

УДК 533.14(06):532.783

А. Л. Андреев<sup>1</sup>, И. Н. Компанец<sup>1,2</sup>

**ПРИМЕНЕНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ – РЕАЛЬНЫЕ И ВОЗМОЖНЫЕ  
(ОБЗОР)**

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН),  
Ленинский проспект, д. 53, 119991 Москва, Россия. E-mail: kompan@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское шоссе, д. 31, 115409 Москва, Россия

*Результаты исследований экспериментальных образцов ячеек на основе сегнетоэлектрических жидких кристаллов (СЖК), выполненных в последние годы, показывают, что создаваемая СЖК-технология позволит производить дисплейные экраны, существенно превосходящие по своим характеристикам современные экраны как на основе широко используемых нематических ЖК (НЖК), так и на основе ранее известных СЖК. По отношению к устройствам на НЖК это гарантированно обеспечит более качественную визуализацию 2D и 3D изображений вследствие увеличения в 5 и более раз частоты смены кадров (до 600 и более герц), снижения в 4–5 раз времени оптического отклика (до менее 0,1 мс) и увеличения как минимум в 2 раза яркости изображения при сниженном более чем вдвое энергопотреблении.*

*Пока СЖК ограничено используются в нашиваемых дисплеях, но потенциально СЖК-технология пригодна для создания широкого спектра быстродействующих низковольтных экранов смартфонов и гаджетов, микродисплеев и на их основе проекционных дисплеев, в том числе трехмерных, затворов стерео очков, пространственных модуляторов света, элементов и устройств обработки информации, адаптивной оптики, голографических, сенсорных и других, в которых повышенное быстродействие СЖК не только обеспечивает превосходство параметров, но и новые функциональные свойства.*

**Ключевые слова:** смектические жидкие кристаллы, биполярные импульсы, непрерывная шкала серого, прозрачная мода, светорассеивающая мода, 2D–3D применения.

DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.28

А. Л. Андреев<sup>1</sup>, И. Н. Компанец<sup>1,2</sup>

**APPLICATIONS OF FERROELECTRIC LIQUID CRYSTALS – REAL AND POSSIBLE  
(REVIEW)**

<sup>1</sup>P. N. Lebedev Physical Institute of RAS (LPI), Leninsky pr., 53, 119991 Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoe shosse, 31, 115409 Moscow, Russia  
E-mail: kompan@sci.lebedev.ru

*Results of the research of experimental samples of electro-optical cells based on ferroelectric liquid crystals (FLC) fulfilled in recent years show that display screens produced on the base of FLC-technology will significantly surpass in performance the modern screens both on the basis of the widely used nematic liquid crystals (NLC) and the known bistable FLC. With respect to the devices with NLC this will provide with a guarantee the better visualization of 3D and 2D images due to an increasing 5 and more times the frame rate (600 Hz or more), reducing 4–5 times the optical response time (till less than 0,1 ms) and increasing at least 2 times the image brightness at the energy consumption reduced by more than half.*

*Till now FLC are limitedly used in helmet-mounted displays, but potentially FLC-technology is suitable for a wide range of high-speed low-voltage screens of smartphones and gadgets, microdisplays and projection displays on their base, including three-dimensional displays, shutters for stereo glasses, spatial light modulators, elements and devices for information processing, adaptive optics, holography, sensors and others, in which the increased speed of FLC not only provides superiority of parameters but new functional properties also.*

**Key words:** smectic liquid crystals, bipolar pulses, continuous gray scale, transparent mode, light-scattering mode, 2D–3D applications.

## Введение

На протяжении последнего десятилетия тенденция рынка отображения информации с помощью приборов на основе широко используемых нематических жидких кристаллов (НЖК) являются следующие:

- увеличение формата дисплеев (достигнуто 8Кх4К), потребовавшее привлечения новых методов изготовления экранов большого размера и/или с минимальным размером пикселей, и новых методов адресации и предобработки данных;
- переход к неплоским (гибким) экранам, требующим гибкой подложки, формирования гибких управляющих электронных цепей и стабилизации толщины активного слоя;
- переход к сенсорному и мульти-сенсорному управлению изображением непосредственно на экране;
- повышение яркости изображений, реализуемое с помощью светодиодной и лазерной подсветки;
- развитие трехмерных (3D) технологий, требующее существенного повышения кадровой частоты смены изображений (выше достигнутых в НЖК-приборах 120 Гц).

По медицинским показаниям, без мерцаний и смазов, а значит, без усталости и нервного напряжения, глаза воспринимают 2D изображения на экране, если частота кадров не менее 90–100 Гц. Следовательно, для комфортного наблюдения 3D изображений уже требуется частота 180–200 Гц. Дополнительно для использования прогрессивной технологии последовательной во времени смены цветов, позволяющей обойтись без RGB-фильтров и тем самым втрое уменьшить число пикселей и повысить яркость изображений, нужна втрое большая частота кадров [1].

Именно повышение частоты кадров в ЖК-дисплеях продвигалось до сих пор наименее успешно. Действительно, увеличение упругой силы НЖК для сокращения времени его релаксации при выключении электрического поля, например, путем 270-градусной закрутки слоя в

супертвистовых структурах, вело к существенному повышению величины управляющего напряжения (до 10 В и более). Использование подогрева НЖК (для уменьшения вязкости) и очень тонких ячеек (позволяют уменьшить время включения-выключения отклика до 1 мс) оказалось не оправданным технологически. Не оказались удачными и попытки использовать так называемую «голубую фазу» в ЖК, потенциально обещающую 240 Гц, но имеющую малый температурный интервал (не более 10 °С) и высокое управляющее напряжение (более 10 В).

Однако достигнутые в последние годы результаты показывают, что все указанные тенденции в полной мере могут быть реализованы в устройствах на основе смектических ЖК с сегнетоэлектрическими свойствами (СЖК), причем кадровая частота может быть увеличена многократно, что обещает этим устройствам новые свойства и функциональные возможности. При этом важно, что технологии создания НЖК- и СЖК-приборов близки. Тогда на той же НЖК-производственной базе при условии ее модернизации проще осуществить и производство экранов нового поколения по СЖК-технологии.

Не останавливаясь на физических аспектах электрооптики СЖК и принципах модуляции в них света (они подробно описаны в [1–3]), рассмотрим далее основные результаты исследований СЖК и реализованные на практике и планируемые к использованию в будущем разработки СЖК-приборов.

