

## ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ

**Микродисплеи в системах пространственной модуляции света**

И.Н.Компанец, А.Л.Андреев

*Рассматриваются характеристики современных микродисплеев на базе жидких кристаллов и электромеханических микрзеркал, способных в качестве пространственных модуляторов света быстро формировать в оптическом виде большие массивы информации для их записи в виде голограмм, а также для обработки информации. Оценены возможности использования микродисплеев для визуализации цифровых голограмм в реальном времени.*

**Ключевые слова:** микродисплеи, пространственные модуляторы света, обработка информации, голография.

**1. Введение**

Голографический метод позволяет наблюдать восстанавливаемые из голограммы трехмерные изображения без стереочков и с непрерывным параллаксом, т.е. с наибольшей реалистичностью. С другой стороны, при использовании сфокусированных лазерных пучков изображение (страница информации) может быть записано в голограмме с очень высокой ( $\sim 10^4$  бит/мм<sup>2</sup>) плотностью. На одном участке регистрирующей среды без существенного ухудшения качества можно записать и независимо восстановить целый ряд так называемых мультиплексных голограмм. Более того, сдвигая пучок в объемной регистрирующей среде, можно записывать информацию на разной ее глубине, благодаря чему может быть создана оптическая голографическая память сверхбольшой емкости [1].

Поскольку голограмма является суперпозицией двух оптических полей, она может быть смоделирована математически, вычислена с помощью компьютера и представлена в цифровом виде на регистрирующей среде, с которой лазерный пучок восстановит исходный трехмерный образ. Это свойство широко используется на практике с целью создания удобных для применения в оптических схемах плоских и легких голографических оптических элементов (линз, зеркал, дифракционных решеток и т.п.); для синтеза сложных голографических фильтров, инвариантных к геометрическим преобразованиям распознаваемых изображений; в интерферометрии с целью анализа и синтеза волновых полей и их сравнения (например, при решении практических задач неразрушающего контроля деталей в промышленности). На основе принципа восстановления синтезированных компьютером голограмм возможно также создание действующего

в реальном времени интерактивного голографического дисплея.

Формирование информационных массивов осуществляется с помощью электрически управляемых пространственных модуляторов света (ПМС), способных модулировать амплитуду, фазу или поляризацию световых волн в пространстве и передавать на оптической несущей (в данном случае лазерной) сформированное изображение в оптические системы хранения, обработки и отображения информации [1–3].

На практике в качестве ПМС используются дисплеи, т.е. отображающие устройства, в которых обеспечен оптический съем – считывание лазерным пучком отображаемой информации. Быстрой работе дисплеев способствуют их компактность и управление с помощью микро- и интегральных схем, поэтому их и называют микродисплеями. Несмотря на малый экран (обычно от сантиметра до дюйма по диагонали), это полноценные дисплеи со стандартным управлением, привычным быстродействием (60–90–120 кадр./с) и числом элементов экрана (форматом) порядка 1000 × 1000 пикселей и более. Вкупе с проекционной оптикой они способны отображать на проекционном экране изображения площадью в несколько единиц и даже десятков квадратных метров.

Наиболее распространенными и коммерчески важными для пространственной модуляции света являются следующие типы микродисплеев [3–8]:

- АМ ЖКД (AMLCD) – пропускающие свет жидкокристаллические дисплеи с активной матрицей управления на тонкопленочных транзисторах и с нематическим ЖК (НЖК) в качестве электрооптической среды экрана;
- LCoS (ЖКнК) и FLCoS (СЖКнК) – отражающие свет жидкокристаллические дисплеи с активной матрицей управления, встроенной в кремниевую подложку, и с нематическим ЖК или со смектическим сегнетоэлектрическим ЖК (СЖК) в качестве электрооптической среды экрана;

- DMD-дисплеи – отражающие свет микроэлектромеханические (МЭМ) цифровые дисплеи с активной матрицей управления, встроенной в кремниевую подложку, и с матрицей монтируемых на ней отклоняемых микрзеркал.

В комплект (систему) любого из указанных микродисплеев должен также входить блок считывания отобра-

**И.Н.Компанец.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: kompan@sci.lebedev.ru  
**А.Л.Андреев.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 24 января 2017 г., после доработки – 16 февраля 2017 г.

жаемой информации, включающий в себя источник света и оптическую схему с элементами (линзы, фильтры, поляризаторы, деспеклер и др.), причем оптическое качество микродисплея и блока считывания обеспечивает без искажений передачу (проецирование) информации с экрана микродисплея согласно ее назначению – для записи в голограмму, для преобразования или отображения и т. п.

В данном обзоре мы не рассматриваем (по причине их неприменимости в качестве ПМС) ряд широко используемых микродисплеев: LBS-микродисплеи с растровым сканированием лазерного луча с помощью одного или двух микроэлектромеханических зеркал (используются в пикопроекторах), светоизлучающие OLED-микродисплеи на основе тонкого слоя органического электролюминесцентного материала (в экранах мобильных телефонов и гаджетов), светоизлучающие микродисплеи на основе матрицы светодиодов (в яркой рекламе и индикаторах).

Ниже более детально рассмотрены особенности технологии используемых ПМС и достигнутые в них параметры, а также их применения (настоящие и перспективные) в голографии и для обработки информации.

## 2. Характеристики ПМС

### 2.1. Светопропускающие ЖК ПМС [6, 7]

Все светопропускающие ПМС являются жидкокристаллическими, и в них используются НЖК. Схема электрооптической модулирующей части (экрана) такого ПМС (дисплея, микродисплея), представляющей собой ЖК ячейку, показана на рис.1.б. Она состоит из двух плоскопараллельных диэлектрических пластин 3 (как правило, стеклянных подложек), расстояние между которыми обычно равно 1.5–10 мкм. Это расстояние фиксируется с помощью специальных калиброванных прокладок или шариков – спейсеров. На внутренние поверхности пластин для обеспечения электрического воздействия на ЖК нанесены прозрачные токопроводящие покрытия 4. Пространство между пластинами заполнено ЖК материалом 7, оптическая анизотропия которого может изменяться в зависимости от амплитуды и длительности импульсов электрического напряжения, подаваемого от генератора 1 на токопроводящие покрытия 4. На них нанесены защитная диэлектрическая пленка 5 и полимерная пленка 6, обеспечивающая начальную однородную ориентацию длинных осей молекул (директора) ЖК в отсутствие электрического поля. На внешнюю сторону стеклянных пла-

