

УДК 535.012.2:535.557:621.389

В. В. Беляев

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ И ФОТОНИКИ

Московский государственный областной университет
ул. Радио, д. 10а, 105005 Москва, Россия. E-mail: vic_belyaev@mail.ru

В обзоре исследуется современное состояние применений различных типов жидкокристаллических (ЖК) устройств, прежде всего для средств отображения информации (дисплеев) и некоторых задач управления светом (фотоники). Дисплей рассматривается как комплексная система. Кроме жидких кристаллов и электрооптических эффектов в них, рассматриваются практически все компоненты ЖК устройств, существенно влияющие на их эксплуатационные и визуальные характеристики. Даются краткие сведения о рынке этих устройств и его различных сегментах. Особое внимание обращается на компоненты, технологии и применения, описание которых в литературе на русском языке не представлено на современном уровне.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, дисплеи, фотоника.

DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.7

V. V. Belyaev

PROMISING APPLICATIONS AND TECHNOLOGIES OF LIQUID CRYSTAL DISPLAYS AND PHOTONICS DEVICES

Moscow Region State University
Radio str., 10a, 105005 Moscow, Russia. E-mail: vic_belyaev@mail.ru

To-date applications of different types of liquid crystal devices are reviewed. Main applications presented relate to displays and some problems of light control (photonics). The display is considered as a complex system. Besides the liquid crystals (LC) and electrooptic modes almost all LC device components that effect on the LCD operation and visual performances are reviewed. Brief data on the LC devices market and its segments are presented. Special attention is paid to the components, technologies and applications poorly described in the Russian literature.

Key words: liquid crystals, displays, photonics.

1. Введение

Главным применением жидких кристаллов вот уже около 50 лет является их использование в качестве рабочего элемента плоскопанельных дисплеев (ППД). Основные электрооптические эффекты и их физическая основа описаны в монографиях и обзорах [1–3]. Необходимость улучшения технических и эксплуатационных характеристик жидкокристаллических дисплеев потребовала развития вспомогательных оптических элементов, в которых также часто используются ЖК.

В последние годы появилось множество технических решений и научных публикаций о возможности применения ЖК в качестве перспективных элементов органической электроники, микроэлектромеханических систем устройств (МЭМС), фотовольтаических элементов, различных датчиков, в том числе и биологических. Среди них особое место занимают различные устройства фотоники. В данном обзоре некоторые эти технологии рассматриваются только с точки зрения их применимости в ППД.

Для составления обзора автором использованы источники информации, к которым далеко не всегда есть доступ российским специалистам, например, сборники трудов симпозиумов и конференций международного дисплейного общества и международного жидкокристаллического общества.

2. Устройство ЖК-дисплея и применяемые в нем технологии

Даже самый простой жидкокристаллический дисплей (ЖКД) является сложным устройством, сочетающим в себе компоненты и материалы, относящиеся к оптике, оптоэлектронике, микроэлектронике и другим высокотехнологическим отраслям промышленности. Единичным элементом отображения дисплея является *пиксель*, в котором осуществляется переориентация ЖК под действием приложенного к этому пикселю электрического поля. Эта переориентация приводит к изменению эффективной величины показателей преломления ЖК и при использовании поляризаторов – к изменению интенсивности проходящего через этот пиксель света.

Типичный ЖК-дисплей имеет компоненты, представленные на рис. 1. Рассмотрим современные тенденции улучшения характеристик этих компонентов с точки зрения повышения качества изображения, формируемого дисплеем.

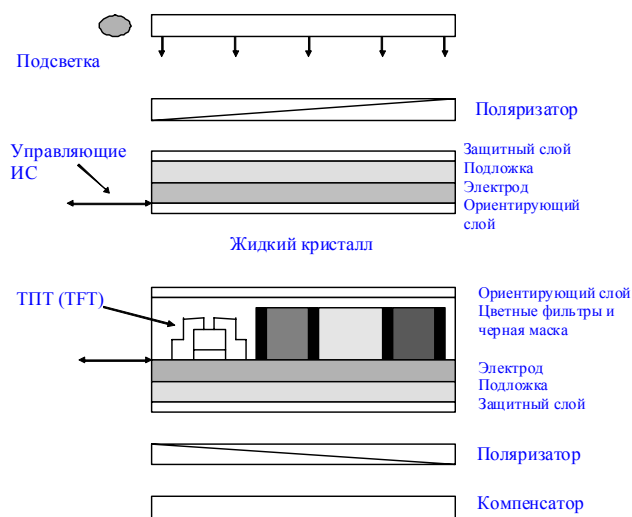


Рис. 1. Основные компоненты ЖК-дисплея

Формирование цвета. Каждый пиксель ЖКД разделяется на три части (подпикселя, или субпикселя), модулирующие интенсивность красного, синего и зеленого света (КЗС, по-английски RGB – Red, Green, Blue). Каждый подпиксель (*sub-pixel*) управляется своим электронным сигналом, поэтому при таком построении можно реализовать практически все цвета воспринимаемой нами гаммы.

Предпринимаются попытки улучшить цветовую гамму дисплея и его световую эффективность путем изменения структуры пикселя. Кроме трех основных цветов, соответствующих вершинам цветового треугольника в стандартной цветовой диаграмме, предлагалось использовать еще три промежуточных цвета. Это позволило бы перекрыть почти всю эту диаграмму. Ясно, что тогда каждый пиксель надо делить не на три, а на шесть частей, каждая из которых управляется самостоятельно. Такое решение приведёт к удорожанию производства и существенному усложнению электронной схемы управления дисплеем.

Интересным представляется техническое решение американской компании *Nouvoyance* (ранее – *Clairvoyante*) [4]. Технология *PenTile* предусматривает добавление белого субпикселя к обычной триаде цветов и изменение их расположения. Такое решение позволяет вдвое увеличить пропускание дисплея и в полтора раза уменьшить количество управляющих микросхем для стока транзистора (*Source drivers*).

В ЖК-дисплеях, выпускаемых промышленностью, сейчас используются три вида *электрооптических эффектов*: твист-эффект (TN mode) [1], планарное переключение (IPS, или *In-Plane-Switching mode*) [5, 6], переключение вертикально (гомеотропно) ориентированного НЖК (VAN, или *Vertical Alignment Nematic*) [7]. В российской литературе последний режим часто называют В-эффектом (от Bend – эффект управляемой деформации продольного изгиба).

Во всех этих эффектах происходит переориентация ЖК под действием приложенного электрического поля, изменяется фаза и поляризация прошедшего света. При использовании второго поляризатора (анализатора) происходит модуляция интенсивности света, прошедшего

через ячейку, помещенную между поляризаторами.

Поскольку в литературе на русском языке суть твист- и В-эффектов изложена достаточно хорошо, остановимся подробнее только на эффекте планарного переключения и сообщим сведения о некоторых новых перспективных электрооптических эффектах.

При использовании режима планарного переключения (рис. 2) начальная ориентация ЖК планарная (параллельная подложкам) во всем объеме ЖК. В отличие от твист- и В-эффектов, электрическое поле направлено не поперек плоскости подложек, а параллельно им и ортогонально к направлению ориентации ЖК. Такая конфигурация поля получается за счет особой системы расположения управляющих электродов. Они выполнены в виде полосок проводящего материала, к парам этих полосок приложены потенциалы противоположного знака. В результате ЖК поворачивается по полю и при большой величине напряжения почти весь ЖК переориентирован перпендикулярно начальному состоянию. При использовании IPS-эффекта достигаются наилучшие угловые характеристики ЖК-дисплея и малое время переключения.

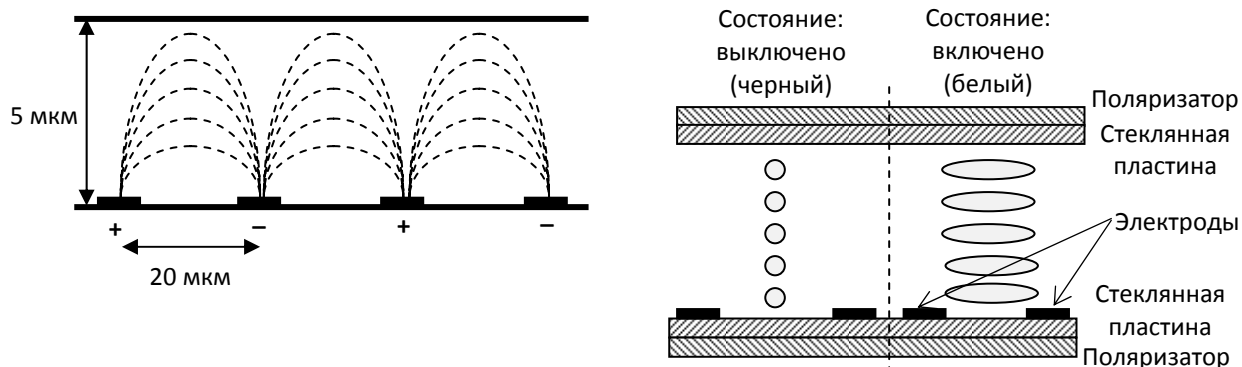


Рис. 2. Режим планарного переключения (IPS), структура электрического поля и ориентация ЖК в ЖК ячейке

Для улучшения контраста и углов обзора разработаны новые варианты организации электродов и ориентации ЖК внутри пикселей. Если в IPS-пикселе расстояние между электродами сравнимо с толщиной слоя ЖК или больше нее, то при более частом расположении электродов (режим *Fringe Field Switching*, FFS, или переключение краевого поля) [8, 9] градиент

электрического поля становится более выраженным, поле глубже проникает внутрь слоя ЖК, и большая часть ЖК переориентируется поперёк системы электродов. Благодаря этому увеличивается контраст. А благодаря меньшему расстоянию между электродами увеличивается быстродействие дисплея.

В дисплеях с вертикальной ориентацией (В-или VAN-режимы) идут несколькими путями для улучшения углового диапазона устройства. Для формирования областей наклона ЖК в разные направления, как по вертикали, так и по горизонтали, создают пространственно неоднородные структуры. В варианте PVA (*Patterned-ITO Vertical Alignment*, или вертикальная ориентация с узорным расположением прозрачных электродов; рис. 3) разнонаправленный наклон создают путем сдвига электродов с разным потенциалом напряжения на противоположных подложках дисплея. В вариантах MVA (*Multi-Domain Vertical Alignment*, или многодоменная вертикальная ориентация, рис. 4) разнонаправленный наклон создают в разных частях пикселя; типичным исполнением является четырехдоменный пиксель с разными

наклонами по вертикали и горизонтали [10]. Наблюдатели, рассматривающие изображение под разными углами, видят картинку почти одинакового качества.