## Прогресс в исследованиях СЖК

Интенсивные исследования СЖК начались после того, как стало известно, что в них, в отличие от НЖК, достигаются субмиллисекундный электрооптический отклик и килогерцовые частоты модуляции света [4]. Эти параметры обусловлены быстрой реакцией вектора спонтанной поляризации молекулы СЖК на включение электрического поля того или иного знака, приводящего слой СЖК в то или иное оптическое состояние, характеризующееся определенной ориентацией молекул. В отличие от

НЖК, где только одно состояние задается электрическим полем, а к другому, после снятия электрического напряжения, кристалл возвращается за счет упругой силы и потому гораздо медленнее.

Пик исследований СЖК пришелся на конец восьмидесятых и девяностые годы прошлого столетия. Их результаты показали, что практическому использованию СЖК препятствуют следующие проблемы:

- узкий температурный интервал и сильная зависимость оптических свойств от температуры;
- изменение структуры слоя и оптических свойств при механическом воздействии (шок-проблема);
- трудности в обеспечении и сохранении устойчивой ориентации слоя на большой площади (десятки кв. см и более);
- гистерезисный характер модуляционной характеристики;
- достаточно высокое управляющее напряжение (3–6 В);
- бистабильный характер переключения оптического состояния, т. е. отсутствие непрерывной шкалы серого (полутонов), необходимой для получения цветов.

В результате в начале нового столетия большинство компаний отошло от исследований СЖК и продолжило поиск других, считавшихся более перспективными, в том числе быстрых материалов для дисплеев. Среди них органические светоизлучающие материалы (OLEDы), как более дешевые и потенциально приспособленные к пленочной и принтерной технологии, рассматривались как будущая замена НЖК. Чтобы приблизить это будущее, на рубеже нулевых и десятых годов компания Самсунг, а потом и другие компании вложили огромные инвестиции (около 25 миллиардов долларов) в развитие OLED-технологии и достигли определенных успехов. Но пока OLED-экраны, в основном, используются в малоформатных дисплеях, т. к. имеют большое энергопотребление (миллиамперы вместо микроамперов в ЖК) и со временем все же деградируют (искажают цветность), причем особенно быстро на высоких (сотни Гц) частотах. По отношению к НЖК они также проигрывают в направленности излучения и в цветовой гамме, которые обеспечиваются в ЖК-приборах монохроматическими источниками подсветки – светодиодами и лазерными диодами.

Необходимо также сказать о целом ряде разработанных в эти годы микродисплеев и проекторов, выполненных по другой конкурентной технологии – DLP (от «*Digital Light Processing*»), где базовой является матрица электрически управляемых микрзеркал. Эту разработку компании *Texas Instruments* подхватили *Christie*, *NEC* и многие другие компании, т. к. она позволяет формировать очень яркие изображения, но по сравнению с жидкокристаллической технологией «*LCoS*» («ЖК на Кремнии») микрзеркальная технология все же более дорогая и энергоемкая (управляющее напряжение – до 30 В), имеет большой (порядка 15 мкм) и трудно уменьшаемый размер пиксела и в силу механического принципа ей сложно обеспечить надежную работу на высоких частотах с адресацией большого массива данных.

Тем временем исследования СЖК и приборные разработки продолжались в компаниях *BNS* и *DisplayTech* (США), *ForthDD* (Великобритания), в Университете науки и технологии Гонконга (HKUST), в Московском ГУ им. М. В. Ломоносова, Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и постепенно привели к существенным практическим результатам. Расширился температурный интервал работы СЖК, были предложены эффективные методы обхода проблем гистерезиса и шока, разработана технология изготовления электрооптических ячеек, оптических затворов и даже приборов [1]. Непрерывную серую шкалу (полутона, а значит и цвета) в компании *DisplayTech* организовали с помощью дополнительной частотной модуляции сигнала [5], т. е. электронным образом, «разменяв» частоту модуляции в несколько кГц на биты полутонов.

Особенно большого успеха добились сотрудники ФИАН, которым в результате фундаментальных исследований удалось создать СЖК-материалы и экспериментальные электрооптические ячейки с уникальными характеристиками, а именно [1, 6–9]:

- в СЖК-ячейке апертурой 1 см<sup>2</sup> при напряжении ±1,5 Вольт в прозрачной моде впервые достигнуты оптический отклик со временем 30–50 мкс и максимальная частота модуляции света 7,0 кГц (от максимума к минимуму или наоборот с контрастом более 200:1) и, как в НЖК, получена модуляционная характеристика с физически реализуемой (без электронных ухищрений) непрерывной шкалой серого (рис. 1 и 2);

- в ячейке с другим типом СЖК-материала впервые обнаружен бистабильный режим интенсивного светорассеяния (контраст более 200:1) со временем включения-выключения оптического состояния (прозрачного или рассеивающего) менее 100 мкс и временем памяти до нескольких десятков секунд или до прихода импульса обратной полярности (рис. 3).

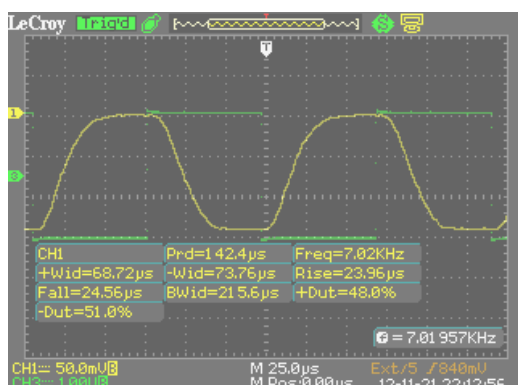


Рис. 1. Осциллограмма биполярного управляющего напряжения (нулевой уровень по цифре 3) и оптического отклика (нулевой уровень по цифре 1) для СЖК-ячейки толщиной 1,7 мкм при амплитуде управ-

ляющего напряжения  $\pm 1,5$  Вольт и частоте 7,0 кГц. Верхний уровень оптического отклика – закрытое состояние, нижний – пропускающее. Время электрооптического отклика по переднему фронту – *Rise*, по заднему фронту – *Fall*