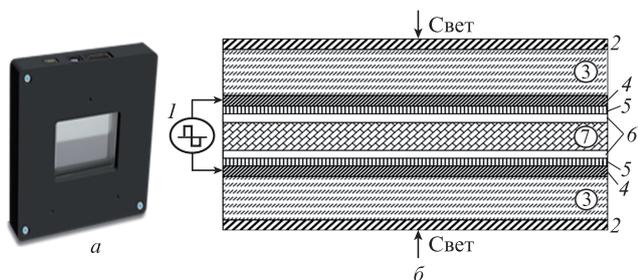


Рис.1. Внешний вид светопропускающего ПМС LC-2012 компании Holoeye (а) и схема конструкции электрооптической ЖК ячейки (б):

1 – генератор управляющего напряжения; 2 – тонкопленочные поляризаторы; 3 – стеклянные подложки; 4 – прозрачные проводящие покрытия (ITO); 5 – прозрачная диэлектрическая пленка; 6 – прозрачная анизотропная (ориентирующая) пленка; 7 – слой ЖК.

стин могут быть наклеены тонкопленочные поляризаторы 2 для преобразования фазово-поляризационной модуляции света в амплитудную.

Светопропускающие ПМС адресуются с помощью так называемой активной матрицы электронных ключей на базе тонкопленочных транзисторов, обычно располагаемых в углу каждого пикселя. По этой причине, а также в связи с наличием контактных шин в межэлектродных промежутках, коэффициент заполнения экранов ПМС недостаточно высок (~60%).

Наиболее известными и коммерчески доступными являются ПМС компаний Holoeye и Meadowlark Optics, производящих светопропускающие приборы разных типов для модуляции фазы, амплитуды и поляризации. Например, ПМС LC-2012 (Holoeye) (рис.1.а) формата 1024 × 768 пикселей с шагом 36 мкм способен с частотой 60 кадр./с формировать массивы данных с 256 градациями серого (8 бит), обеспечивая чисто фазовый сдвиг до  $2\pi$  на длине волны 450 нм и  $1\pi$  на длине волны 800 нм с контрастным отношением до 1000:1. Фазовый ПМС типа HEX компании Meadowlark Optics имеет рабочую апертуру в форме диска и 127 пикселей гексагональной формы; в качестве чисто фазовой маски он способен осуществлять коррекцию линейно поляризованного волнового фронта, прошедшего через абберационную среду.

### 2.2. ЖК ПМС на основе структуры LCoS [3, 4, 6–11]

Схема отдельного элемента светоотражающей структуры LCoS (НЖКнК), ее положение в матрице микродисплея и его внешний вид (с обрамлением и контактными шинами для связи с отдельно отстоящим управляющим блоком-контроллером) показаны на рис.2.

Адресация элементов микродисплея осуществляется с помощью электронных ключей, формируемых в кремниевой пластине по КМОП-технологии. В верхнем уровне металлизации на кремнии создается матричная система алюминиевых зеркал, выполняющих роль управляющих электродов для каждой индивидуальной жидкокристаллической электрооптической ячейки и в то же время отражающих падающий на ячейку свет. Для обеспечения электрической изоляции между электродами в матрице зеркал сделаны небольшие промежутки, которые заполняются блокирующим свет материалом. В ряде пересечений промежутков наращиваются спейсеры, определяющие

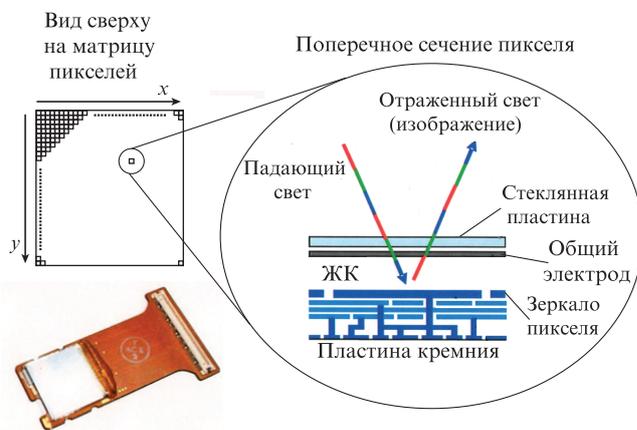


Рис.2. Схема элемента микродисплея LCoS (справа), ее положение в матрице и внешний вид микродисплея сверху с обрамлением и контактной шиной (слева) (DD [12]).

толщину ЖК ячейки (единицы микрон) и служащие опорой для стеклянной пластины с общим прозрачным электродом, диэлектрическим защитным слоем и слоем полимера для ориентации ЖК. Жидкий кристалл заливается в просвет между кремниевой и стеклянной пластинами, и вся ячейка герметизируется. С помощью шины структура соединяется с контроллером, формирующим исходные для отображения электронные данные.

Визуализация формируемой в микродисплее информации осуществляется с помощью светодиодной подсветки при отражении излучения от зеркал и его двойном прохождении через слой ЖК. С помощью проецирующей оптики сформированное в жидкокристаллическом слое изображение передается в выходной канал (голограмма, световод, проекционный экран и др.).

Технология отличается простотой (используются стандартные процессы микроэлектронного производства), чрезвычайно малым размером пикселей (3–5 мкм), высоким фактором заполнения (около 93% при шаге пикселей 4 мкм и промежутке между ними 0.2 мкм) и низкими затратами на изготовление [3]. Последние достижения в интегральной схемотехнике и в ЖК материалах позволили японским компаниям JVC и NHK [9] создать LCoS микродисплей формата 8K × 4K пикселей при шаге 4.8 мкм и увеличить контрастное отношение до 100К : 1. Типичное светопропускание такого микродисплея составляет 70%–80%, время оптического отклика равно ~1 мс, температура хранения варьируется от –50 до 100 °С, рабочий интервал ЖК фазы – от –20 до 80 °С. Отражающая мода и эффективный теплоотвод через кремниевую пластину позволили достичь плотности светового потока 2100 лм/см<sup>2</sup>.