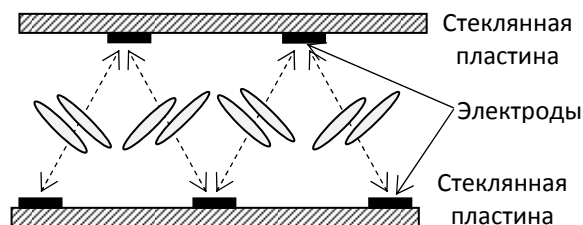


Рис. 3. Новые варианты организации электродов и ориентации ЖК внутри пикселей ЖКД с широким углом обзора. PVA (*Patterned-ITO Vertical Alignment*, или вертикальная ориентация с узорным расположением прозрачных электродов)

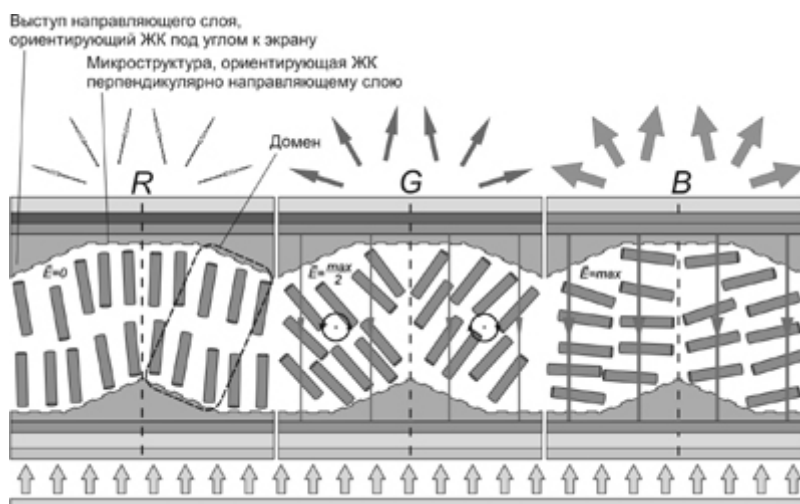


Рис. 4. Структура пикселя в MVA-технологии (многодоменная вертикальная ориентация)

Для создания ЖКД с углом обзора, равным половине телесного угла (почти 180° как по вертикали, так и по горизонтали) структуру пикселя усложняют еще больше. В MVA-дисплеях на подложках внутри каждого пикселя формируют выступы в виде треугольных призм с углом при вершине, на несколько градусов отличающимся от развернутого. При этом на противоположных подложках положение этих выступов отличается по фазе на полпериода. В больших панелях Samsung (100 дюймов $\approx 2,5$ м по диагонали и больше) применяют технологию S-PVA (*Super-Polydomain Vertical Alignment*, или супер-

полидоменная вертикальная ориентация) [10], где используются не только описанные решения, но и управление ориентацией ЖК (а, соответственно, и пропусканием элемента) осуществляется разными транзисторами в одном таком пикселе. Ряд фирм разгораживают пиксели и их части вертикальными стенками, на которых создают специальные граничные условия, а для увеличения углов обзора эти пиксели располагают в виде матрицы не прямоугольников, а шевронов. В [11] разный наклон ЖК внутри пикселя обеспечивается X-образной формой электрода.

Кроме нематических ЖК для создания новых типов дисплеев, используются и другие ЖК-фазы. Реальное применение нашли бистабильные дисплеи небольшой информационной емкости с начальным рассеивающим состоянием (конфокальная текстура холестерического ЖК) и возникающим под действием электрического поля прозрачным состоянием. Известны способы добавки ХЖК в нематические смеси для формирования среды для электронной бумаги (раздел 3.3) или быстрого электрооптического отклика для стерео-дисплеев.

Довольно давно идут исследования возможности создавать быстродействующие дисплеи на основе электрооптических эффектов в *сегнето-электрической фазе смектических С ЖК*. Однако в промышленных технологиях эти эффекты не используются, хотя в отдельных прототипах многие недостатки этой фазы преодолеваются: бездефектный объем СЭЖК, формирование градаций серого, восстановление изображения после механического воздействия на СЭЖК ячейку и др. [12, 13]. Более надежным может оказаться другой сегмент рынка, в котором быстродействие СЭЖК может обеспечить их использование в очках для стереотелевидения (см. раздел обзора 3.4).

Для так называемых «умных окон» перспективными считаются до сих пор ЖК, диспергированные в полимере (ПДЖК или PDLC), имеющие два устойчивых состояния – рассеивающее и прозрачное [14].

В последние несколько лет возникла новая ЖК-технология, которая может обеспечить создание устройств со сверхбыстрым (субмиллисекундный диапазон) электрооптическим откликом. Это *голубая фаза* (Blue Phase Liquid Crystals, BPLC), представляющая собой упорядоченную систему дефектов, каждый из которых имеет хиральное строение (рис. 5). Поскольку литературы о применении таких систем на русском языке пока еще нет, приведем краткие сведения об электрооптических эффектах в голубой фазе, возможных областях ее применения, достоинствах и недостатках технологии.

На рис. 5 схематически показано расположение дефектов в голубой фазе и прохождение поляризованного света через такую структуру [15]. Предположим, что свет падает в положительном направлении оси z , как показывает стрелка

на рис. 5, б. Оптическая ось каждого цилиндра, образующего дефектную структуру голубой фазы, направлена по одному из трех пространственных направлений. Оптическая активность каждого цилиндра иллюстрируется способностью преобразовать линейно поляризованный свет в эллиптически поляризованный (в общем случае) на рис. 5, а.

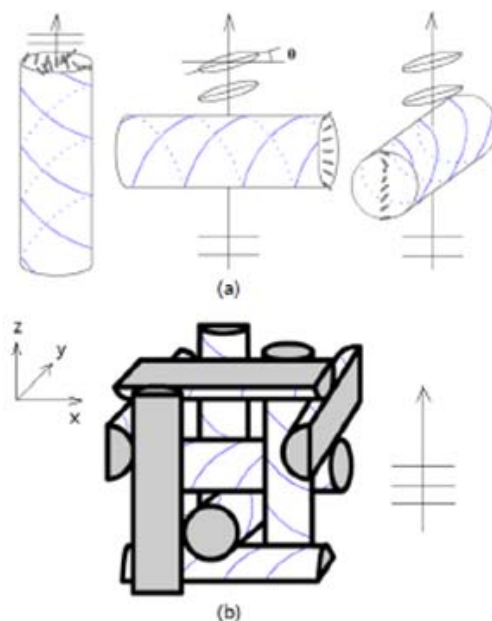


Рис. 5. Схематическое расположение дефектов в голубой фазе и прохождение поляризованного света через такую структуру

Из-за хаотической ориентации доменов, состоящих из дефектов, падающий свет может распространяться в цилиндрах в любом направлении. Для простоты рассмотрим три основные конфигурации расположения цилиндров, когда волновой вектор параллелен или перпендикулярен оси цилиндра.

Для цилиндра, расположенного слева на рис. 5, а, свет распространяется вдоль оси цилиндра. Молекулы ЖК в цилиндре ориентированы по всем направлениям одинаково. Поэтому поляризация падающего света не изменяется и цилиндр кажется оптически изотропным. Однако для двух других расположений цилиндра распространение света перпендикулярно его оси. При прохождении света от одной стороны цилиндра до другой он будет с ЖК, директор которого закручен на 90° .

Закрученная ориентация ЖК будет влиять на поляризацию света. В общем случае свет на выходе ЖК будет эллиптически поляризован и повернут на некоторый угол от направления начальной поляризации. Этот эффект аналогичен случаю прохождения света через очень тонкую твист-ячейку.

Аналогом электрооптического отклика в голубой фазе, в частности активно разрабатываемой полимерно-стабилизированной голубой фазе, является давно известный, в том числе и в ЖК, эффект Керра. Первая теория была предложена еще в 1985 г. П. Р. Гербером [16]. Примерами развития теории и получения экспериментальных данных по этому направлению являются [17, 18].

Согласно современной модели [18], для голубой фазы постоянная Керра K описывается соотношением $K \sim \Delta n^* [\epsilon_0 \Delta \epsilon P^2 / k \lambda (2\pi)^2]$, где Δn – двулучепреломление, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $\Delta \epsilon$ – диэлектрическая анизотропия, P – шаг спирали в голубой фазе, k – средний коэффициент упругости, λ – длина волны света.

Характеристиками голубой фазы (BPLC, *Blue Phase Liquid Crystal*), привлекательными для практического применения в дисплеях и других электрооптических устройствах, являются время электрооптического отклика менее миллисекунды, отсутствие необходимости ориентировать ЖК, стабильное черное состояние в отсутствие электрического поля из-за оптической изотропности голубой фазы, возможность управлять светом в видимом диапазоне из-за малого шага периодической трехмерной структуры фазы. В последние годы температурный диапазон голубой фазы расширен с нескольких градусов до 60 К благодаря стабилизации дефектов в полимерной матрице [19]. Актуальными задачами для практического внедрения остаются гистерезис, остаточное двулучепреломление, высокое управляющее напряжение. Способами улучшения характеристик полимерно-стабилизированной голубой фазы являются использование ЖК-компонентов с большой постоянной Керра, полимерной системы с реагирующими разбавителями, оптимизации структуры устройства, в основном, за счет конструкции электродов (протравленный электрод, электрод в виде стенки, электрод для переключения вертикальным электрическим полем).

Для улучшения управления ячейкой с голубой фазой ЖК и повышения постоянной Керра

материал легируют не только органическими веществами с повышенной проводимостью, но и графеном, функциолизованным полианилином (G-PANI) [19].

В Китае разработан ЖК-материал с голубой фазой NTG-135200, обладающий очень большой диэлектрической анизотропией $\Delta \epsilon = 99$ при 25 °С при хорошем двулучепреломлении $\Delta n = 0,205$ на длине волны 633 нм и высокой точкой просветления 99 °С. И хотя вращательная вязкость (700 мПа*с) велика, свойства материала можно изменять, используя разбавители, например, производные бициклогексана [20].

С использованием голубой фазы создан прототип бесполяроидного ЖКД на основе интерференции света [21]. Каждый субпиксель представляет собой интерферометр Фабри-Перо, вырезающий из видимого спектра узкую полосу. Она становится еще уже благодаря подсветке с квантовыми точками.