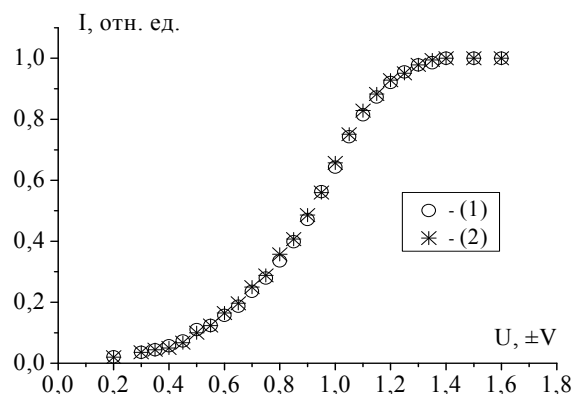
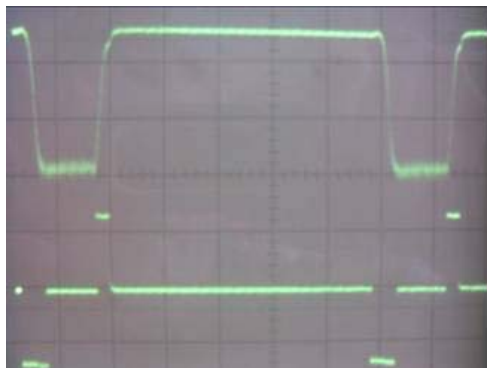
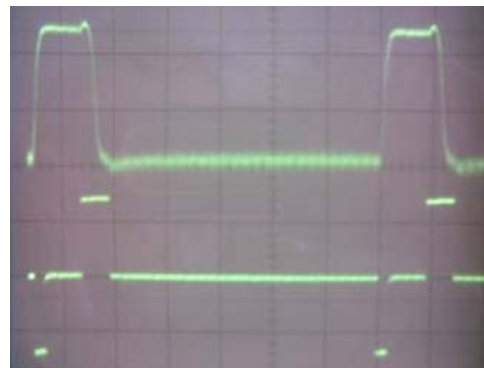


Рис. 2. Зависимость светопропускания *I* (в относительных единицах) в СЖК-ячейке толщиной 1,7 мкм от управляющего напряжения *U* (вольты) при его увеличении (1) и уменьшении (2) на частоте модуляции света 2 кГц



а



б

Рис. 3. Осциллограммы управляющего напряжения (внизу) и электрооптического отклика (вверху) при бистабильном режиме переключения СЖК-ячейки для двух инверсных относительно друг друга («а» и «б») оптических состояний. Верхний уровень электрооптического отклика – рассеивающее состояние, нижний – пропускающее. Управляющее напряжение – знакопеременные импульсы с амплитудой  $\pm 35$  В. Временной масштаб – 500 мкс на 1 деление. Толщина слоя СЖК 13 мкм

Указанные выше результаты исследований СЖК являются базой для самых разнообразных применений СЖК, так как обеспечивают им следующие инновационные преимущества по сравнению с НЖК:

- 1) многократное уменьшение времени оптического отклика (до 20–50 мкс);

- 2) многократное увеличение частоты смены кадров (до нескольких кГц);
- 3) увеличение как минимум в 2 раза яркости наблюдаемых на экране изображений, что обусловлено более полным открытием кадра при малом времени включения-выключения оптического отклика;

- 4) возможность использования последовательной во времени смены цветов, обеспечивающей получение более ярких неструктурированных цветных изображений и сокращение втрое числа дисплейных элементов при сохранении формата дисплея;
- 5) уменьшение как минимум вдвое энергопотребления и увеличение более чем вдвое времени автономной работы оптических затворов вследствие малого управляющего напряжения и возможности рекуперации электроэнергии;
- 6) упрощение электроники, управляющей электрооптическими ячейками, вследствие низкого напряжения питания;
- 7) придание ЖК-приборам новых функциональных свойств, не известных ранее или недостижимых вследствие «медлительности» НЖК.

Эти преимущества не имеют национальных границ и будут хорошо «работать» и в бытовой сфере, и особенно в профессиональной, ускоряя выход СЖК-приборов на мировой рынок емкостью в сотни миллионов изделий и в сотни миллиардов долларов.

В целом, инновационность заключается в синтезе нового СЖК-материала (СЖК-композиций), существенно превосходящего по своим свойствам все НЖК-материалы и известные ранее СЖК-материалы, в создании оригинальной технологии изготовления СЖК-ячеек и экранов и в нахождении алгоритмов электронного энергоэффективного управления модуляцией света в них, что в совокупности позволяет обеспечить в ЖК-устройствах широкого назначения повышенные оптические и динамические параметры и меньшее энергопотребление, т. е. улучшенные потребительские свойства. Как следствие, СЖК-технология может в большом числе случаев (не менее 10 %) заместить НЖК-технологии, обеспечив тем самым выход на рынок более качественной продукции и существенное расширение продуктового сегмента ЖК-приборов.

#### **Продвижение СЖК-приборов и разработок на рынок**

Первая попытка демонстрации дисплейного экрана с использованием бистабильного СЖК, предпринятая компанией *Canon* в конце восьмидесятых годов, была неудачной в силу многих

нерешенных проблем с СЖК, которые были указаны выше. Поэтому правильнее будет признать, что первой изготовила и стала продавать изделия на основе СЖК компания *DisplayTech* (основана в 1984 г.). Она освоила технологию создания СЖК-материала, бистабильных электрооптических ячеек и матриц и формирование в них цифровых цветных изображений, получая полутона путем «размена» исходной частоты модуляции в несколько кГц на биты полутонов с помощью электроники. Были произведены рабочие дисплейные матрицы форматов 640x480 (VGA), 800x600 (SVGA), 1280x960 (QVGA) и микродисплеи на основе структуры *LCoS* с СЖК, названной *FLCoS* (от сегнетоэлектрический = *ferroelectric*). За 10 с небольшим лет компания произвела более 20 млн. изделий, в том числе 5 млн. пикопрокторов [10].

В 2009 г. *DisplayTech* стала подразделением мощной *Micron Technology*, развивавшей полупроводниковые и интегральные технологии. Стали массово производиться *FLCoS* микродисплеи с разрешением 392 x 224 (WQVGA) на площадке диагональю 0,24 дюйма для персональных очков, встроенного в сотовый телефон пикопроектора и военных применений. Приборы работали в режиме последовательного ввода цветов с частотой 360 кадров/сек., имели 24-битный цвет, потребляли около 85 мВт и стоили меньше 10 долларов [11].

В Европе лидером в освоении СЖК-технологии стала шотландская компания *FDD* (*Forth Dimension Displays*, бывшая *CRL*), наладившая на базе структуры *FLCoS* разработку и производство около глазных отражающих высокоразрешающих микродисплеев и пространственных модуляторов света для исследований и применений в промышленности, медицине, военном деле [12].

В 2010 г. компанию *FDD* приобрела известная американская промышленная компания *Kopin*, до того производящая микродисплеи на основе структуры *LCoS* с НЖК, в основном, для систем военного назначения [13]. Стали широко выпускаться *FLCoS*-микродисплеи с бистабильным СЖК, используемые в цифровых камерах, видеокамерах, персональных видео-очках, видеокамерах, в системах 3D тренажеров, ночного видения, метрологических системах и в медицинских микроскопах. В настоящее время производство СЖК-микродисплеев уже достигает полумиллиона в год. Выручка компании составила

1,5 млрд. долл. в 2014, а в 2016 г. прогнозируется на уровне 6,0 млрд. долл. Цифровая серая шкала (полутона и цвета) в *FLCoS*-микродисплеях с бистабильным СЖК в *Kopin* тоже организована с помощью дополнительной частотной модуляции сигнала. Такой подход дал существенный выигрыш в цветовой разрешающей способности, даже при некотором повышении скорости смены кадров (до 240÷360 Гц), но по сравнению с *LCoS* он более трудоемок и дорог.