Другая японская компания (Hamamatsu) предлагает множество различных ПМС типа LCoS-SLM для фазовой модуляции излучения [10, 11]. Три серии (X10468 и X13267 формата SVGA (800 × 600 пикселей) и X13138 формата SXGA (1280 × 1024 пикселей) по девять типов приборов в каждой серии со спектральным интервалом считывающего излучения в несколько сотен нанометров (например, 400–700 нм) или всего лишь 50 нм перекрывают спектральный диапазон 400–1550 нм. Изменение фазы от 0 до 2.25π линейно связано с изменением входного сигнала (фиксируются 256 уровней). Эффективность считывания составляет ~80% для широкополосных ПМС и достигает 98% для узкополосных (с диэлектрическим зеркалом). Однако частота 60 кадр./с обеспечивается примерно только для половины приборов. Типичный шаг (размер матрицы) составляет в указанных сериях 15.8 × 12 мм, 9.9 × 7.5 мм и 15.9 × 12.8 мм соответственно. Все ПМС управляются персональным компьютером с помощью стандартного цифрового интерфейса.

Хорошо известными и коммерчески доступными являются также монохромные ПМС компаний Holoeye и Meadowlark Optics. В серии ПМС компании Holoeye [6] микродисплей GAEA для чисто фазовой модуляции поражает своим форматом, 4094 × 2464 (около 10 мегапикселей), разрешением (133.5 лин./мм, шаг пикселя 3.74 мкм), размером диагонали рабочей матрицы (0.7 дюйма) и 256-ю уровнями серого (8 бит). Он работает с частотой всего 24 кадр./с, но при использовании интерфейса HDMI версии 1.4 и прилагаемого программного обеспечения Pattern Generator скорость работы повышается до 30 кадр./с, правда, для меньшего формата – 3840 × 2160 пикселей. Частоту 60 Гц имеют чисто фазовые ПМС Pluto и Leto

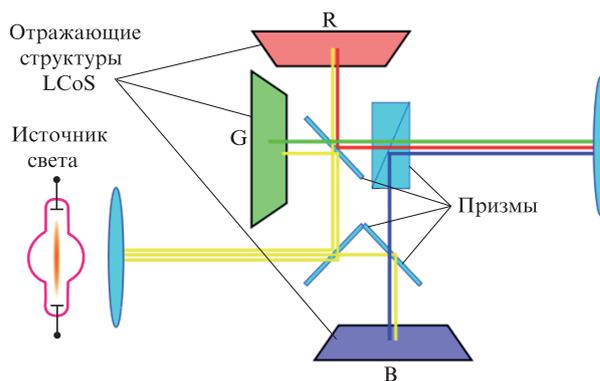


Рис.3. Схема формирования цветных изображений с помощью отражающей структуры LCoS (<https://ru.wikipedia.org/wiki/LCoS>).

форматом 1920 × 1080 пикселей (HD) с шагом 8.0 и 6.4 мкм и размером диагонали экрана 0.7 и 0.55 дюйма соответственно. ПМС LC-R-720 для амплитудно-фазовой модуляции отличается повышенным быстродействием (180 кадр./с), которое обеспечивает закрученная структура НЖК.

Meadowlark Optics [7] предложила использовать для модуляции фазы, амплитуды и смешанной модуляции одномерную решетку из 12288 пикселей с шагом 1.6 мкм и промежутком между ними 0.6 мкм, изготавливаемую по технологии LCoS и хорошо востребованную в голографии. Дифракционная эффективность решетки достигает 95%, а разрешение – 500 уровней в интервале изменения фазы от 0 до 2π. Кроме того, для тех же целей компанией производится матричные ПМС форматом 256 × 256 и 512 × 512 пикселей.

Цветные изображения формируют обычно по схеме с тремя микродисплеями LCoS в оптических RGB-каналах (рис.3).

Используя НЖК с повышенной скоростью переключения и метод последовательной во времени смены цветов (FSC, Field Sequential Color), реализуемый с помощью трех поочередно включаемых ярких RGB-светодиодов (или лазерных диодов), компания Syndiant (США) создала технологию производства VueG8-микродисплея для пикопроекторов, пригодного и для цифровой голографии [8].

На рис.4 приведены схемы FSC-метода и наиболее часто используемого до настоящего времени метода пространственного формирования цветов с помощью субпикселей. FSC-метод предполагает работу без субпикселей, а значит и цветных RGB-фильтров, и потому обеспечивает менее структурированные (сглаженные) и вдвое более яркие изображения, а также дает технологические преимущества, т.к. при том же формате дисплея требуется втрое меньшее число адресуемых пикселей. Кроме того, поскольку структура FSC-LCoS имеет более простой дизайн, в конструкции встроены элементы электрического, а не оптического (более сложного) тестирования

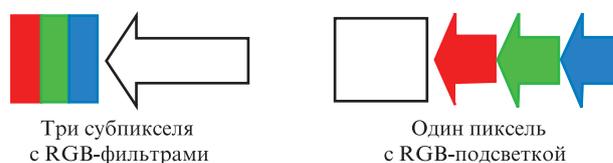


Рис.4. Методы пространственного (слева) и последовательного во времени (справа) формирования цветов элементом изображения.

работоспособности структуры LCoS. По другим параметрам – размерам пикселей, фактору заполнения, оптическому контрасту – оба типа LCoS-микродисплеев не различаются.

### 2.3. Микродисплеи и ПМС со структурой FLCoS [12–16]

Микродисплей с сегнетоэлектрическим ЖК отличаются от НЖК-LCoS тем, что СЖК могут переключаться в десятки раз быстрее, чем НЖК, и управляются короткими биполярными импульсами напряжения. Это обусловило повышенные требования к технологии их изготовления. Однако КМОП-технология, основанная на использовании больших объемов межсоединений в компактной упаковке, позволила обеспечить и малые размеры пикселей, и низкое энергопотребление, и высокие скорости смены формируемых в СЖК изображений – вплоть до нескольких тысяч кадров в секунду. Была также решена технологическая задача создания электрооптической СЖК-ячейки с толщиной СЖК всего около 1 мкм, обеспечивающей ахроматизм ячейки в видимом диапазоне длин волн.

В микродисплеях FLCoS, впервые разработанных компанией Displaytech (США), используются СЖК-материалы с бистабильной модуляционной характеристикой. Поэтому формировать серую шкалу (полутона) и цвета приходится с помощью дополнительной модуляции электронных сигналов, тем самым разменивая высокую частоту оптического переключения (несколько килогерц) на соответствующее число градаций цвета в битах. В результате, хотя частота смены изображений и не превышает 240–360 Гц, метод последовательного во времени ввода цветов (FSC-метод) с помощью трех RGB-светодиодов может успешно использоваться.