По способу управления электрическим сигналом ЖК-дисплеи разделяются на пассивно-матричные и активно-матричные (ПМ и АМ ЖКД соответственно). В обоих случаях на противоположных подложках устройства формируются ортогонально направленные системы строк и столбцов (*rows and columns*). В пассивно-матричной панели сигнал, управляющий ориентацией ЖК в пикселе, находящемся на пересечении i -й строки и j -го столбца, и, соответственно, пропуская пикселя, равен разности сигналов, идущих по этим строке и столбцу. Чем больше элементов у дисплея, тем меньше должна быть разница между сигналами строки и столбца, а значит, тем круче вольт-контрастная характеристика электрооптического эффекта. Кроме твист-эффекта с максимальным числом адресуемых строк до 20–40, в таких дисплеях используются различные режимы с закруткой слоя 180°–270° (супертвист-эффект (STN, или *Super Twist Nematic*), оптическая интерференция в ЖК с большой закруткой (ОМІ, или *Optical-Mode Interference*) и др.). Пассивно-матричные дисплеи сейчас используются в устройствах с малой информационной емкостью.

Массовое производство ЖК-устройств для мониторов и телевидения стало возможным только благодаря применению активных матриц с тонкопленочными транзисторами (ТПТ, или TFT, *Thin Film Transistor*). Технология ТПТ описана в монографии [22].

Внедрение ТПТ-технологий предъявило повышенные требования к электропроводности жидких кристаллов. Оказалось, что при использовании цианпроизводных, типичных компонентов ЖК-материалов для пассивно-матричных дисплеев (удельная проводимость $\sim 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$), происходит утечка заряда через пленки ТПТ и изображение деградирует. Проблему решили переходом на применение в АМ ЖКД фторпроизводных ЖК с удельной проводимостью $\sim 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Сами ТПТ и система электродов занимают малую часть площади дисплея, и эффективная площадь, определяемая площадью пространства, в которой происходит модуляция света, составляет от 60 до 90 % для разных конструкций ЖКД. Благодаря малому размеру ТПТ стало возможно создавать микродисплеи с разрешением до 1000×1000 элементов и размером пикселя до 7 мкм, что соответствует диагонали дисплея 1 см. Размер пикселей самых больших панелей (100 дюймов и более) может превосходить 1 мм. Такие панели относятся к устройствам группового и коллективного пользования, изображения на них можно рассматривать с относительно большого расстояния.

Наиболее распространенной технологией рабочей части ТПТ является a-Si:H (гидрогенизированный кремний), который используется в 90 % всех выпускаемых в мире АМ ЖКД. Более высокую подвижность носителей заряда обеспечивает p-Si (поликристаллический кремний). В последнее время благодаря спросу на увеличение разрешающей способности панели и ее быстродействие развивается IGZO-технология транзисторов со слоями оксидов индия, галлия, цинка. Такая технология обеспечивает высокую подвижность зарядов, а значит, и быстродействие, а главное ее достоинство – сейчас только с ее помощью можно делать плоские телевизоры со сверхвысоким разрешением $4k \times 2k$ (см. ниже).

Среди ЖК-дисплеев малого и среднего размера около четверти составляют устройства с технологией ТПТ, называемой «низкотемпературный поликристаллический кремний» (*low temperature poly silicon* или LTPS). Достоинством этого материала является высокая подвижность носителей заряда, что позволяет уменьшить размер транзистора и, соответственно, увеличить разрешающую способность дисплея при

одновременном уменьшении энергопотребления. Ежемесячно таких панелей производится около 600 тыс. кв. м.

Наиболее распространенным материалом для *прозрачного электрода* ЖК-панели является ITO (оксид индия и олова). Пропускание такой пленки может достигать 95–98 % (типичное значение 90–92 %) при поверхностном сопротивлении от 10 до 40 Ом/□ (Ом на квадрат, измеряется четырехзондовым методом). В связи с развитием технологий других оксидов перспективным считается использование и оксида цинка ZnO [23]. Среди альтернатив прозрачным ITO электродам также числится графен. Его удельное сопротивление уже меньше 1 Ом/квadrat. В [24] описана комбинация обоих типов электродов – ITO и графена. Оценки консалтинговой компании *IDTechEx Research* показывают, что к 2025 г. рынок графена для 17 основных применений достигнет 200 млн. долларов [25].

В другом отчете эта же компания предсказывает рост рынка компонентов для прозрачных электродов до 10,9 млрд. долларов в 2022 г. Вместо оксидов индия и олова предлагаются такие материалы, как металлические сетки, серебряные нанотрубки, углеродные нанотрубки, проводящие полимеры, графен. Такими технологиями сейчас занимаются *Samsung, LG, Lenovo, Dell, HP, Microsoft, Sharp, Intel, Apple* и др. Тем не менее, ITO технология доминирует, в том числе и в перспективных направлениях, например, на полиэтилентерефталатных (ПЭТ) подложках гибких дисплеев. Альтернативы ITO-оп-PET достигнут значимого объема позже. К 2025 г. ожидается их производство в объеме 430 млн. долларов. В [26] предложено использовать прозрачные электроды на основе органических проводящих пленок.

Перспективным направлением считается использование нанопористых пленок оксида алюминия, имеющих высокую проводимость, высокое пропускание света [27, 28]. Такие пленки могут одновременно использоваться и в качестве ориентантов ЖК.

Пока подавляющее большинство ЖК-панелей изготавливается на *подложках* из так называемого дисплейного стекла. В мире сейчас развивается тенденция изготовления дисплеев высокого разрешения на подложках большого размера, благодаря чему удешевляется произ-

водство [29]. В настоящее время создаются производства, основанные на использовании материнских подложек 10 поколения с размером $2,88 \text{ м} \times 3,13 \text{ м}$.

В 2014 г. мировое производство стеклянных подложек для активно-матричных ЖКД составило 461,8 млн. кв.м $\sim 0,5$ тыс. кв. км (данные консалтинговой компании *DisplaySearch*). Около 60 % этого производства идет на ЖК-телевизоры, примерно треть – на ноутбуки и мониторы.

На рынке *покровных защитных подложек* доминирует алюмосиликатное стекло *Gorilla Glass* японской компании Corning. 55 % этого стекла идет на смартфоны, 29 % на планшеты.

Одним из перспективных направлений современной электроники, в том числе и промышленности средств отображения информации, является разработка и производство так называемых умных покрытий с различными функциями, например, самоочистение, самозалечивание, антимикробная, антикоррозионная, регулировка пропускания и цвета проходящего излучения и др. Различные применения умных покрытий и их технологии, в том числе и представляющие собой развитие применяемых в дисплеях, описываются в отчете консалтинговой компании n-Tech [30].

Сейчас в мире появляется и растет спрос на *гибкие устройства*. Для ЖКД гибкость обеспечивается использованием полимерных подложек с нанесенными на их поверхность системами ТПТ и прозрачных электродов. Оказалось, что обычные ИТО-электроды растрескиваются при изгибе таких дисплеев из-за разных упругих свойств полуметаллической плёнки и пластика. Кроме того, температура обработки пластика, как правило, ниже температур процессов формирования ТПТ (самая низкая – около $180 \text{ }^\circ\text{C}$). Поэтому возникла задача создания так называемой органической электроники – формирования функциональных пленок с разной проводимостью, механическими и оптическими свойствами материалов. В целом эта задача решена и сейчас появляются прототипы гибких дисплеев разного функционального назначения.

На пластиковых подложках толщиной 50–80 мкм изготовлены прототипы самых тонких дисплеев. Напомним, толщина человеческого волоса 150–180 мкм.

Рынок гибких дисплеев (не только жидкокристаллических) составит к 2025 г. около 30 млрд. долларов согласно отчету консалтинговой компании *Touch Display Research* [31]. Уже в 2015 году производится четыре типа форм гибких устройств: сгибаемые, скручиваемые, с фиксированной кривизной, плоские с гибкой подложкой. Основными применениями этого типа устройств являются умные и обычные наручные часы, телевизоры и мониторы с искривленным экраном, планшеты (*phablet and tablet*), автомобильные дисплеи, электронные книги и записные книжки, публичные информационные экраны, экраны для казино и др.

Расстояние между подложками ЖК-устройства задаются *спейсерами* – элементами, определяющими толщину слоя ЖК. Обычные сферические или цилиндрические спейсеры могут перемещаться при изгибе дисплея. Поэтому для создания изогнутых экранов ЖК в объеме дисплея стабилизируется полимерными стенками, позволяющими сохранить зазор и не дающими ЖК перетекать из одной части панели в другую. В [32] предложена конструкция гибкого дисплея, в котором спейсеры при изгибе подложки удерживаются во впадинах микрорельефа подложки.

На основе стекла тоже можно создавать гибкие дисплеи. В японской компании разработано ультратонкое гибкое стекло *Corning Willow Glass*, которое можно наматывать на катушку диаметром около 1 см [33]. На поверхность стекла наносятся литографическим методом полосы проводящего ИТО-электрода шириной 10 мкм.

Разработаны технологии изготовления рулонных (*Roll-to-Roll*) гибких дисплеев с использованием операции ламинирования (рис. 6).

Важной характеристикой ЖКД, определяющей его конкурентоспособность, является *толщина* дисплея. Производители и потребители дисплеев постоянно сравнивают две технологии (жидкие кристаллы и органические светодиоды) с точки зрения их конкурентоспособности. Одним из важнейших параметров является геометрический размер, в частности, толщина дисплея. Толщина обычного ЖКД около 10 мм из-за размеров элементов модуля подсветки (светодиоды, световодная пластина, оптические пленки).