Указанные компании, овладевшие СЖК-технологией и организовавшие первое достаточно широкое приборное использование бистабильных СЖК, по сути стали монополистами в своей области. Другие производители СЖК-приборов не известны, хотя новые разработки в виде действующих экспериментальных моделей и демонстрационных макетов разных приборов (к сожалению, не полномасштабных прототипов) неоднократно экспонировались на дисплейных выставках и рекламировались в докладах на конференциях, прежде всего, Институтом науки и технологии Гонконга и Физическим институтом им. Лебедева РАН (ФИАН). Уникальные свойства разработанных в ФИАН низковольтных быстродействующих СЖК-материалов (некоторые из них используются и в Гонконге) являются предпосылкой для создания в будущем широкой гаммы востребованных на рынке приборов с новыми потребительскими свойствами. Важно, что достижимость этой цели уже доказана практически.

### Области применения и ключевые потребители СЖК-приборов

По данным маркетинговых агентств *DisplaySearch* и *DisplayBank* общий объем продаж мирового дисплейного рынка составляет более 300 млрд. долларов США в год, причем около 3/4 устройств на нем являются жидкокристаллическими, а всего их производится порядка одного миллиарда в год. Продажи только 3D-дисплеев в 2018 г. ожидаются в объеме 196 млн. ед., или 22 млрд. долларов. При этом отмечается, что в технологии 3D-дисплеев ЖК-технология будет доминировать, поскольку она масштабируема от производства огромных экранов для 3D-телевизоров до миниатюрных 3D-экранов мобильных устройств.

Информационно-коммуникационные системы не только завтрашнего, но уже и сегодняшнего дня требуют существенного повышения скорости

визуализации, отображения и обработки массивов данных (изображений), в том числе кодированных, распознаваемых, принимаемых/передаваемых по интернету, формируемых на экранах компьютерных и телевизионных мониторов и разнообразных смарт-приборов, и др. Тот факт, что разработанные экспериментальные образцы дисплейных СЖК-ячеек при том же, что в НЖК-приборах, и даже меньшем электрическом напряжении показывают близкую к ним по форме модуляционную характеристику (со шкалой полутонов и без гистерезиса), но в 10 и более раз превосходят по быстродействию, позволяет рассчитывать на использование СЖК в большой части жидкокристаллических приборов вместо НЖК, а именно:

- в микродисплеях *FLCoS* с управляющей кремниевой матрицей;
- в проекционных ТВ и в пикопроекторах на основе микродисплея;
- в стандартных активно-матричных экранах смарт-дисплеев;
- в разнообразных трехмерных ТВ, как в стерео (с очками) и авто-стереоскопических (безочковых), так и с объемным экраном (волюметрических);
- в оптических затворах разных приборов (фотокамер и др.);
- в бесполяридных модуляторах (в том числе пространственных) видимого и ближнего (до 3 мкм) инфракрасного диапазона;
- в фазо-модулирующих многоканальных переключателях света, сенсорах, в фазированных антенных решетках, устройствах адаптивной оптики и голографии;
- в спецтехнике, в том числе в скоростных системах обработки, кодирования и распознавания данных.

Потребителями СЖК-технологии потенциально являются производители всех ЖК-устройств в мире, изготавливаемых в настоящее время по НЖК технологии. Основные производители находятся в Корее, в Японии и в Китае (включая Гонконг и Тайвань). Среди них выделяются два корейских гиганта – компания *Samsung* (занимает около четверти мирового рынка дисплеев) и компания *LG* (более 10 % рынка). Многие компании-разработчики находятся в США и Европе, но используют для изготовления приборов производственную базу Китая и стран юго-восточной Азии.

Конкурентные преимущества новой СЖК-технологии таковы, что независимо от национальных границ многие компании в мире будут заинтересованы в ее освоении для производства систем 3D-визуализации, смартфонов, проекторов и стерео-очков. К таким компаниям, кроме уже названных, можно отнести также *Philips, Google, Apple, NEC, Merck, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Himax Display, CHI MEI Optoelectronics* и др., в том числе компании, специализирующиеся на изготовлении активных стерео-очков, например, *Xpand, Real D, Eyes3Shut, Bit Cauldron*, и компании, специализирующиеся на производстве компьютерных и проекционных 3D-дисплеев, например, *NVidia, Sony, Panasonic*. Можно предположить, что новое качество и новые функциональные свойства изделий с использованием СЖК обеспечат в будущем не менее 10 % рынка ЖК-приборов, включая в первую очередь требующие повышенного быстродействия смарт-приборы и трехмерные дисплеи.

К сожалению, пока на разработку новых СЖК-материалов в России не обращают внимание ни зарубежные производители (они получают стабильную прибыль от давно профинансированной ими НЖК-технологии), ни инвесторы (по причине недостаточной информированности, мирового финансового кризиса и санкций по отношению к России). В России же разработка остается невостребованной вследствие практически полного отсутствия здесь производителей ЖК-дисплеев и еще худшей финансовой ситуации у инвесторов. И все же разработчики надеются выйти на мировой рынок, что возможно на данном этапе посредством продажи производителям жидкокристаллических приборов лицензий на разрабатываемые технологии изготовления СЖК-материала и СЖК-дисплейных экранов, в предположении модернизации на этой основе существующих технологий, использующих нематические жидкие кристаллы. Возможна также покупка или взятие в лизинг зарубежных предприятий, с целью модернизации существующих на них технологий НЖК-экрана и электронной адресации и последующего производства СЖК-приборов.

### **Перспективы использования новых СЖК-материалов**

Далее кратко рассмотрим некоторые предложения российских разработчиков по использованию создаваемых ими быстродействующих СЖК-материалов в конкретных приборах, а также предло-

жение, иллюстрирующее разработку системы с новыми функциональными возможностями, которую можно было бы реализовать с такими СЖК.

#### *Активные оптические затворы для стерео-очков [14]*

Были изготовлены 2 действующие экспериментальные модели стерео-очков с оптическими затворами на основе СЖК: с питанием  $\pm 1,5$  В (способна визуализировать 3D-изображения на частоте 600 Гц) и с питанием  $\pm 3,0$  В (способна визуализировать изображения на частоте 1500 Гц). Время переключения оптического отклика при площади затворов 50x35 мм составило менее 100 мкс, так что перекрестные помехи (и медицинские противопоказания) отсутствуют. Оптический контраст был более 200:1, а угол обзора на его полуспаде – 40 град.