В Кембриджском университете (Великобритания) разрабатывается FLCoS-микродисплей, в котором используется СЖК-материал с непрерывной шкалой серого, реализуемой без дополнительной электронной модуляции сигнала [17]. Этот материал, изготовленный в ФИАНе (Россия), позволяет формировать цветные изображения, в том числе по FSC-методу, с частотой кадров вплоть до 4 кГц (рис. 5).

В обоих типах микродисплеев во избежание «заполяризованности» (необратимой поляризации) СЖК в схемах управления учтена необходимость соблюдения нулевого баланса по току.

Компаниями Korin и Micron Technologies производятся несколько вариантов микродисплеев FLCoS формата VGA, WVGA, SVGA и XGA с диагональю рабочей площадки от 0.4 до 0.5 дюйма [15]. Они потребляют менее 100 мВт мощности и формируют изображения со световым потоком до 100 люменов. Компанией Forthdd (теперь она входит в Korin) разработаны микродисплеи еще большего формата [12]: WXGA (1280 × 768 пикселей, шаг 13.62 мкм), SXGA (1280 × 1024 пикселей, шаг 13.62 мкм) и QXGA (2048 × 1536 пикселей, шаг 8.2 мкм). Все они могут работать при температурах от –10 до +65 °С (температура хранения от –40 до +80 °С) и использоваться как ПМС для амплитудно-фазовой модуляции монохроматического света. Кроме того, скоростные (до 4.5 кГц) бистабильные ПМС QXGA-3DM применялись как бинарные (0 или  $\pi$ ) фазовые модуляторы когерентного света, обеспечивая в первом порядке дифракции эффективность 10% на длине волны 544 нм [16].

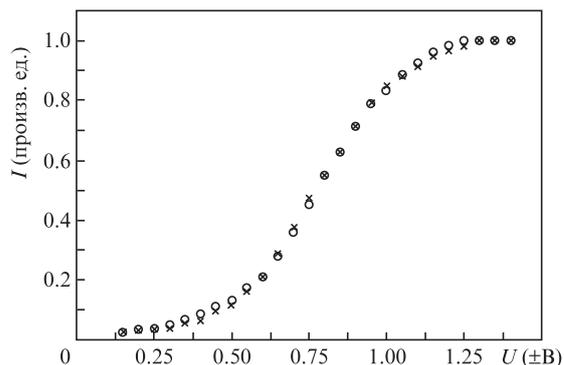
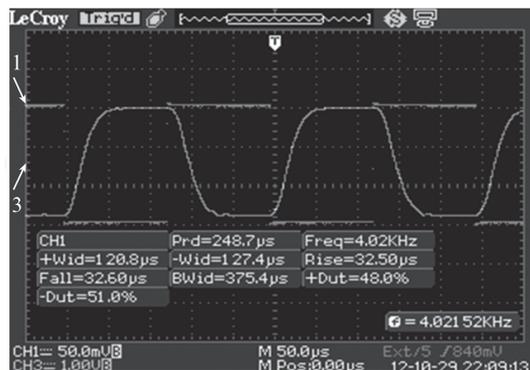


Рис. 5. Оциллограмма оптического отклика (а) и модуляционная характеристика (б) электрооптической ячейки толщиной 1.7 мкм с СЖК состава HF-32С на частоте 4 кГц при уменьшении (о) и увеличении (х) амплитуды управляющего напряжения. Стрелкой 3 указан нулевой уровень биполярных импульсов напряжения, стрелкой 1 – нулевой уровень оптического отклика.

### 2.4. DMD-микродисплей [5, 18–21]

DMD-микродисплей, изготавливаемые по так называемой технологии DLP (Digital Light Processing), разработанной в Texas Instruments, относятся к числу наиболее быстрых и ярких. Формирующий изображение экран здесь представляет собой матрицу электрически управляемых микрозеркал, размещаемую на кремниевой подложке, в которой, как и в LCoS, формируется управляющая электроника (рис. 6).

Принцип формирования изображения в DLP-приборах не электрооптический, а электромеханический. При подаче электрического сигнала на электроды микрозеркальной ячейки тонкое и легкое зеркальце с размерами  $\sim 10 \times 10$  мкм, закрепленное на шарнире, примерно за

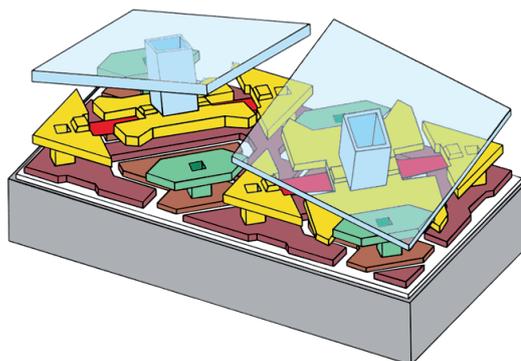


Рис. 6. Структура двух дисплейных ячеек DMD-микродисплея ([http://www.3dnews.ru/\\_imgdata/img/2010/10/22/600716/mems-dmd-3.gif](http://www.3dnews.ru/_imgdata/img/2010/10/22/600716/mems-dmd-3.gif))

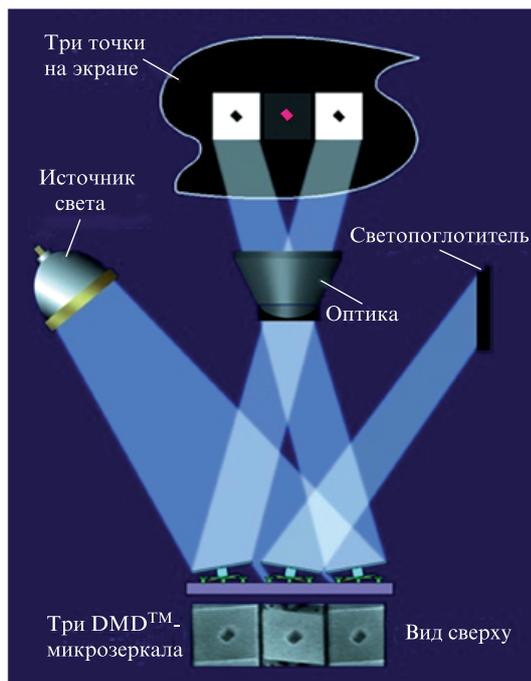


Рис.7. Схема получения изображения от трех микрозеркал [19].