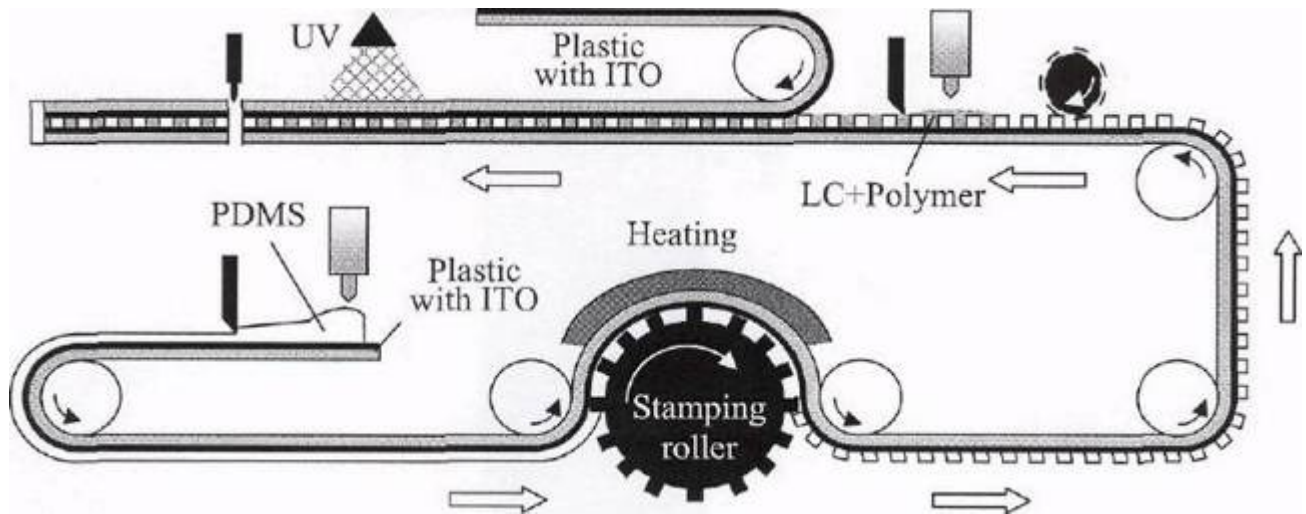


Рис. 6. Схема изготовления рулонных гибких дисплеев

У OLED телевизоров типичная толщина панели около 5 мм. Поэтому производители ЖК-телевизоров ставят целью разработку и производство ЖК-панелей с толщиной не более 4,9 мм за счет уменьшения толщины оптических элементов и лучшего использования пространства внутри телевизора. В частности, японская *Sony* официально запустила две модели *Bravia X900C* и *X910C* с таким параметром.

Если принять цену ЖК-телевизора с диагональю 55 дюймов (56 см) и разрешением 4K за единицу, то цена ультратонкого ЖК-модуля будет 1,7, в то время как аналогичный OLED телевизор будет стоить 3 единицы.

Планарная *ориентация ЖК* получается при использовании полимеров – полиимидных производных. Пленку такого вещества, нанесенную на подложку, натирают, чтобы создать направление преимущественной ориентации. Гомеотропная (вертикальная) ориентация получается при косом напылении кристаллических плёнок или использовании поверхностно-активных веществ, например кремнийорганических соединений.

Новые возможности открывает метод фотоориентации с использованием азокрасителей [34]. Молекулы таких веществ, помещенные в ориентирующий слой, обладают свойством изменять свою ориентацию под действием поляризованного света и передавать эту ориентацию в слой ЖК. Этот метод позволяет

избежать операции натирания и создавать так называемую картинную (*patterned*) ориентацию с двумерным распределением направлений преимущественной ориентации на подложке дисплея.

Основным методом расширения углового диапазона ЖКД является использование различных *оптически анизотропных пленок*.

Поскольку на выходе ЖК-ячейки свет выходит в общем случае эллиптически поляризованным, то анализатор пропускает часть светового пучка, уменьшая контраст изображения из-за недостаточно низкого уровня темного состояния. Поэтому задачей является подобрать оптическую разность хода двулучепреломляющей пленки так, чтобы эллиптически поляризованный пучок был скомпенсирован до линейно поляризованного, а направление поляризации пучка было бы ортогонально направлению главной оси анализатора. Это довольно сложная задача, с учетом спектральной зависимости показателей преломления и выполнения условия строгой компенсации поляризации только для конкретной геометрии. Поэтому в современном ЖКД с углом обзора до 180° по горизонтальному и вертикальному углу обзора используется много оптически анизотропных пленок и элементов. Структура одного из видов оптического компенсатора с сочетанием слоев, имеющих как положительную, так и отрицательную оптическую анизотропию, показана на рис. 7.

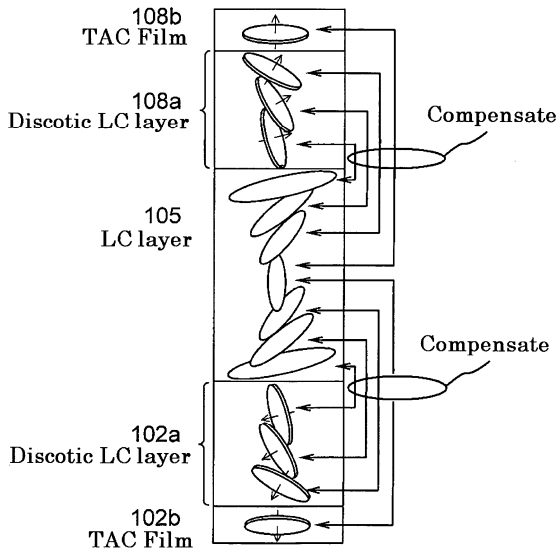


Рис. 7. Структура оптического компенсатора со слоями, имеющими положительную или отрицательную оптическую анизотропию. TAC film – пленка триацетата целлюлозы

Ряд элементов применяется для выравнивания поля интенсивности света от источника подсветки. С учетом поглощения света в матрице цветных фильтров, поляризаторах, ТПТ, системе электродов и потерях света в оптических

элементах пропускание типичной активной ЖК-матрицы составляет около 3–4 %. В этом ЖК-дисплеи проигрывают дисплеям на основе излучения света – плазменным и органическим светодиодам. Поэтому остро стоит задача повышения эффективности использования света. Для ее выполнения разработан ряд технических решений, позволяющих конвертировать поляризованный свет – преобразовать его так, чтобы он не терялся при многочисленных изменениях направления распространения пучка света и пересечениях различных оптических элементов.

Самыми известными решениями являются BEF и DBEF (*Brightness Enhancement Film* и *Dual Brightness Enhancement Film*, или пленочный усилитель яркости и двукратный пленочный усилитель яркости соответственно) [35, 36], см. рис. 8. Элементы имеют призматический профиль, что способствует сохранению света внутри них и повторному использованию (*recycling*). В элементе DBEF (рис. 9) происходит еще и преобразование направления поляризации после отражения от дополнительной поляризационной пленки, и при повторном прохождении к первичному прошедшему пучку добавляется 60 % при прямой подсветке или 97 % при торцевой подсветке.

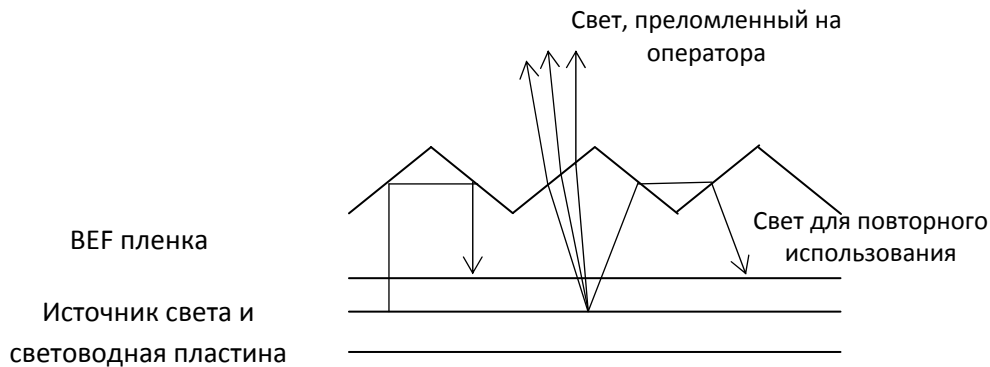


Рис. 8. Принцип работы пленки BEF (пленочный усилитель яркости)

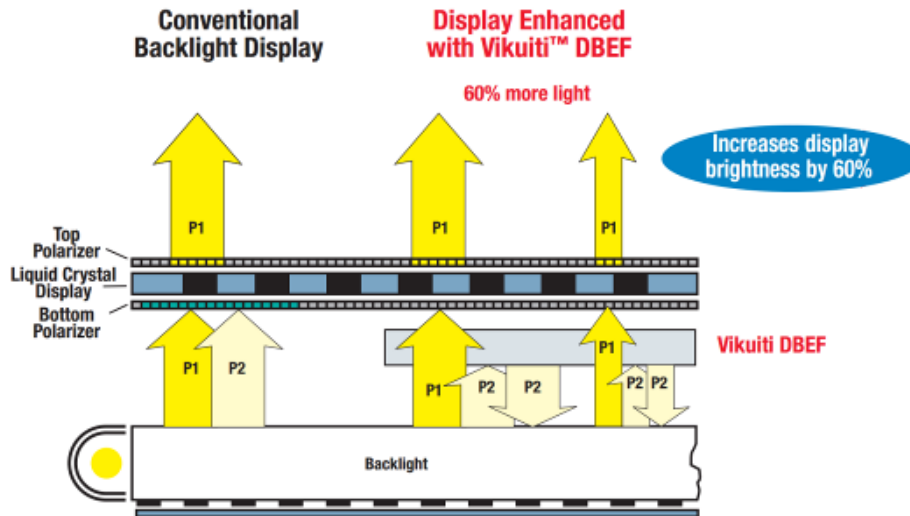


Рис. 9. Принцип работы пленки DBEF (двукратный пленочный усилитель яркости)

Прототипированы образцы дисплеев, у которых в пленочный усилитель яркости встроены квантовые точки. Благодаря этому дисплей имеет вдвое меньшее энергопотребление по сравнению с обычным устройством и меньшую стоимость изготовления панели. Технологии подсветки с использованием квантовых точек (КТ) могут значительно улучшить такие характеристики ЖКД, как цветовая гамма, точность передачи цвета, уменьшить энергопотребление панели.

В 2015 г. должны быть введены в производство квантовые точки без кадмия. Ряд фирм (*QD Vision, Sony, Nanosys, 3M, Amazon, ASUS*) производит дисплеи с квантовыми точками уже с 2013 г. Самсунг и LG Electronics планируют производить большие ЖК-панели с квантовыми точками в модуле подсветки с 2015 г.

В отчете компании *Touch Display Research* «*Quantum Dot Display Component Market will Reach \$10.6 Billion by 2025*» сообщается, что объем производства дисплеев и осветительных приборов с квантовыми точками должен вырасти с 0,7 млрд. долларов в 2015 г. до 10,6 млрд. долларов в 2025 г.