Питание осуществлялось от часовой батарейки-таблетки, встроенной в очковую оправу. Для сравнения, оптические затворы с НЖК в известных стерео-очках от компаний *nVidia* и *Xpand* требуют напряжение питания 12 и 20 В соответственно и преобразователь напряжения. Работоспособность СЖК-оптических затворов контролировалась с помощью импульсного осциллографа, поскольку высокочастотные 3D-дисплеи отсутствуют. Низкое управляющее напряжение снижает энергоемкость, упрощает электронику управления и конструкцию оправы. Разработанная схема управления позволяет использовать стерео-очки с современными НЖК-дисплеями и компьютерными мониторами, в том числе изготовленными разными производителями. Новые технические решения защищены патентами РФ №№ 2456649, 2488150, 2512095.

Указанные экспериментальные модели стерео-очков с СЖК-оптическими затворами успешно демонстрировались на конференциях в Фукуоке (2010 г.), Ганновере (2011 г.) и Лос-Анжелесе (2011 г.).

Предполагается развитие данной работы в направлении создания очков с локально-адаптивными светофильтрами (ЛАСФ) на основе СЖК-дисплейной матрицы с ограниченным числом элементов – пикселей, например, 100x100.

Такие очки необходимы для защиты глаз от вспышек и могут встраиваться в шлем пользователя. ЛАСФ автоматически понижает яркость от внешнего локального источника света и выравнивает уровни яркости всех участков сцены.

Делается это путем локального изменения оптического пропускания элементов СЖК-матрицы, в которые поступают сигналы от встроенных в них фотосенсоров. Ожидаемое время реакции ЛАСФ в 30–50 мкс и динамический диапазон (100–1000):1 могут привлечь большое число разнообразных пользователей очками: водителей автомашин и мотоциклов, горнолыжников, легчиков и космонавтов, сварщиков, сотрудников МЧС, военнослужащих, зрителей световых и авиа-шоу и др.

*Деспеклер (пространственно-неоднородный фазовый модулятор света)* [15, 16]

Лазеры – источники света для голографии и ярких проекционных дисплеев. Однако наблюдению качественных изображений в лазерном свете мешает спекл-шум, являющийся результатом интерференции многих световых волн, рассеянных различными точками экрана и оптическими элементами. Проблему устранения (подавления) спекл-шума в наблюдаемых изображениях решают путем разрушения фазовых соотношений в лазерном пучке с помощью устройства – деспеклера, который должен быть компактным, существенно превышать по временному отклику инерцию зрения, иметь разрешающую способность порядка тысячи 1/мм и не ухудшать интенсивность лазерного пучка и его направленность.

В качестве деспеклера, по сути пространственного фазового модулятора света, предло-

жено использовать простую (однопиксельную) и компактную (по апертуре лазерного пучка) СЖК-ячейку. Фазовые соотношения в лазерном пучке и соответственно спеклы разрушаются в ней при прохождении пучка, когда в слое СЖК под действием электрического напряжения 20–30 Вольт создаются пространственно неоднородные и случайно распределенные по всей апертуре мелкомасштабные вариации показателя преломления, приводящие к кратковременному рассеянию света и фазовой модуляции его глубиной порядка и более  $\pi$ . Для управления использовались биполярные двухчастотные импульсы напряжения.

Эффективность инновации проверена экспериментально с помощью экспериментальной модели деспеклера на основе СЖК-ячейки с двумя типами СЖК: геликоидальным (по патенту РФ № 2373558) и негеликоидальным (по патенту РФ № 2561307). Фото и графики на рис. 4 иллюстрируют изменение распределения интенсивности в сечении лазерного пучка, прошедшего через ячейку с геликоидальным СЖК, при приложении и в отсутствие управляющих импульсов. В ячейке с негеликоидальным СЖК продемонстрированы еще лучшие оптические характеристики пространственной модуляции излучения: отсутствие искажений в спектральном составе модулируемого светового излучения и отсутствие светорассеяния при выключении электрического поля.

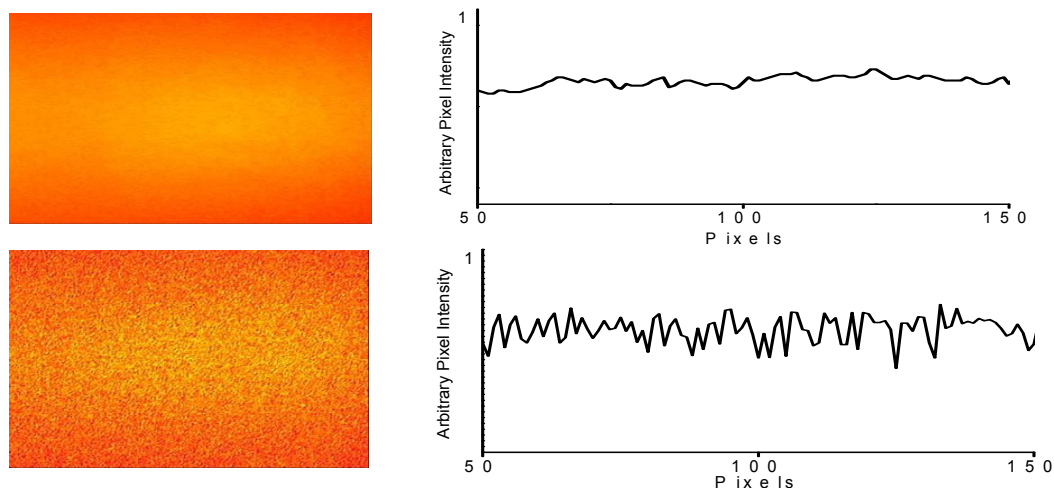


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через СЖК-ячейку с геликоидальным СЖК, при приложении электрических импульсов (вверху) и в их отсутствие. Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 450 Гц, амплитуда  $\pm 30$  В; частота модулирующего сигнала (знакопеременные импульсы) 3,5 кГц,  $\pm 20$  В



Инновационные преимущества СЖК-деспеклера: технологичность изготовления, управления и использования. По сравнению с вибрирующей мембраной или вращающейся фазовой маской, деспеклер на основе СЖК-ячейки обеспечивает большую простоту, стабильность и долговременную надежную работу. По сравнению с использованием фазового пространственного модулятора, формирующего ортогональные функции, обеспечивается существенное упрощение конструкции, технологии и электроники управления. По сравнению с использованием лазеров с удвоением частоты и параметрической генерацией или метода сканирования лучей и перемешивания их в волоконных световодах и трубках, в СЖК-ячейке имеет место значительное уменьшение световых потерь. Важно также, что размер апертуры СЖК-деспеклера можно варьировать от долей до нескольких кв. сантиметров при толщине ее 1–2 мм, включая стеклянные подложки и чип управления.