10 мкс отклоняется электростатической силой на определенный угол (например,  $20^\circ$ ) в ту или иную сторону относительно шарнира (среднее положение зеркальце занимает только в нерабочем состоянии). Зазор между микрозеркалами составляет всего около 1 мкм. Отраженный от них световой пучок попадает или не попадает в выходное окошко (рис.7), отчего оптический контраст достигает  $10000:1$ . Не попавший в окошко свет поглощается в материале, обеспечивающем также надежный отвод тепла и минимальное отражение света, что требуется при высокой считывающей световой мощности, возможной благодаря микрозеркалам.

Серая шкала (и цвета) в изображениях организуются за счет повторения отклонений зеркальца с разной частотой. Поскольку скорость оптического переключения, задаваемая временем его отклонения, достаточно высока, цветное изображение создают по FSC-методу, используя источник белого света и вращающийся диск с цветными светофильтрами на пути светового потока к DMD-матрице (рис.8) или три поочередно включаемых RGB-светодиода (они могут тоже располагаться на диске). Можно

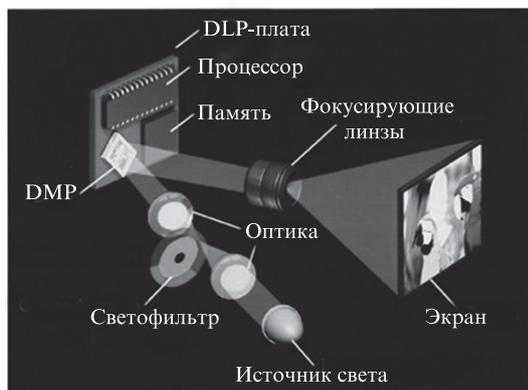


Рис.8. Схема отображения данных в одноматричном DLP-проекторе [19].

также использовать три DMD-матрицы в трех оптических каналах считывания и совмещение трех монохромных изображений. Оптическая схема такого трехматричного (трехчипового) DLP-проектора еще более громоздка, но он способен работать с большей скоростью, большим числом градаций (цветов) и с большей световой мощностью, а потому может применяться для проецирования изображений на большой экран (в том числе на киноэкран) и для других целей.

В настоящее время многие электронные компании используют технологию DLP для производства видеопроекторов самого широкого назначения: миниатюрных нашлемных и безэкранных дисплеев, ПМС, смартфонов, пикопроекторов, аудиторных и кинотеатральных видеопроекторов [20]. Формат проекторов изменяется от VGA ( $640 \times 480$ ) до HDTV ( $1920 \times 1080$ ) и WQXGA ( $2560 \times 1600$ ), а светосила – от 20–50 до 4000 лм.

Texas Instruments продолжает производить и совершенствовать ключевой элемент этих приборов – матрицу DMD [21]. Одна из последних разработок матрицы, чип DLP4500, имеет разрешение  $1280 \times 768$  пикселей, шаг 7.6 мкм, частоту смены кадров 120 Гц для 8-битовых данных и 4225 Гц для бинарных; матрица адресуется со скоростью 4.4 Гб/с и потребляет мощность 407 мВт. Новейший чип DLP4710 имеет разрешение  $1920 \times 1080$  пикселей (HDTV), шаг 5.4 мкм и размер по диагонали около 12 мм, а микрозеркала отклоняются на  $\pm 17^\circ$ . В систему дисплея, кроме этого чипа, входят контроллер DLPC3439 и драйверы DLPA3000/DLPA3005 PMIC/LED. Чип DLP3310, управляемый контроллером DLPC3437, – самый маленький микрозеркальный дисплей с 1080 строками, его размер по диагонали составляет всего 0.3 дюйма. Параметры последних разработок DMD-матриц говорят о том, что в DLP-приборах удалось преодолеть проблему уменьшения размера пикселя (в течение многих лет шаг матрицы составлял 17 мкм). Соответственно возросла скорость отклонения микрозеркал и частота смены кадров: для бинарных изображений она уже приближается к 8 кГц.

### 3. Сравнение микродисплеев

Сравнение удобно провести с помощью табл.1, в которой качественно, с помощью плюсов, – чем их больше, тем лучше (по аналогии с [4]), представлены характеристики рассмотренных выше микродисплеев.

Основные свойства и достоинства/недостатки приведенных в таблице микродисплеев достаточно ясны. Формат HD достигнут и превышен практически во всех типах микродисплеев. Наибольшим быстродействием обладают приборы на основе структуры FLCoS (GS) и матрицы DMD. Они же являются наиболее яркими, особенно DMD, к тому же для амплитудной модуляции излучения в матрице DMD не важна поляризация входного светового пучка. Амплитудная модуляция с наибольшим оптическим контрастом реализуется в DMD, но требует достаточно сложных электронных и оптических ухищрений.

Чисто фазовая модуляция света, очень востребованная в голографических применениях, наиболее просто осуществляется в приборах на основе НЖК (при использовании электрооптического эффекта управляемого двулучепреломления), однако они являются достаточно медленными (обычное быстродействие – 60 Гц). Микродисплеи на основе структуры LCoS имеют широкий диапазон режимов работы НЖК и могут пространственно мо-

Табл. 1. Сравнительные характеристики микродисплеев.

Характеристика	Тип микродисплея					
	AMLCD (CF)	LCoS (CF)	LCoS (FSC)	FLCoS (BR)	FLCoS (GS*)	DMD (FSC)
Скорость оптического переключения	+	+	++	++	+++	+++
Яркость	++	++	+++	+++	+++	++++
Поляризованный свет	+	+	+	+	+	+++
Тип модуляции	A, Ф	A, Ф	A, Ф	A, A-Ф	A, A-Ф	A, Ф
Сложность электроники	+++	+++	+++	++	++	+
Сложность оптики	++++	+++	++++	++	+++	+
Формат (разрешение)	HD	HD	HD	HD	SVGA	HD
Режим управления	A	A, D	A, D	D	A, D	D
Требования по температуре	++	++	++	+	+	++++
Срок службы	++++	++++	++++	++++	++++	+++
Зрелость технологии	+++	+++	++	+++	++	+++

Примечание. CF – микродисплей с цветными фильтрами; FSC – без цветных фильтров (с последовательной во времени сменой цветов); BR – с СЖК, обладающим бинарным оптическим откликом; GS\* – предполагаемые характеристики микродисплея, который разрабатывается с использованием СЖК, обладающего непрерывной серой шкалой; HD – формат высокой четкости; A и Ф – амплитудный и фазовый типы модуляции соответственно; A и D – аналоговый и цифровой режимы управления соответственно.