Использование подсветок с квантовыми точками позволит продлить доминирование ЖКД на рынке плоскочастотных дисплеев. Для расширения цветовой гаммы и повышения световой эффективности подсветки (а, значит, и всего дисплея) рядом фирм разработаны конструкции модулей с КТ. Корейская компания

LMS разработала квантовый светонакопительный лист (*Quantum Light Accumulation Sheet; QLAS*). Американская фирма 3M, владеющая технологиями пленочных усилителей яркости BEF и DBEF, и компания Nanosys разработали пленку с квантовыми точками (3M *Quantum Dot Enhancement Film; 3M QDEF*) [37]. В ней яркий белый цвет формируется «зелеными» и «красными» КТ, диспергированными в слое полимера, находящемся между двумя барьерными слоями (рис. 10).

Квантовые точки также используют в качестве добавок к ЖК для управления физическими свойствами ЖК-материала и, соответственно, электрооптическими характеристиками дисплея [38].

Жидкие кристаллы и другие оптически анизотропные материалы, например, полимерные ЖК, сами могут являться компонентами оптических компенсирующих пленок. В [39, 40] моделируются гибридные ЖК-ячейки с неоднородной структурой ориентации ЖК, которые способствуют выравниванию угловой зависимости пропускания ЖКД.

Кроме оптических пленок, контраст рассматриваемого изображения повышают с помощью интерференционных антибликовых покрытий, подавляющих отражение от передней поверхности панели и ухудшающих изображение при его малой яркости.

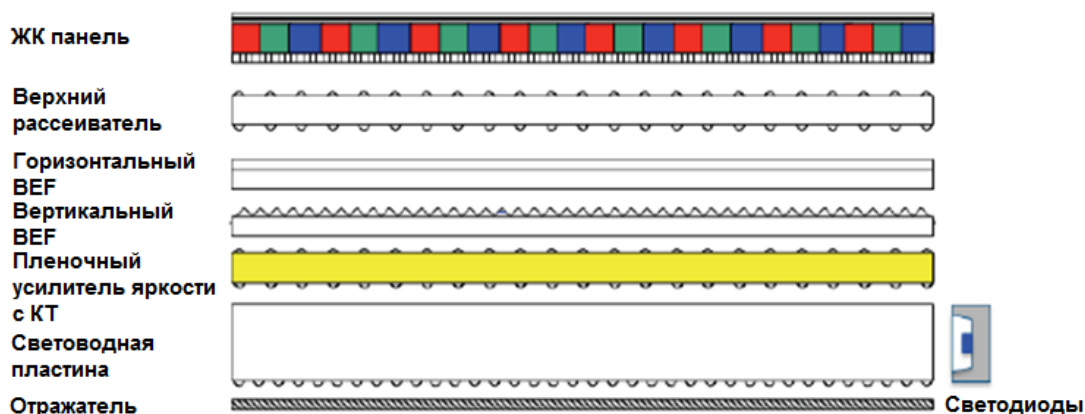


Рис. 10. ЖК панель с подсветкой, в которой используется плёнка с квантовыми точками (QDEF)

Для подсветки (*backlight*) ЖК-панелей используются два вида источников света: люминесцентные лампы с холодным катодом (*Cold Cathode Fluorescent Lamps*, CCFL) и светодиоды (LED). При использовании светодиодов они могут располагаться как за панелью, освещая пиксели непосредственно, так и по торцам световодной пластины (*Light Guide Plate*), по которой свет распределяется на всю площадь дисплея. В первом случае подсветка называется прямой (*Direct*), во втором: торцевой, или краевой (*Edge*).

Благодаря светодиодной подсветке ЖК-дисплеи получили новые качества и возможности. Если сама панель обеспечивает контраст изображения до 1000:1 (10 бит), то изменяя ток, протекающий через светодиоды, можно изменять их яркость тоже не менее чем в 1000 раз. Поэтому уже есть образцы ЖК-устройств с динамическим диапазоном изменения интенсивности проходящего света не менее чем в 1 000 000 раз (20 бит по каждому цвету). Кроме того, стало возможным изменять яркость светодиодной подсветки не по всей панели, а в отдельных ее блоках. Это позволяет лучше отображать темные участки изображения (функция усиления локального контраста или *Local Dimming*). Таким образом, техническое решение позволяет лучше согласовать возможности дисплея со зрительным восприятием изображения [41].

Кроме обычных твердотельных светодиодов разрабатывают новую подсветку, в которой в ка-

честве одного из источников света используется лазерный светодиод (красный или циан, один из пурпурных цветов). Это делает живым изображение, воспроизводимое ЖК-телевизором. На основе аналогичных лазерных диодов в корпорации Мицубиси был создан тонкий (27 см) проектор с изображением до 65 дюймов (165 см) с цветовой гаммой, в два раза превышающей цветовую диаграмму обычного ЖК-телевизора.

Конкурирующей с жидкими кристаллами технологией считаются органические светодиоды (ОСД), которые априори имеют лучшую световую эффективность из-за отсутствия поляризаторов и оптических пленок. Кроме построения изображения с использованием ОСД, их пленки применяют также в качестве источника подсветки ЖКД.

Высокая эффективность свечения и переключаемый насыщенный цвет коллоидных квантовых точек позволил коммерциализировать их для энергосберегающего освещения и создания дисплеев с высоким качеством цвета. В тонкопленочных светодиодах с квантовыми точками, возбуждаемыми электрическим полем (QLED), достигнута квантовая эффективность излучения более 18 % и яркость 50 000 кд м² при управляющем напряжении в несколько вольт [42].

Созданы также гибридные образцы дисплеев, так называемые трансфлективные [43, 44]. В зависимости от внешних условий освещения они работают как отражательные ЖКД (днем) или как излучательные ОСД-панели (вечером и ночью).

3. Применение ЖК-дисплеев для отображения информации

Рассмотрим некоторые наиболее важные и интересные применения ЖКД, кроме достаточно хорошо описанного в литературе случая плоскопанельных дисплеев для массового применения (телевизоры, мониторы, телефоны, планшеты).

3.1. Промышленные, военные

Важной современной задачей является создание и производство панелей для промышленных, медицинских и военных применений. В литературе они называются упрочненными (*rugged*) дисплеями. Они отличаются повышенной стойкостью к климатическим и механическим воздействиям, включая экстремальные. Такие устройства должны работать в условиях глубокого мороза (до -30 или -40 °C), повышенной температуры (до $+85$ или $+100$ °C), повышенной влажности (до 96 % при $+40$ °C), храниться при температуре до -60 °C, выдерживать высокие ударные нагрузки и вибрацию. В литературе описаны дисплеи, выдерживающие 500 часов термических испытаний по работе, хранению, циклам, термоудару, повышенной влажности (по стандарту требовалось 240 часов). Приборы также сохраняют характеристики в течение часа при воздействии вибрации, в четыре раза превышавшей стандартную по величине и в два раза по частоте, а также выдерживают однократный удар до 80 g (по стандарту надо до 50 g).

К новым технологиям для специальных применений следует отнести жидкокристаллические устройства для терагерцового диапазона [45]. Работа поддерживается американским агентством оборонных исследований (DARPA). Применения ТГц-излучения и устройств – спектроскопия, связь и получение изображений, например, видение сквозь стены, наведение оружия, всепогодное формирование изображений в УФ-диапазоне, космические изображения и т. п. С использованием ЖК в этом диапазоне изготавливают фазосдвигатели, волновые пластины, фильтры, поляризаторы. Проблемой являются величина двулучепреломления ЖК и материал электрода (обычный ИТО-электрод

сильно поглощает ТГц-излучение). Если первую проблему решают за счет увеличения толщины слоя ЖК и использования производных толана, то для решения второй в нанкинском университете Китая создали технологию пористого графена.

В [46] описываются ЖК-устройства для переключения излучения в микрометровом и миллиметровом диапазоне спектра.

3.2. ЖК-устройства для создания ощущения погруженности

В настоящее время многие типы ППД разрабатываются и производятся под требование «погруженности» (*immersiveness*). Погруженность означает ощущение реальности показываемого мира, ради чего дисплеями должно быть покрыто все пространство вокруг пользователя, оператора, наблюдателя [2, 47, 48]. Сами дисплеи должны формировать изображение высочайшего пространственного и временного разрешения, цветового диапазона. С учетом того, что пространство вокруг нас имеет различную форму и кривизну, дисплеи должны воспроизводить эти особенности. Разработчики не должны забывать и о других, не визуальных чувствах – слухе, обонянии, осязании.

В технике погружения будут создавать кино, вести телевидение, лекции, конструировать новые системы, в том числе и безопасности. Эта техника будет широко использоваться в рекламе и развлечениях.

Приведем примеры современных ЖКД, реализующих ощущение погруженности. Начнем с ключевой характеристики – пространственного разрешения дисплея (пикселей) на единицу длины – миллиметр или дюйм. За рубежом часто используется внесистемная единица – ppi (*pixel-per-inch*) – количество пикселей на дюйм (1 дюйм = 2,54 см).

Сравним разрешение некоторых типов ЖКД для коллективного, группового и индивидуального пользования, которые различаются по размеру. Среди панелей коллективного пользования самое высокое в мире разрешение имеет изделие китайской компании BOE. ЖК-дисплей содержит 7680×4320 пикселей (более 33 млн.!) Его размер 98 дюймов (2,5 м) по диагонали.

Для такого разрешения (8k×4k) даже придумали специальный термин QUNHD (*quarto ultra high definition*, по-русски четырехкратная сверхвысокая четкость). Обычное телевидение высокой четкости (ТВЧ или HDTV) имеет разрешение «всего» 1920×1080 пикселей. С учетом трехцветности показатель по разрешению надо умножить на три.

Для группового пользования используются дисплеи с меньшим разрешением 4k (3680×2160) и размером (диагональ 30–40 дюймов (76–101 см)). Для дисплеев индивидуального пользования примером является панель японской компании *Japan Display Inc.* ЖК-дисплей для планшета, изготовленный по технологии планарного переключения (*in-plane-switching*, или IPS), с такой же четкостью (4k) имеет размер в три раза меньше (10,1 дюйма или 26 см). Чтобы стало чуть понятней: на одном дюйме размещается 438 точек (172 на 1 см), или размер одного пикселя менее 60 мкм. У обычного монитора – около 140 мкм. При этом модуль имеет толщину всего 2,35 мм, обеспечивая яркость 400 кд/м² и контраст 1100 при энергопотреблении 321 мВт.

Мониторы сверхвысокого разрешения с четырьмя тысячами столбцов (UHD 4K; (3840 × 2160 пикселей) уже не только выставочные образцы. Среди 133 млн. ЖК-мониторов, произведенных в мире в 2014 г. UHD 4K мониторов было 2 миллиона. Но к 2017 г. их доля на рынке составит уже 8 %. При этом ожидается падение их средней цены с \$1347 в 2014 г. до \$927 в 2017 г. Область применения таких устройств компьютерная графика, обработка фото изображений, автоматическое проектирование, одновременное выполнение множества действий. Основными производителями UHD 4K мониторов являются *Sharp, Innolux, LGD, AUO, Samsung*.