#### Скоростной видеопроектор [17]

Основой для создания скоростных 3D-видео проекторов, дисплеев и систем обработки данных (в том числе сигналов и изображений) является микродисплей со структурой «СЖК на Кремнии» (*FLCoS*). В ней могут быть использованы и геликоидальные, и негеликоидальные СЖК, обладающие малым управляющим напряжением, хорошо совместимым с кремниевыми интегральными схемами.

В патенте РФ № 2503050 предложена схема скоростного видео проектора с *FLCoS*-микродисплеем. При определенных условиях, заданных в патентах РФ № 2430393 и № 2503984, новый низковольтный СЖК обеспечивает физически реализуемую непрерывную полутоную безгистерезисную модуляционную характеристику. В качестве источника света в *RGB* цветовых каналах используются лазерные диоды. Для предотвращения интерференции лучей с образованием спекл-шума в выходном изображении в оптический блок считывания информации вводится деспеклер – ячейка с СЖК, осуществляющая быструю электрически управляемую пространственно-неоднородную фазовую модуляцию излучения глубиной  $\geq \pi$ .

Предложено с помощью двумерного сканера, оптически связанного с оптическим блоком считывания

информации и с экраном, осуществлять формирование на экране массивов информации емкостью в  $10^8 \dots 10^9$  пикселей с различной геометрической конфигурацией. Возможный технический результат – увеличение частоты смены кадров до 1 кГц, расширение цветовой гаммы, увеличение яркости, подавление спекл-шумов, что может быть использовано не только в новых устройствах визуализации и отображения информации, но также в системах хранения и обработки данных и других.

Формирование массивов данных с кадровой частотой не менее 2,5 кГц позволит вводить не менее 100 изображений сечений 3D-объекта (сцены) в объемный экран трехмерного (волюметрического) дисплея. Формирование с кадровой частотой не менее 5 кГц информационных данных (сигналов, изображений) размером порядка и более  $1000 \times 1000$  бит и цветностью 8 бит обеспечит рекордную производительность обработки в  $10^{12}$  бит/сек и позволит:

- быстро менять согласованные фильтры в оптоэлектронных корреляторах, идентифицирующих (опознающих) сигналы и изображения по их схожести с эталоном;
- быстро переустанавливать данные для запроса и ответа в системах «свой-чужой»;
- выполнять высокопроизводительное кодирование-декодирование массивов информации (включая массивы сигналов и изображения);
- вести сверхбыстрое распознавание целей или сравнение отпечатков пальцев и изображений лиц в охранных системах;
- участвовать в сверхточном наведении и многое другое.

Предполагается, что современные достижения электроники позволяют создать драйверы для адресации указанных информационных массивов в пространственно-временных модуляторах света на основе *FLCoS*-микродисплея.

#### 3D-дисплей с объемным экраном (волюметрический дисплей) [18–20]

Предложен волюметрический дисплей (по патентам РФ № 2219588 и № 2429513), состоящий из скоростного видеопроектора (по патенту РФ № 2503050), оптической (лазерной) проекционной системы и объемного экрана типа «аквариум», составленного из пакета плоских оптических светорассеивающих СЖК-затворов. Обходя такой

многослойный экран с разных сторон многие наблюдатели одновременно и без очков могут рассматривать визуализируемый в экране световой макет сцены. Этот макет формируется в «аквариуме» по сечениям, каждое из которых визуализируется в тонком жидкокристаллическом слое «своего» оптического затвора благодаря переключению жидкого кристалла электрическим напряжением из прозрачного в рассеивающее свет состояние. Рассеяние включается и выключается в каждом затворе по-очереди, и именно в момент рассеяния на затвор скоростным видеопроектором проецируется изображение данного сечения сцены.

Если все сечения поступают и визуализируются с частотой, большей чем 25 кадров в секунду, то световой макет сцены с движущимися объектами наблюдается в объемном экране под разными углами и с плавным оглядыванием как целое и непрерывное, то есть наиболее реалистичное.

Чем больше число светорассеивающих затворов (равно числу сечений сцены), тем больше должна быть частота посылки изображений сечений видеопроектором. Так, для 100 сечений частота кадров видеопроектора должна быть  $100 \times 25 = 2500$  Гц. С такой же частотой должны повторяться включение и выключение светорассеяния в пакете оптических затворов, а длительность процесса включения, выключения и собственно рассеяния в каждом затворе должна укладываться в период кадра, то есть быть равной 400 микросекундам. СЖК-материалы, разработанные и для микродисплея видеопроектора, и для светорассеивающих затворов явно удовлетворяют этим условиям.

Аналог разработки – это дисплей «*Depth-Cube Z1024*» компании *Space Light Technology* (рис. 5) с видеопроектором DLP и 20 оптическими затворами на основе модифицированного НЖК, на которые для ускорения выключения исходного рассеивающего света подавалось напряжение 100 В.

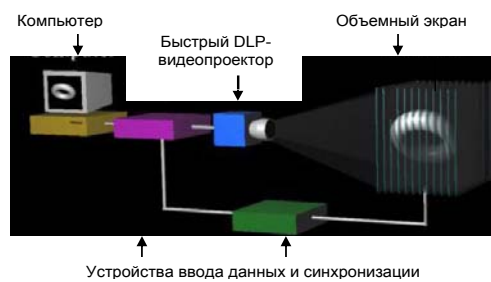


Рис. 5. Схема дисплея «*Depth-Cube Z1024*» компании *Space Light Technology*

В ФИАНе совместно с МИФИ была изготовлена действующая экспериментальная модель объемного экрана из пяти светорассеивающих СЖК-ячеек (рис. 6).

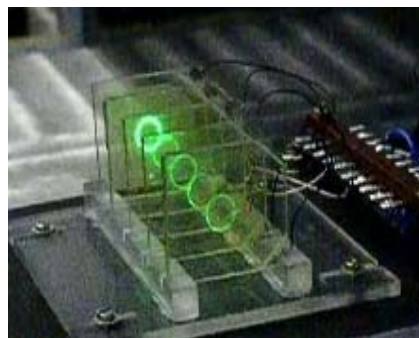


Рис. 6. Экспериментальная модель объемного экрана из пяти светорассеивающих СЖК-ячеек в ФИАН

При  $\pm 36$  Вольт управляющего напряжения в них были продемонстрированы характеристики рассеяния света, позволяющие визуализировать световой макет объекта из 100 сечений, поскольку СЖК в оптических затворах обеспечивал частоту модуляции светорассеяния 2,5 кГц. Поскольку частота кадров видеопроектора 2,5 кГц тоже обеспечивается с помощью СЖК, то возможность создания 3D-дисплея с объемным экраном будет ограничиваться уже не СЖК, а способностью электроники формировать с такой же частотой массивы данных в микродисплее типа *FLCoS*. Но сделать это, с учетом малого управляющего напряжения СЖК, гораздо легче, чем в *DLP*.