дулировать свет в интервале длин волн от УФ до дальнего ИК, действуя как активный динамический оптический элемент. Инновации в конструкции LCoS и в оптической схеме считывания позволили сократить потребление энергии, сделать микродисплеи портативными, более комфортными для просмотра и более удобными для использования. Этим же принципам удовлетворяют микродисплеи со структурой FLCoS, показавшие способность работать без цветных фильтров и с на порядок большей скоростью, но не позволяющие пока (хотя предпосылки имеются) осуществлять чисто фазовую модуляцию светового потока.

По большинству характеристик лучшие позиции имеет технология DLP (DMD), но она же самая сложная и потому дорогостоящая: DMD матрица размещается на дорогом керамическом корпусе, тогда как структуре LCoS требуется всего два слоя дешевой печатной платы [8]; в DMD содержится громадное количество движущихся элементов, требующих сложной настройки; число контактов и шин почти втрое больше, чем в LCoS; имеет место оптическое тестирование элементов, более сложное, чем электрическое; оптика считывания изображений более сложная и громоздкая. Кроме того, не известно, до конца ли решена старая проблема залипания микрзеркал, характерная для деталей малых размеров (размеры пикселя уже близки к достигнутым в LCoS). Практика скоро покажет, насколько большая стоимость прибора соответствует заявляемым высоким параметрам и надежности.

#### 4. Применения микродисплеев

Микродисплеи, действующие как динамические пространственные модуляторы света с малым шагом пикселей и режимом фазовой модуляции света, наиболее подходят для цифровой голографии и создания голографических дисплеев [3].

ПМС со структурой LCoS действует как матрица электрически управляемых замедлителей световой волны. Возможны как вертикальная, так и планарная ориентации ЖК в слое, но при этом главная оптическая ось ЖК должна располагаться вдоль направления поляризации света. Известны, например, такие применения фазовой модуляции в цифровой голографии, как голографиче-

ский сенсор для определения распределения фазы объекта в ПЗС-детекторе и голографическая литография для обработки 3D форм на фоторезисте.

В голографических применениях использовались и фазовая, и амплитудная моды LCoS [3, 22]. В исследованиях, проводимых в Варшавском технологическом университете для пространственного разделения фурье-голограмм и уменьшения артефактов нулевого порядка, был применен один ПМС Holoeye Pluto. Для формирования волнового фронта комплексной величины использовались несколько SLM.

В компании See Real Technologies (Германия) для демонстрации полноцветного голографического дисплея с диагональю 100 мм использовались амплитудный вариант LCoS и несколько ПМС (или пространственные комбинации пикселей на одном ПМС), а также пропускающий НЖК ПМС, который комбинировал два столбца матрицы, чтобы создать полную комплексную функцию в единственном модуляторе.

В [23] было показано, что характеристики современных средств пространственной модуляции лазерного излучения допускают реализацию инвариантных фильтров с минимизацией корреляционной энергии в схемах когерентных корреляторов изображений в виде синтезированных дифракционных элементов двух типов – голографического фильтра, синтезируемого как голограмма Фурье, и проекционного элемента, получаемого проецированием значений корреляционной функции на комплексную модуляционную характеристику. Для реализации корреляционной функции с оптимизацией корреляционных характеристик в схеме коррелятора ван-дер-Люгта в виде синтезированных голографических фильтров могут быть использованы ПМС с ограниченным динамическим диапазоном представления пропускания, т. к. снижение числа уровней модуляции с 256 до 64 не приводит к заметным изменениям результатов распознавания. Для представления уровней пропускания голографического фильтра можно использовать бинарный растр, при этом передаваемых уровней должно быть не менее 16. Реализация фильтра проекционного типа требует его адаптации к характеристикам используемого ПМС. Учет фазового набега ПМС при синтезе фильтра влечет за собой усиление дискриминационных характеристик фильтра. Продемон-

стрированы возможности применения разрабатываемых методов для распознавания различных изображений, полученных при аэросъемке.

Микродисплеи типа LCoS, модулирующие с высоким оптическим качеством фазу света в пределах до  $2\pi$ , давно используются в адаптивной оптике для коррекции волновых фронтов, в том числе для компенсации атмосферных турбулентностей [22, 24, 25]. Несмотря на невысокое быстродействие структур LCoS с НЖК, они успешно использовались и в качестве селективного переключателя длин волн [26]. Например, недавно реализован многофункциональный переключатель  $1 \times 9$  с вносимыми потерями 7.6 дБ и перекрестными помехами 19.4 дБ (в наихудшем случае) для пространственного разнесения каналов. Оказалось, что эти устройства обеспечивают лучший контроль оптических фронтов и большую гибкость, чем быстродействующие микроэлектромеханические устройства.

В настоящее время доминируют цифровые побитовые системы хранения информации, и, в отличие от ситуации 1970-х годов, запись с помощью ПМС больших массивов информации в виде голограмм не требуется. Однако развитие технологий защитных голограмм, голографических и дифракционных оптических элементов и фильтров, а также оптико-голографических методов обработки информации снова сделало использование ПМС весьма востребованным. Наиболее предпочтительными для целей записи голограмм являются жидкокристаллические фазовые ПМС как с пропусканием, так и с отражением света (LCoS и FLCoS) компаний Holoeye и Meadowlark Optics.

В связи с развитием трехмерных технологий, в том числе цифровой голографии, и совершенствованием микродисплеев наибольший интерес в последние годы вызывает перспектива их применения не столько для формирования блоков данных, сколько в качестве формирователей цифровых голограмм, т.е. для реализации действующих в реальном времени голографических и к тому же интерактивных дисплеев [27]. Оценим возможности достижения этой цели, учитывая, что потребуются преодолеть три основных ограничения, присущих таким дисплеям: на скорость передачи данных, на формирование голограммы и на проецирование голографического изображения. Рассмотрим ниже эти три ключевых элемента.

Проецирование голографических 3D изображений большого размера с широким углом обзора, видеоскоростью, а также с полным набором цветов требует огромного количества данных. Действительно, для голографического дисплея с размерами хотя бы  $100 \times 100$  мм и дифракционным углом  $15^\circ \times 15^\circ$  потребуется шаг пикселя  $1.18 \times 1.18$  мкм, чтобы на длине волны красного света (633 нм) обеспечить полный параллакс (согласно уравнениям оптики для расчета дифракции [25]), а это составляет около  $92 \times 92 K = 8.5 \times 10^9$  пикселей. Для длин волн зеленого (532 нм) и синего (450 нм) света необходимое количество пикселей составляет  $10^{10}$  и  $1.4 \times 10^{10}$  соответственно. Чтобы получить скорость передачи насыщенных цветов (объединенных RGB-каналов) хотя бы 30 кадр./с, производительность нужно увеличить до  $3.6 \times 10^{11}$  пикселей/с [27]. Понятно, что если размер голограммы, угол обзора и частота кадров увеличатся, то скорость передачи данных существенно превысит  $3 \times 10^{11}$  пикселей/с. Но пусть хотя бы это значение производительности будет целью, которую мы предполагаем достичь.