Еще больший рост предсказывается для ЖК-телевизоров UHD 8K (7680 × 4320 пикселей). Их производство возрастет с 2700 штук в 2015 до 911 тысяч в 2019 г. Почти половина этих устройств будет поставлена в Китай.

В конце 2014 г. средняя цена ЖК-монитора составляла 171 доллар. Доля больших мониторов с диагональю 20 дюймов (51 см) и более увеличилась до 64 %, а доля мониторов с высоким разрешением (1920×1080 пикселей и более составила 55 %). При этом доля мониторов с широким углом обзора на основе эффектов планарного переключения (IPS/FFS) и вертикальной ориентации составила около 19 %.

Другая важная характеристика дисплеев для создания эффекта погруженности связана с формой окружающего пространства. Широкое поле зрения должны обеспечить изогнутые, искривленные (*curved*) панели. Такие панели для телевизоров разрабатывают корейские компании Samsung и LG как для жидкокристаллической технологии, так и для технологии органических светодиодов (OLED).

Для водителей автомобилей изготавливаются не только вогнутые, но и выпуклые дисплеи для приборной доски и различных видов «зеркал».

3.3. Электронная бумага

Отличие технологии электронной бумаги (*e-paper*) от других дисплейных технологий заключается, главным образом, в том, что на такой панели формируется сравнительно медленно изменяющееся изображение. Очень часто в таких устройствах используют явление бистабильности, когда сформированное оптическое состояние поддерживается без подвода энергии. Если такое устройство используется только для чтения текстов, то не слишком жесткие требования предъявляются к цветопередаче.

Сейчас для электронных читающих устройств чаще используются так называемые электронные чернила (*e-ink*), представляющие собой электрофоретические или электрохромные материалы.

Рассмотрим некоторые перспективные ЖК-технологии для этого применения. Наиболее распространенные ЖК-материалы с эффектом бистабильности – это холестерические или смектические А ЖК. Устройства с ХЖК даже производятся небольшими компаниями. В приборе создаются два устойчивых состояния – прозрачное и мутное. Запись или стирание этих состояний осуществляется электрическим полем, или световым пучком, или тепловым сигналом.

В настоящее время разрабатываются новые технологии с вариацией как закрутки ЖК (*BiNem*, или *Bistable Nematic*), так и ориентации ЖК (*ZBD*, или *Zenithal Bistable Device*) [49,50].

Перспективной является технология оптически перезаписываемой электронной бумаги (*Optically Rewritable Paper* или ORW), разрабатываемая в Гонконгском университете науки и технологии [51, 52].

3.4. Использование жидких кристаллов для формирования объемного изображения

Наиболее известным ЖК-устройством, применяемым для получения ощущения глубины изображения, являются стереочки с управляемым пропусканием света. К электрооптическим затворам для таких очков предъявляются требования высокого пропускания (35–40 % и больше), высокого отношения пропускания в открытом и закрытом состояниях (около 1000 и больше), малого времени переключения (фронт электрооптического отклика не более 1/10 кадрового полупериода). Такие параметры нужны, чтобы избежать наблюдения перекрестных изображений (3D *crosstalk*), когда при рассмотрении правого изображения видны следы левой картинку и наоборот.

В ячейках сегнетоэлектрических ЖК (СЖК), разработанных и изготавливаемых в Физическом институте РАН им. П. Н. Лебедева, получено время оптического отклика до 24 мкс, частота модуляции света в солитонной моде увеличена до 7 кГц при управляющем напряжении 1,5 В [53]. С их использованием решается проблема повышения кадровой частоты до 100–240 Гц при переходе дисплеев со стандартными кадровыми частотами 60–120 Гц и формированием цветного изображения с помощью триады цветных фильтров к воспроизведению 3D-изображения. А для устройств отображения на основе метода последовательной во времени смены цветов, который позволяет втрое сократить число дисплейных элементов и получить более цельное и яркое изображение (в результате отказа от триады цветных фильтров), в режиме 3D-отображения можно повысить частоту смены кадров до 540–600 Гц.

Интересным представляется техническое решение с применением затворов ПДЖК (ЖК, диспергированных в полимерной матрице) [54]. В этом случае затворы работают не по принципу «светло-темно», а по принципу «прозрачно-мутно». Световой поток, попадающий на глаза наблюдателя, практически не меняется. Следовательно, на глаза не приходится таких больших нагрузок для изменения диаметра зрачка при резкой вариации интенсивности света, как в случае, когда используются традиционные электрооптические затворы.

В современных ЖК-телевизорах часто используется вариант создания автостереоскопического изображения. Правое и левое изображение формируются с помощью микролинзового растра, направляющего их в правый и левый глаз соответственно (явление диспаратности).

Такой линзовый растр с использованием электрооптического переключения ЖК реализован в телевизорах нидерландской компании Philips, произведенных по технологии WOWvx [55]. Такой телевизор позволяет рассматривать обычную двумерную картинку (режим 2D) и при включении растра в соответствующий режим – трехмерное изображение (3D).

Принцип работы такого растра поясняется на рис. 11. Используется управление показателем преломления ЖК при переключении электрического напряжения. Внутри каждой линзы растра ЖК имеет планарную ориентацию, т. е. вдоль ЖК-директора показатель преломления ЖК равен показателю преломления ЖК для необыкновенного луча n_e . Поверх растра находится полимерная профилированная подложка с показателем преломления, соответствующим показателю преломления ЖК для обыкновенного луча n_o . Поэтому в выключенном состоянии растр перенаправляет лучи так, чтобы формировались два разных изображения для каждого глаза. В результате наблюдается стереоскопическое изображение. При включении напряжения ЖК в линзе переориентируется почти вертикально. Его показатель преломления становится равен n_o , и ЖК-растр вместе с полимерной подложкой становится изотропным. Лучи, идущие от ЖК-панели, проходят без изменения направления, и наблюдается обычное двумерное изображение. Для улучшения эффекта автостереоскопический растр повернут на небольшой угол по отношению к направлению столбцов ЖК-матрицы.

В конструкции ЖК-панели, разрабатываемой в Институте общей физики РАН им. А. М. Прохорова, предлагается формировать объемное изображение и наблюдать его с помощью двух растров поляризационных элементов (рис. 12) [56]. Они представляют собой жидкокристаллические фазовые полуволновые пластинки. Растры для правого и левого изображений различаются направлениями оптических осей таких пластинок.

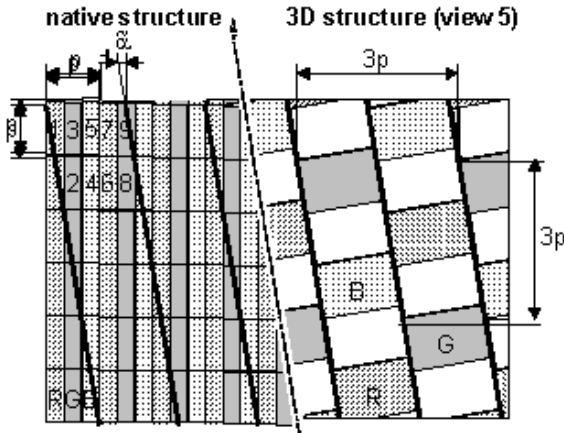


Figure 2: Layout of pixels and lenses

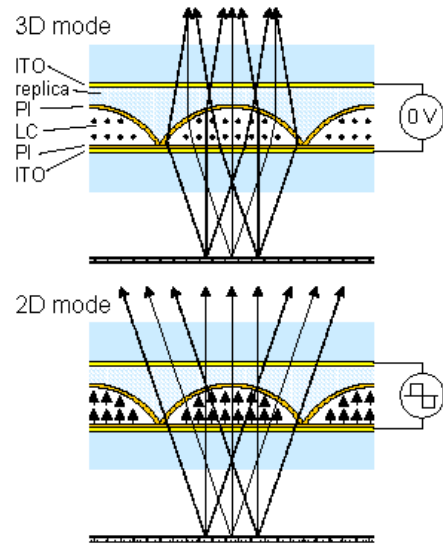


Figure 1: Principle of active LC lenticular lens

Рис. 11. Схема принципа работы переключаемого микролинзового раstra

Элемент раstra, находящегося ближе к наблюдателю, оставляет неизменной поляризацию пучка света для «своего» глаза и поворачивает ее для «другого» глаза. После прохождения через

анализатор на сетчатке каждого глаза формируется «своя» картинка, и изображение воспринимается объемным вследствие стереоскопического эффекта.

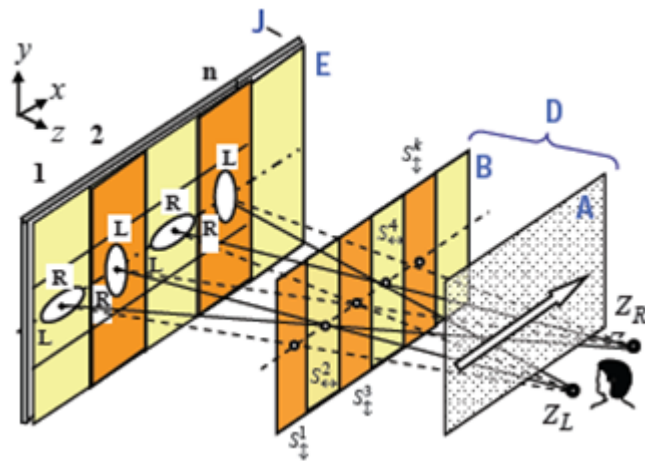


Рис. 12. Технология 3D-изображения с использованием двух растров поляризационных элементов

В варианте стереоскопического дисплея «Swing» стереоизображение формируется за счет колебаний (Swing) электрооптического раstra,

расположенного перед ЖК-матрицей (рис. 13). В одном и том же устройстве дисплей может быть повернут в «книжном» или «альбомном» формате.