Конечно, число электрически управляемых светорассеивающих затворов в многослойном объемном экране определяется не только их быстродействием, но и потерями на поглощение в слоях. Чтобы иметь во всех затворах одинаковую интенсивность проходящего света, можно программно компенсировать уменьшение яркости визуализации сечений по мере удаления их от источника света. Тогда, как показывает расчет (для возможного пропускания каждым затвором 99 % света), при визуализации тестового изображения на первом из ста затворов его входная интенсивность должна составлять только 36 % от входной интенсивности этого изображения, визуализированного на сотом затворе.

Дисплей визуализирует объект или сцену как «ясновидящий», т. е. объект видится в объемном экране как бы насквозь. Понятно, что для быто-

вого телевизионного использования такой дисплей не подходит, но он имеет свою и очень даже широкую нишу научно-технических, модельных, военных и др. применений, где заданы координаты и желательна или необходима визуализация внутренней пространственной структуры объекта. Наглядными примерами таких применений могут служить отображение в реальном времени позиций летательных аппаратов в контролируемой аэро- или космической зоне, визуализация томографических данных в медицине (четырёхмерная диагностика), таможенный контроль, тренажеры, компьютерное моделирование и конструирование, визуализация данных сейсморазведки полезных ископаемых, моделирование пространственно-временных распределений электромагнитных полей и многое другое, не исключая рекламу и компьютерные игры.

Сравнивая разные типы объемных экранов, работающих на принципе рассеяния света, нужно отметить такие достоинства экрана рассмотренного типа, по отношению к движущимся экранам компаний *Actuality Systems, Inc.* или *FELIX 3D*, как отсутствие движущихся деталей, защитного кожуха и жесткой стабилизации,

«мертвой» зоны вблизи оси вращения, а также простое программное обеспечение и управление.

Можно заметить, что многократно повышенное (по сравнению с НЖК) быстродействие СЖК может быть также использовано в известных схемах безочковых автостереоскопических дисплеев с параллаксным барьером или лентичулярным растром для многократного увеличения в них числа зон наблюдения.

#### *Новые методы, приборы и системы отображения информации*

В скором будущем можно предвидеть разработку новых методов отображения, учитывающих уникальные свойства быстродействующих СЖК-материалов и обеспечивающих создание приборов и систем с новыми функциональными свойствами, что пока недоступно вследствие ограниченного быстродействия НЖК. Возможно, в качестве первого такого примера можно привести многопрограммную и многопользовательскую стерео очковую систему трехмерного видения, предложенную в патентной заявке США US2010/0177172 A1 от 15.07. 2010 (см. рис. 7).

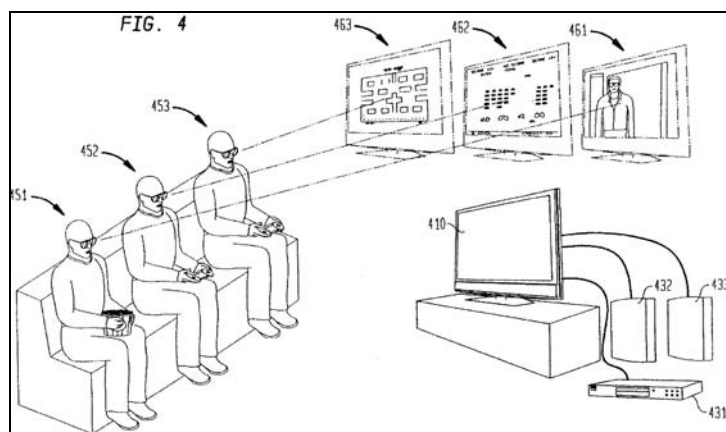


Рис. 7. Схема одновременного просмотра разных информационных программ на экране одного монитора по патентной заявке США US2010/0177172 A1

На рисунке 7 несколько зрителей, вооруженных стерео-очками и наушниками, смотрят на экран одного телевизионного дисплея, но каждый видит на экране только свою информационную программу, на которую он настраивает свои стерео-очки и наушники. Это возможно, если программы разделены по

частотным диапазонам их визуализации в пределах общего интервала частоты кадров, превышающего каждый диапазон в несколько раз. Кроме такого «семейного» применения разработка может использоваться в системах передачи кодированной информации и других.

Из возможных в скором времени новых применений СЖК также ожидаются динамические голографические решетки и элементы адаптивной оптики, основанные на новых методах эффективной фазовой модуляции света, бесполяроидные ИК-модуляторы света, основанные на высокочастотной модуляции светорассеяния, и другие.

### Заключение

В обзоре рассмотрены проблемы в развитии дисплейных технологий с использованием НЖК и прогресс в разработке в ФИАНе новых смектических ЖК-материалов с сегнетоэлектрическими свойствами (СЖК), приведший к созданию экспериментальных СЖК-ячеек со следующими уникальными характеристиками:

– при модуляции света в прозрачной моде впервые достигнуты оптический отклик со временем 30–50 мкс и частота модуляции 7,0 кГц при напряжении  $\pm 1,5$  В и получена модуляционная характеристика с реализуемой физически непрерывной шкалой серого;

– при модуляции света в светорассеивающей моде впервые получен бистабильный режим рассеяния с временем отклика менее 100 мкс и временем памяти оптического состояния (прозрачного или рассеивающего) до нескольких десятков секунд или до прихода импульса обратной полярности.

Эти результаты обеспечивают существенные инновационные преимущества СЖК по отношению к НЖК и являются базой для многих перспективных применений СЖК.

Пока доля приборов, использующих бистабильные СЖК, составляет на мировом рынке менее 0,1 %, в то время как доля приборов с НЖК превышает 70 %. Однако можно рассчитывать, что новое качество и новые функциональные свойства изделий с использованием СЖК обеспечат в будущем не менее 10 % этого многомиллиардного рынка, включая требующие повышенного быстродействия смарт-приборы и трехмерные дисплеи. Способствующим фактом может также явиться близость технологий изготовления приборов на основе СЖК и НЖК.

Потенциальными потребителями результатов работы являются все пользователи жидкокристаллических приборов, а также других типов дисплеев, которые уже не будут удовлетворять возросшим требованиям по частоте кадров и другим условиям комфортного наблюдения

изображений. Возможно также расширение круга потребителей вследствие приобретения приборами с СЖК новых функциональных свойств, недостижимых ранее в более «медленных» приборах с НЖК.