Как показано выше, возможности существующих ПМС пока не позволяют достичь такой скорости. LCOS на основе НЖК с форматом изображения HD могут обеспечить скорость всего около  $10^8$  пикселей/с [8]; LCOS с бинарным СЖК (FLCOS) [16] и DMD [21] способны поддерживать модуляцию на уровне более 20 кГц при разрешении выше стандарта HD, т.е. обеспечить скорость уже более  $3.5 \times 10^{10}$  пикселей/с. Именно эти два прибора имеют самую большую производительность из всех ПМС, доступных сегодня, хотя, как бинарные устройства, при адресации оба они страдают от сопряженных изображений [27]. Возможно, использование СЖК с серой шкалой в FLCOS поднимет скорость формирования массива пикселей до  $10^{12}$  пикселей/с, но проблема их электрического управления остается пока нерешенной.

Следует отметить, что различные методы, применяемые для вычисления голограмм (методы точек, многоугольников, изображений), даже при широком использовании быстрого преобразования Фурье и параллельных вычислений на нескольких графических процессорах высокого класса пока не обеспечивают возможность работы в реальном времени, т.к. отстают от объявленной производительности в  $3 \times 10^{11}$  пикселей/с на три порядка [27]. Кроме того, помимо отсутствия достаточного количества поставляемых в единицу времени данных, еще предстоит найти подход к тому, как равномерно и плавно распределить информацию от каждого ПМС в пространстве и доставить ее по назначению.

Что касается скорости передачи данных, то она должна составлять 360 Гбит/с, или 45 Гбайт/с [27]. Хотя удовлетворяющая этому условию технология имеется [28], многие из разработок все еще находятся на ранней стадии. Кроме того, должны быть разработаны стандарты передачи данных для ПМС. Последний высокоскоростной стандарт (PCI-E 3.0, 16x) может поддерживать скорость до 15.75 Гбайт/с, тогда как скорость следующего поколения стандартов (4.0, 16x, будет выпущено в 2017 г.) предположительно составит 31.51 Гбайт/с, что близко к целевому значению. Однако если использовать ПМС с серой шкалой, большего размера и с более широким углом, то необходимая скорость передачи данных будет на порядок выше, и есть надежда достичь ее в ближайшем будущем с помощью FLCoS и СЖК с серой шкалой.

Таким образом, ввод данных с использованием одного канала вряд ли будет реализован в ближайшее время, и тогда в качестве альтернативного решения следует рассматривать возможность использования нескольких каналов, каждый из которых содержит свой собственный микродисплей, вычисляет и передает информационные данные.

Уже существуют несколько прототипов голографических систем высокоинформативного отображения (табл.2). Количество поставляемой ПМС оптической информации дается в таблице в терминах пиксель/с с учетом качества изображения (бит/пиксель).

Система «только горизонтального параллакса» (НРО) из Токийского университета Систем сельского хозяйства и Технологий (ТУАТ, Япония), работающая с производительностью  $10^{10}$  пикселей/с ( $13333$  Гц  $\times$   $1024 \times 768$ ), является одной из первых систем, в которых успешно использовался высокоскоростной DMD [29]. В Национальном институте информационных и коммуникационных технологий (НИКТ, Япония) создана панельная система с тремя ПМС типа LCOS с форматом панелей  $8K \times 4K$ , ра-

Табл.2. Сравнение прототипов голографических дисплеев [27].

Система	Год создания	Публикация	Количество вводимой информации ( $10^9$ пикселей/с)	Число ПМС	Количество информации на один ПМС ( $10^9$ пикселей/с)
TUAT	2009	[29]	10	1	10
NICT	2013	[30]	6	3	2
ASTAR	2013	[31]	23.8	24	около 1
MIT	2014	[32]	4	40	0.1

ботающая с частотой 60 Гц [30]. Система Агентства по науке, технологии и исследованиям (ASTAR, Сингапур) состоит из 24-х DMD-матриц (панелей), каждая из которых работает с частотой 720 Гц и имеет разрешение  $1280 \times 1080$  [31]. Производительность системы  $2.38 \times 10^{10}$  пикселей/с до сих пор является верхним пределом для голографической системы отображения.

Отдельно нужно сказать о голографической системе Массачусетского технологического института (MIT, США), в которой уже давно используется акустооптический модулятор (АОМ) с производительностью не более  $10^8$  пикселей/с. Однако последние результаты показывают [32], что пропускная способность прототипа достигает  $4 \times 10^9$  пикселей/с при использовании 40 каналов АОМа. Объявлено также о начале разработки системы из 1250 каналов, которая сможет обеспечить производительность  $1.25 \times 10^{11}$  пикселей/с. Тем не менее надо учитывать, что увеличение числа используемых ПМС – информационных панелей многопанельной системы – ведет не только к росту количества вводимой информации, но и к усложнению системы, т.к. делает необходимым физическое совмещение десятков и более ПМС и выдвигает высокие требования к системам распределения, таким как сканеры.

На рис.9 приведены примеры распределения информации в многопанельной системе голографического дис-

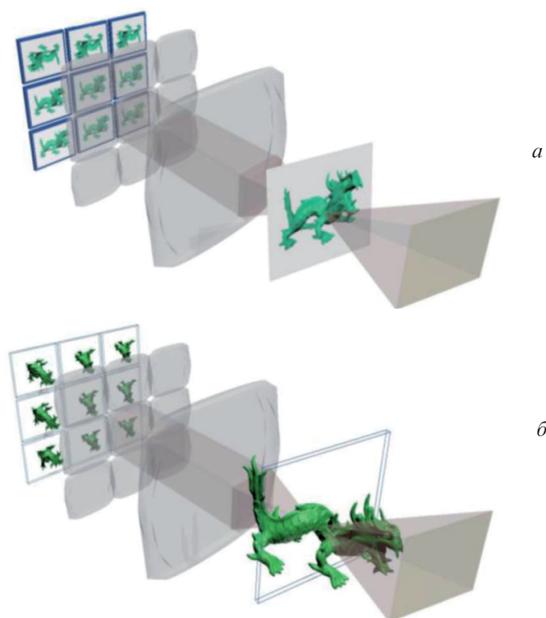


Рис.9. Примеры распределения информации в многопанельной системе [27]: схема обычного интегрального формирования изображений с панельными источниками 2D изображения (а) и схема обычной интегральной голографии с заменой источников 2D изображения голограммами (б).