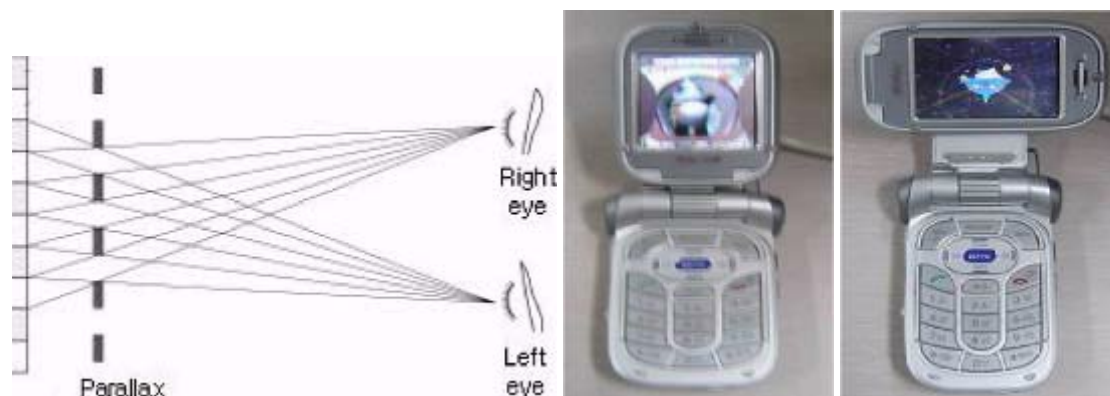


Рис. 13. Пример дисплея «Swing»

С помощью набора ЖК-затворов можно формировать реальное трехмерное изображение, т. е. изображение поверхности некоего реального объекта будет наблюдаться в пространстве, а не на плоскости. Схема устройства, реализующего такой принцип, показана на рис. 14. По координате Z расположено до 100 ячеек с сегнетоэлектрическим ЖК. Под действием электрического импульса они последовательно изменяют свою прозрачность. При этом на каждую включаемую ячейку проецируется двумерный срез изображения объемного объекта. Срезы формируются так, чтобы за один цикл на всех ячейках получалось объемное изображение поверхности этого объекта.

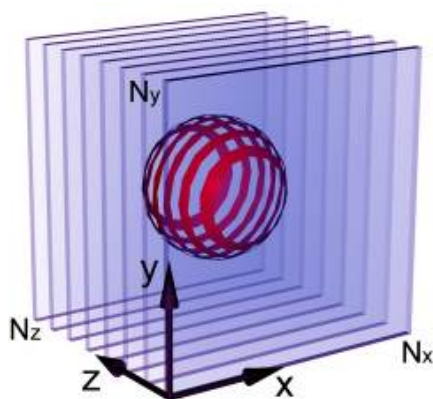


Рис. 14. Принцип формирования поверхности реального объекта

Чем больше сечений объекта, тем более высокие требования предъявляются к быстродействию затворов. Если весь световой макет

объекта (сцены) может быть сформирован за $1/30$ секунды и менее, то изображение трехмерного объекта визуализируется как целое, непрерывное и наиболее реалистичное. Время отклика менее $(1/30 \text{ с}) / N$ слоев. При наблюдении такой картинки не требуются очки, слежение за положением головы (глаз), нет скачков изображения; глаза и мозг оператора не устают.

3.5. Сенсорные ЖК-дисплеи (Touch Screen)

Для управления адресацией применяются технологии поверхностной акустической волны (SAW), резистивная, емкостная и др., позволившие использовать дисплеи с большим количеством пользователей.

Современные сенсорные дисплеи (*touch-screen*) большие по размеру и имеют много точек касания. Так, панель *Columbus* имеет диагональ 47 дюймов (119 см), разрешение высокой четкости (1920×1080 пикселей). Изображение можно рассматривать под любым углом благодаря технологии планарного переключения (*in-plane-switching*, или IPS). Дисплей предназначен для наружного применения и кроме рекламы может использоваться в казино, промышленной автоматике, военных системах. Яркость панелей может достигать 2000 кд/м^2 . В дисплее китайской компании Amdalla прозрачные электроды сделаны из материала, альтернативного оксиду индия и олова (ITO). При этом панель имеет десять точек касания, частоту смены изображений до 150 Гц, может быть размещена любым образом.

У сенсорной панели дисплейным компонентом является и устройство ввода. Компания *Pentech*, являющаяся частью более мощной *Havron*, прототипировала электромагнитные карандаши (стилусы) без сердечников и батареек с разрешением до 5080 точек на дюйм (20 на мм) и точностью установки карандаша до 100 мкм. Специализирующаяся в этом направлении компания *ELO Touch Solutions* разработала панель, в которой сочетается уже известное использование давления и изменения сопротивления, но работать можно не только пальцем, но и стилусом, и рукой в перчатке. Помимо известных применений (платежные терминалы, промышленные устройства, игровые автоматы), разработка может применяться и при работе с машинами для выборов.

Для многопользовательских сенсорных экранов японской корпорации *Mitsubishi Electric* (отдел ЖК-дисплеев и исследовательский центр передовых технологий) созданы двуслойные сетчатые электроды с разделёнными плавающими электродами в системе электродов, выполненных в форме букв X и Y. В результате улучшается чувствительность и время отклика жидкокристаллического экрана. Разработано новое защитное стекло для сенсорных панелей с повышенной прочностью.

Заключение

Можно констатировать, что среди всех дисплейных технологий жидкие кристаллы остаются динамично развивающимся лидером. В мире ведутся работы как по совершенствованию и удешевлению известных типов ЖКД, так и по созданию новых устройств и материалов с новыми функциональными возможностями и более широким кругом применений. Появляется много новых перспективных устройств и технологий для фотоники.

Мы не рассказали здесь об использовании ЖК в органической электронике и оптической обработке информации, в том числе с ЖК-линзами и дифракционными элементами. Своей очереди для подробного обзора ждут новые, пока еще экзотические фазы, такие, как TGB (зернистая фаза с закрученными границами), лиотропные жидкие кристаллы и многие другие.

Работа выполнена при частичной поддержке по проекту РФФИ и Правительства Московской области № 14-47-03608.

Список литературы / References

1. *Блинов Л. М.* Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с. [*Blinov L. M.* Structure and Properties of Liquid Crystals. Springer, 2011. 480 p.].
2. *Беляев В. В., Чилая Г. С.* Жидкие кристаллы в начале XXI века. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 136 с. [*Belyaev V. V., Chilaya G. S.* Zhidkie kristally v nachale XXI veka (Liquid crystals in the beginning of XXI century). M., 2015. 136 p. (in Russian)]. ISBN 978-5-7017-2415-8.
3. *Палто С. П.* Электрооптика и фотоника жидких кристаллов // УФН. 2005. Т. 175, № 7. С. 784–790 [*Palto S. P.* Electrooptics and photonics of liquid crystals // Phys. Usp. 2005. Vol. 48, № 7. P. 747–753. DOI: 10/1070/PU2005v048n07ABEH002844].
4. Display Design and the Human Vision System [Electronic resource] // *Nouvoyance: Nouvoyance Inc.* Cupertino, 2008. URL: <http://www.nouvoyance.com/technology.html> (accessed 23.02.2015).
5. *Hong H.* In-Plane-Switching (IPS) Technology // Handbook of Visual Display Technology / eds. J. Chen, W. Cranton, M. Fihn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 1470–1485.
6. *Yoo J.-C., Shieh H.-P.D.* Analyses of In-Plane Switching Mode LCDs Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 1998. Vol. 312, № 1. P. 1–11.
7. *Yoshida H.* Vertically Aligned Nematic (VAN) LCD Technology // Handbook of Visual Display Technology / Eds. J. Chen, W. Cranton, M. Fihn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. P. 1486–1506.
8. *Ge Z., Wu S.-T., Kim S. S., Park J. W., Lee S. H.* Thin cell fringe-field-switching liquid crystal display with a chiral dopant // Applied physics letters. 2008. Vol. 92. P. 181109-1–181109-3.
9. *Lee S. H., Lee S. L., Kim H. Y.* Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73. P. 2881.
10. *Berkeley B.* Advanced Technologies for LCD-TV. EuroDisplay–2007. Workshop. Russia, Moscow, 17th. September 2007.
11. *Jo S. I., Yu C.-J., Kim J.-H.* Fast Response and Wide Viewing Angle Vertical Alignment Mode with X-Shape Electrode // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2015. Vol. 613, № 1. P. 69–74. DOI: 10.1080/15421406.2015.1032048.
12. *Pozhidaev E., Chigrinov V., Li X.* Photoaligned Ferroelectric Liquid Crystal Passive Matrix Display with Memorized Gray Scale // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45, Part 1, № 2A. P. 875–882. DOI:10.1143/JJAP.45.875.