Кроме практического применения известных бистабильных СЖК в микродисплеях и пикопроекторах, в обзоре рассмотрены предлагаемые и экспериментально проверенные авторами будущие перспективные применения новых быстродействующих СЖК и в прозрачной, и в светорассеивающей модах. К сожалению, отсутствие необходимой технологической базы и финансирования пока не позволили этим применениям стать реальностью.

*Авторы благодарят Президиум РАН за поддержку работы по Программе фундаментальных исследований и Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку работы по грантам № 14-07-00185а и № 14-07-92601.*

### Список литературы / References

1. Андреев А. Л., Компанец И. Н. Жидкокристаллические дисплеи: перспективы развития. Часть 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 6 (00120). С. 72–88 [Andreev A. L., Kompanets I. N. Zhidkokristallicheskie displei: perspektivy razvitiya. Chast' 1 (Liquid crystal displays: development prospects. Part 1) // Elektronika: nauka, tehnologiya, biznes (Electronics: science, technology, business). 2012. № 6 (00120). P. 72–88 (in Russian)].
2. Лосева М. В., Пожидаяев Е. П., Рабинович А. З., Чернова Н. И., Иващенко А. В. Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы // Итоги науки и техники (ВИНИТИ), Сер. «Физическая химия». М., 1990. Т. 3. 192 с. [Loseva M. V., Pozhidaev E. P., Rabinovich A. Z., Chernova N. I., Ivashchenko A. V. Segnetoelektricheskie zhidkie kristally (Ferroelectric liquid crystals) // Itogi nauki i tekhniki (Results of Science and Technology), VINITI, Ser. «Fizicheskaya Khimiya» (Seria «Physical Chemistry»). Moscow, 1990. Vol. 3. 192 p. (in Russian)].
3. Lagerwall S. T. Ferroelectric and antiferroelectric Liquid Crystals // WILEY-VCH Verlag GmbH, Germany, 1999. P. 241–257.
4. Clark N. A., Lagerwall S. T. Sub-microsecond switching in ferroelectric liquid crystals // Journal of Applied Physics. 1980. Vol. 36. P. 899–903.
5. Handschy M. A., Clark N. A., Lagerwall S. T. Field-induced 1st-order orientation transitions in ferroelectric liquid crystals // Physical Review Letters. 1983. Vol. 51. P. 471–474.

6. *Andreev A. L., Kompanets I. N.* Unique parameters of display cells based on new FLC, and prospects of their applications // XXXIII International Display Research Conference (EuroDisplay-2013). London, 2013. Abstract book. P. 185–188.
7. *Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N., Zalyapin N. V.* Optical response of helix-free FLC: continuous gray scale, fastest response, and lowest control voltage // Journal of the Society for Information Display. 2014. Vol. 22, Iss. 2. P. 115–121.
8. *Андреев А. Л., Андреева Т. Б., Компанец И. Н., Бобылев Ю. П., Гончаков С. А., Минченко М. В., Шошин В. М.* Управляемое электрическим полем рассеяние света в геликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 12. С. 52–61 [*Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N., Bobilev Yu. P., Minchenko M. V., Shoshin V. M., Gonchukov S. A.* Electric-field-controlled light scattering in helix ferroelectric liquid crystals // Journal of Optical technology. 2010. Vol. 77, Iss. 12. P. 776–783].
9. *Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N., Zalyapin N. V., Xu H., Pivnenko M., Chu D.* Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals // Journal of Applied Optics (submitted).
10. *Darmon D., McNeil J. R., Handschy M. A.* LED-Illuminated Pico Projector Architectures // Symposium of the Society for Information Display. Abstract book. Los Angeles, 2008. Vol. 39. P. 1070–1073.
11. *Chinnock Chris.* Micron Buys DisplayTech: Key Validation of Pico Market // Display Daily. 2009, May 20.
12. *Brennesholtz Matt.* ForthDD Introduces WXGA Microdisplay // Display Daily. 2009, May 13.
13. <http://www.kopin.com>.
14. *Andreev A. L., Ezhov V. A., Kompanets I. N., Sobolev A. G.* Stereo glasses with fast low voltage FLC shutters // Symposium of the Society for Information Display. Abstract book. Los Angeles, 2011. Vol. 42. P. 90–92.
15. *Андреев А. Л., Андреева Т. Б., Компанец И. Н., Минченко М. В., Пожидаев Е. П.* Подавление спекл-шума с помощью жидкокристаллической ячейки // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 12. С. 1166–1170 [*Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N., Minchenko M. V., Pozhidaev E. P.* Speckle suppression using a liquid-crystal cell // Quantum Electronics. 2008. Vol. 38, № 12. P. 1166–1170]. DOI: 10.1070/QE2008v038n12ABEH013894.
16. *Андреев А. Л., Андреева Т. Б., Компанец И. Н., Заляпин Н. В.* Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического ЖК // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 12. С. 1136–1140 [*Andreev A. L., Andreeva T. B., Kompanets I. N., Zalyapin N. V.* Speckle noise suppression using a helix-free ferroelectric liquid crystal cell // Quantum Electronics. 2014. Vol. 44, № 12. P. 1136–1140]. DOI: 10.1070/QE2014v044n12ABEH015587.
17. *Андреев А. Л., Компанец И. Н.* Жидкокристаллические дисплеи: перспективы развития (часть 2) // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2012. № 7 (00121). С. 140–144 [*Andreev A. L., Kompanets I. N.* Zhidkokristallicheskie displei: perspektivy razvitiya, chast' 2 (Liquid crystal displays: prospects of the development, part 2) // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes (Electronics: Science, Technology, Business). 2012. № 7 (00121). P. 140–144 (in Russian)].
18. *Kompanets I. N., Gonchukov S. A.* Volumetric displays // Current Research on Image Processing for 3D Information Displays (Proc. SPIE). 2005. Vol. 5821. P. 125–136.
19. *Компанец И. Н., Гончуков С. А.* Трехмерные дисплеи на объемных средах // Наукоемкие технологии. 2004. № 2/3. С. 4–13 [*Kompanets I. N., Gonchukov S. A.* Trekhmernye displei na ob'emnykh sredakh (Three-dimensional displays on volume media) // Naukoemkie tekhnologii (High technologies). 2004. № 2/3. P. 4–13 (in Russian)].
20. *Kompanets I. N., Gonchukov S. A.* Three-dimensional laser display on liquid-crystal medium // Laser Physics Letters. 2004. Vol. 1, Iss. 10. P. 511–515.

Поступила в редакцию 16.07.2015 г.