяет создавать ПАЭ, в которых на одной подложке помимо катодов располагаются активная матрица переключающих транзисторов и схемы управления. Все это приводит к повышению яркости и надежности экрана. Кроме того, в “кремниевых” ПАЭ могут быть использованы низковольтные люминофоры, что значительно упрощает конструкцию и технологию производства экрана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство цветных кинескопов/Под ред. В.И. Барановского. – М.: Энергия, 1978.
2. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966.
3. Дюжев Н.А., Кадников А.А., Козлов А.И. и др. Влияние геометрических параметров кремниевых автоэмиссионных катодов на их эмиссионные свойства. – Радиотехника и электроника, 1990, №11, с. 2385-2389.
4. Djuzhev N.A., Ammosov R.M., Ishkarin A.B. Vacuum devices with the silicon field cathode. – SEMI CIS Executive Mission and Exhibit. Program directory and product guide. – Zelenograd. Russia, June 1-4, 1998, p.64-65.
5. Spindt C.A. A thin film field emission cathode. – J. Appl. Phys., 1968, v.39, p.504-3505.

Представляем книгу постоянного автора журнала.

Виктор Беляев. Дисплеи 90-х годов.

М.: Российское отделение Общества информационных дисплеев, 2000 – 92 с.

В книге рассмотрены современные разработки и изделия, относящиеся к средствам отображения информации. В разделе “Современное состояние рынка и разработок электронных дисплеев”, открывающем книгу, проанализирована динамика продаж и производства дисплеев различных типов, их распределение по размерам и разрешению, дается прогноз характеристик дисплеев на ближайшее десятилетие. Подробно описаны современные технологии: на основе эффектов катодолюминесценции (используемые в ЭЛТ, полевых эмиссионных и вакуумно-люминесцентных дисплеях), электролюминесценции в твердых и органических пленках, газового разряда в плазме, различных электрооптических эффектов в жидких кристаллах. Одна из глав раздела посвящена методам формирования объемного изображения. В разделе “Дисплейные новинки 1999 года в России и за рубежом” описаны разработки, экспонировавшиеся в 1999 году на конференции и выставке “ЕвроМонитор-99” в Москве, 19-й исследовательской конференции по дисплеям “ЕвроДисплей’99” в Берлине, выставке и конференции “Электронные информационные дисплеи’99” в Лондоне. Анализируется соответствие отечественного уровня разработок международному. Показано, что практически все направления дисплейных разработок в мире имеют аналоги в России и странах СНГ. Это подтверждено интересом, проявленным в 1999 и 2000 годах к стенду “Русский форум” на выставке в Лондоне и к секции “Плоскопанельные дисплеи в Восточной Европе”, впервые организованной в Берлине.

Уникальная информация собрана в разделе “Международные программы по разработке и внедрению новых дисплейных продуктов”. В нем показан процесс формирования в течение последних 15 лет нового гиганта с международным капиталом – компании IBM/Toshiba, ставшей лидером в производстве ЖК-мониторов и дисплеев для “ноутбуков”. Приведены программы, проводимые в США в рамках “Стратегической плоскочелюстной инициативы” для укрепления национальной безопасности, а также программы Великобритании, Японии, Беларуси и Южной Кореи. Завершает книгу раздел “Автомобильные системы обработки и отображения информации”, в котором рассмотрены американские и японские интеллектуально-транспортные системы, дается оценка современным дисплейным технологиям с точки зрения применения их в автомобиле, приведены различные схемы расположения дисплея внутри автомобиля и экономические перспективы производства автомобильных дисплеев.

И еще о двух особенностях книги. Во-первых, вся она построена на материалах, имеющихся в России в одном-трех экземплярах. Во-вторых, – это первый опыт издательской деятельности Российского отделения Общества информационных дисплеев, которое с 1997 года активно способствует развитию международных связей и информированию научно-технической общественности о достижениях в рассматриваемой области.