13. *Lapanik V., Lugouskiy A., Timofei S., Haase W.* Influence of the size and the attached organic tail of modified detonation nanodiamond on the physical properties of liquid crystals // *Liq. Cryst.* 2014. Vol. 41. P. 1332–1338. DOI: 10.1080/02678292.2014.919673.
14. *Шабанов В. Ф., Зырянов В. Я.* Фотонные кристаллы и нанокompозиты: структурo-образование, оптические и диэлектрические свойства. Новосибирск: СО РАН, 2009. 257 с. [*Shabanov V. F., Zyryanov V. Y.* Fotonnyye kristally i nanokompozity: strukturo-obrazovanie, opticheskie i dielektricheskie svoystva (Photonic crystals and nanocomposites: structure formation, optical and dielectric properties). Novosibirsk: Syberian Branch of RAS. 2009. 257 p. (in Russian)].
15. *Liu Y., Lan Y.-F., Zhang H., Zhu R., Xu D., Tsai C.-Y., Lu J.-K., Sugiura N., Lin Y.-C., and Wu S.-T.* Enhancing the Contrast Ratio of Blue Phase LCDs // *SID'14 Symposium Digest of Technical Papers.* 2014. P. 188–191.
16. *Gerber P. R.* Electro-optical effect of a small-pitch blue-phase system // *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* 1985. Vol. 116. P. 197–206.
17. *Yan J., Cheng H. C., Gauza S., Li Y., Liao M., Rao L., Wu S. T.* Extended Kerr effect of polymer stabilized blue-phase liquid crystals // *Applied Physics letters.* 2010. Vol. 96. P. 071105.
18. *Peng F., Chen Y., Yuan J., Chen H., Wu S.-T., Haseba Y.* Low Temperature and High Frequency Effects on Blue Phase Liquid Crystals // *SID'14 Symposium Digest of Technical Papers.* 2014. P. 164–167.
19. *Sun X., Ni S., Zhu J., Lee K.-C., Lo C.-C., Lien A., Lu J.* Improving Kerr Constant of Polymer-Stabilized Blue Phase Liquid Crystal with Multiple Dopants // *SID'14 Symposium Digest of Technical Papers.* 2014. P. 172–175.
20. *Yan J., Schadt M., Liu S.-H., Cheng K.-L., Wu S.-T.* Diluter Effects on Large Dielectric Anisotropy Blue Phase Liquid Crystals // *SID'14 Symposium Digest of Technical Papers.* 2014. P. 1392–1395.
21. *Chen C. P., Yang Y., Li Y., He G., Lu J., Su Y., Qian L.* Single-Layer Fabry-Pérot Interferometric Display for Both Color and Intensity Modulations // *SID'14 Symposium Digest of Technical Papers.* 2014. P. 338–341.
22. *Brotherton S. D.* Introduction to Thin Film Transistors: Physics and Technology of TFTs. Springer, New York, 2013. 490 p.
23. *Абдуев А. Х., Ахмедов А. К., Асваров А. Ш.* Прозрачные проводящие тонкие пленки на основе ZnO, полученные магнетронным распылением композитной мишени ZnO:Ga-C // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40, вып. 14. С. 71–78 [*Abduev A. Kh., Akhmedov A. K., Asvarov A. Sh.* Transparent conducting ZnO-based thin films epitaxially grown by magnetron sputtering of ZnO:Ga-C composite target // *Technical Physics Letters.* 2014. Vol. 40, Iss. 7. P. 618–621. DOI: 10.1134/S1063785014070153
24. *Singh D. P., Kumar Gupta S., Manohara R.* Dielectric, electro-optical and photoluminescence characteristics of ferroelectric liquid crystal on a graphene-coated indium tin oxide substrate // *Physical Review E.* 2014. Vol. 90, Iss. 2. P. 022501–022504. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.022501.
25. Graphene and 2D Materials: Markets, Technologies and Opportunities 2015–2025 // www.IDTechEx.com
26. *Chou T.-R., Chen S.-H., Chiang Y.-T., Lin Y.-T., Chao C.-Y.* Highly Conductive PEDOT:PSS Film by Post-Treatment with Dimethyl Sulfoxide for ITO-Free Liquid Crystal Display // *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* 2015. Vol. 612, № 1. P. 201–210. DOI: 10.1080/15421406.2015.1031581.
27. *Zhyllinski V., Bagamazava V., Chernik A., Bezborodov V., Zharski I.* Design and Application of Anisotropic Nanostructured Conductive and Alignment Coatings // *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* 2015. Vol. 612, № 1. P. 129–134. DOI: 10.1080/15421406.2015.1030970.
28. *Dadivanyan A. K., Belyaev V. V., Chausov D. N., Stepanov A. A., Smirnov A. G., Tsybin A. G., Osipov M. A.* Nanomesh Aluminum Films for LC Alignment. Theoretical and Experimental Modeling // *Molecular Crystals and Liquid Crystals.* 2015. Vol. 611, № 1. P. 117–122. DOI: 10.1080/15421406.2015.1030196.
29. *Беляев В. В., Коваленко В. И.* Рынок жидкокристаллических дисплеев // *Электронные компоненты.* 2003. № 3. С. 59. [*Belyaev V. V., Kovalenko V. I.* Rynok zhidkokristallicheskih displeev (Market of liquid crystal displays) // *Elektronnyye komponenty.* (Electronic components). 2003. № 3. P. 59. (in Russian)].
30. Отчет консалтинговой компании n-Tech «Smart coatings markets: an emerging opportunity». 2015. [n-Tech report «Smart coatings markets: an emerging opportunity». 2015.].
31. Flexible, Curved, and Bendable Display Technologies and Market Forecast. Report, 2nd ed., 2015.
32. Патент РФ № 2318230, МКИ G02F1/133. Гибкий дисплей / Беляев В. В.; приор. от 27.03.2006; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6 [Russian Patent № 2318230, MCI G02F1/133. Gibkiy displey (Flexible display) / Belyaev V. V.; prior. 27.03.2006; Bull. RF № 6, 27.02.2008 (in Russian)].
33. *Merz G., Glaesemann G. Scott, Tosch J., Chang C., Marshall D., Li X., Tian L., Vasilakos K., Gagov A.* Ultra-Slim Flexible Glass Substrates for Display Applications Sean Garner // *SID' 2012 Digest.* 2012. P. 342–344.

34. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H.-S. Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications. Wiley, 2008, 248 p.
35. 3M™ Vikuiti™ Dual Brightness Enhancement Film // 3M. 2015. URL: <http://www.3m.com/product/information/Vikuiti-Dual-Brightness-Enhancement-Film.html> (accessed 10.03.2015).
36. Display Enhancement Films [Electronic resource] // 3M. 2015. URL: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/IndustrialFilms/Home/Products/DisplayEnhancementFilms/ (accessed 10.03.2015).
37. Chen J., Hartlove J., Hardev V., Yurek J., Lee E., Gensler S. High Efficiency LCDs using Quantum Dot Enhancement Films // SID'14 Symposium Digest of Technical Papers. 2014. P. 1428–1431.
38. Vakulin D. A., Frenkel D. A., Gavrish E. O., Konshina E. A. Impact of Doping CdSe/ZnS Quantum Dots on the Elasticity Coefficients of Nematic // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2015. Vol. 612, № 1. P. 110–116. DOI: 10.1080/15421406.2015.1030579.
39. Belyaev V. V., Solomatin A. S., Kurilov A. D., Chausov D. N., Mazaeva V. G. Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles // Applied Optics. 2014. Vol. 53, Iss. 29. P. H51–H57.
40. Belyaev V. V., Solomatin A. S. Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) LC Layers with Both Fixed and Unfixed Boundary Conditions // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2015. Vol. 613, № 1. P. 121–128. DOI: 10.1080/15421406.2015.1032087.
41. Беляев В. Светодиоды и плоскопанельные дисплеи: Совмещение несовместимых // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 8. С. 82–94 [Belyaev V. Svetodiody i ploskopanel'nye displei: Sovmeshchenie nesovmestimykh (LED and flat panel displays: The combination of incompatible) // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes (Electronics: Science, Technology, Business). 2013. № 8. P. 82–94 (in Russian)].
42. Bulovic V. Quantum dots and other materials for extremely thin displays and other active surfaces // SID'2014 Symposium, Seminars, 2014. M-7.
43. Патент РФ № 2324237, МКИ G09G5/00. Гибридный светомодулирующий-светоизлучающий дисплей и способ его изготовления / Гейвандов А. Р., Беляев В. В.; приор. 09.09.2005; Бюл. № 13, 10.05.2008, [Patent RF № 2324237, MKI G09G5/00. Gibridnyy svetomoduliruyushchiy-svetoizluchayushchiy display i sposob ego izgotovleniya (Hybrid light modulating and light emitting display and method of manufacturing thereof) / Geivandov A. R., Belyaev V. V.; prior. 09.09.2005; Bull. RF № 13, 10.05.2008, (in Russian)].
44. Патент РФ № 2326448, МКИ G09G3/22. Жидкокристаллический дисплей / Беляев В. В., Гейвандов А. Р.; приор. 23.09.2005; Бюл. РФ № 16, 10.06.2008 [Patent RF № 2326448, MKI G09G3/22. Zhidkokristallicheskiy display (Liquid crystalline display) / Belyaev V. V., Geivandov A. R.; prior. 23.09.2005; Bull. RF № 16, 10.06.2008 (in Russian)].
45. Wu Y., Ruan X., Chen C.-H., Shin Y.J., Lee Y., Niu J., Liu J., Chen Y., Yang K.-L., Zhang X., Ahn J.-H., and Yang H. Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters // Optics Express. 2013. Vol. 21, № 18. P. 21395–21402.
46. Jost M., Gaebler A., Weickhmann C., Strunck S., Hu W., Karabey O. H., Jakoby R. Evolution of Microwave Nematic Liquid Crystal Mixtures and Development of Continuously Tuneable Micro- and Millimetre Wave Components // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2015. Vol. 610, № 1. P. 173–186. DOI: 10.1080/15421406.2015.102564.
47. Беляев В. Погружение в суперреальность: По результатам симпозиума SID 2014 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 6. [Belyaev V. Pogruzhenie v superreal'nost': Po rezul'tatam simpoziuma SID 2014 (Immersion into superreality (on SID' 2014 Symposium) // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes (Electronics: Science, Technology, Business). 2014. № 6. (in Russian)].
48. Беляев В. Жидкокристаллические дисплеи и материалы на симпозиуме международного дисплейного общества (SID), Сан-Диего, США, 1–6 июня 2014 г. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14, № 4. С. 103–108 [Belyaev V. Zhidkokristallicheskie displei i materialy na simpoziume mezhdunarodnogo displeynogo obshchestva (SID), San-Diego, SShA, 1–6 iyunya 2014 g. (Liquid crystal displays and materials at symposium of the society for information display (SID), San Diego, USA, June 1–6, 2014) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie (Liq. Cryst. & Appl. Rus. J.). 2014. Vol. 14, № 4. P. 103–108 (in Russian)].
49. Dozov I., Nobili M., Durand G. Fast bistable nematic display using monostable surface switching // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. P. 1179.
50. ZBD Displays heads the Deloitte Fast 50 list // Optics.org / SPIE Events Europe Ltd. 2015. URL: <http://optics.org/news/3/11/15> (accessed 10.03.2015).
51. Sun J., Zhang W., Chigrinov V., Kwok H. S. Increasing Rewriting Speed of Optically Rewritable E-Paper by Electric Field // SID Symposium Digest of Technical Papers. San Jose, CA, May 21–June 5, 2015. Vol. 46, Iss. 1. P. 1531–1532. DOI: 10.1002/sdtp.10073.

-
-
52. http://www.ece.ust.hk/public/activities/fyp/fyp12/poster_CV1b-12.pdf
53. *Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N.* Electro-Optical Response of Compensated Helix Ferroelectric: Continuous Gray Scale, Fastest Response and Lowest Control Voltage Demonstrated to Date // SID' 2012 Digest. 2012. P. 452–455.
54. *Belyaev V. V.* PDLC shutters for 3D imaging // Proc. SPIE. Bellingham, USA, 2005. Vol. 5821. P. 117–121.
55. *de Boer D.K.G., Hiddink M.G.H., Sluijter M., Willemsen O. H., de Zwart S. T.* Switchable lenticular based 2D/3D displays // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV. 2007. Vol. 6490.
56. *Ezhov V.* Autostereoscopic Imaging with Simultaneous Reproduction of Two Image Elements in One Display Pixel: General Approach and Experimental Results // SID' 2012 Digest. 2012. P. 125–128.

Поступила в редакцию 15.08.2015 г.