плея [27]. В обычной интегральной схеме формирования изображений (СИ) для угловой фрагментации каждое 2D изображение проецируется под определенным углом обзора через соответствующую четырехфокусную изображающую систему (рис.9,а). В случае обычной интегральной голографии (СН) традиционные источники 2D изображения заменяются голограммами, которые записывают информацию о волновом фронте восстанавливаемых 3D изображений (рис.9,б).

## 5. Заключение

Рассмотрены характеристики различных микродисплеев, проведено их сравнение и определены возможности их использования в качестве пространственных модуляторов света. ПМС на основе НЖК являются наилучшими для чисто фазовой модуляции излучения. ПМС на основе матрицы микрозеркал и структуры FLCOS обладают максимальной пропускной способностью.

Чтобы демонстрировать голографические 3D изображения в режиме реального времени, необходимо формировать изображения с помощью ПМС с очень высокой скоростью (не менее  $10^{11}$  пикселей/с). В настоящее время это невыполнимо ни для одного микродисплея. В связи с этим актуальны следующие три подхода [27]:

- 1) продолжение разработки микродисплеев и ПМС, производительность которых превышает достигнутую в настоящее время в 10 раз и более;
- 2) создание многопанельных устройств формирования изображений на базе существующих микродисплеев и разработка метода распределения информации от каждого микродисплея с целью сбора всей информации на одной панели, т.е. в одной изображающей системе;
- 3) допущение снижения производительности и, как следствие, некоторого ухудшения визуального эффекта, такого как снижение разрешения изображения, использование одной оси параллакса и т.п.

Второй подход может быть реализован раньше, чем первый, например при объединении более 10 высокоскоростных (свыше 10 кГц) матриц DMD HD-формата и эффективном распределении информации. С другой стороны, третий подход не конфликтует с первым и вторым, так что он также имеет право на существование. Например, не имеющий вертикального параллакса голографический НРО-дисплей с размерами  $100 \times 100$  мм, дифракционным углом  $15^\circ$ , частотой обновления 30 Гц и с полным цветовым набором теоретически может быть реализован с помощью одной современной высокоскоростной DMD-матрицы HD-формата. Можно также ограничить формат матрицы, но использовать систему из нескольких панелей.

С точки зрения эффективного использования информации целесообразно, когда это возможно, направлять ее

только в глаза наблюдателя, а не во все окружающее пространство сразу. При этом для реализации интерактивных голографических дисплеев, оперирующих в реальном времени, наשלемный голографический проекционный дисплей может быть интегрирован с дополненной (AR) или смешанной (MR) реальностями. В этом случае ПМС, вычисление голограммы и передача данных способны удовлетворить требованиям 3D просмотра с использованием существующей технологии. Проблемы таких голографических наשלемных дисплеев аналогичны проблемам существующих стереоскопических наשלемных дисплеев: увеличение поля зрения, отслеживание положения пользователя, изготовление более компактной и легкой системы [27].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI61615X0060.

- Евтихий Н.Н., Евтихьева О.А., Компанец И.Н., Краснов А.Е., Кульчин Ю.Н., Одинокоев С.Б., Ринквичус Б.С. *Информационная оптика (учебное пособие для вузов)* (М.: МЭИ, 2000).
- Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфёнов А.В. *Пространственные модуляторы света* (М.: Радио и связь, 1985).
- Bleha W.P., Lei L.-J.A. *Proc. SPIE*, **8736**, 0A-1 (2013).
- Underwood I. *Proc. Electron. Information Display* (London, 2000, p. 6).
- Технология DLP. <http://www.ixbt.com/digimage/dlp.html>.
- <http://holoeeye.com/spatial-light-modulators/>.
- [http://www.meadowlark.com/spatial\\_light\\_modulators.php](http://www.meadowlark.com/spatial_light_modulators.php).
- Gutttag K. [http://www.syndiant.com/tech\\_advantages.html](http://www.syndiant.com/tech_advantages.html).
- Sugawara M. et al. *SMPTE Mot. Imag. J.*, **122**, 29 (2013).
- <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/L/4178/4015/index.html#>.
- [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/x10468\\_series\\_etc\\_kacc1172e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/x10468_series_etc_kacc1172e.pdf).
- <http://www.forthdd.com/technology/flcos/>.
- Spencer B.F. <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4013117/FLCOS-hi-res-microdisplays-faster-than-LCD-for-video-and-holographic-memory-applications>.
- Darmon D., McNeil J.R., Handschy M.A. *SID-2008 Techn. Digest*, **39**, 1070 (2008).
- Андреев А.Л., Компанец И.Н. *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, **15**, 28 (2015).
- <http://www.forthdd.com/technology/phase-modulation/>; <http://www.forthdd.com/wp-content/uploads/2016/04/ForthDD-Binary-Phase-Mode-Webtutorial.pdf>.
- Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Zalyapin N.V. *J. Soc. Inform. Display*, **22**, 115 (2014).
- <http://www.ti.com/lscds/ti/analog/dlp/how-dlp-works.page>.
- <http://www.ixbt.com/digimage/dlp.html>.
- <http://www.kns.ru/dlp-proeكتورi/catalog.html>.
- <http://www.ti.com/lscds/ti/dlp/advanced-light-control/pattern-rate-less-8khz-nirscan.page>.
- Zhang Z., You Z., Chu D. *Light: Scie. Applicat.*, **3**, e213 (2014).
- Шаульский Д.В. *Канд. дис.* (М., МИФИ, 2016).
- Mu Q., Cao Z., Hu L., Li D., Xuan L. *Opt Express*, **14**, 8013 (2006).
- Cao Z., Mu Q., Hu L., Li D., Peng Z., et al. *Opt. Express*, **17**, 2530 (2009).
- Robertson B., Yang H.N., Redmond M.M., Collings N., Moore J.R., et al. *J. Lightwave Technol.*, **32**, 402 (2014).
- Chen J.-S., Chu D. *Appl. Opt.*, **55**, 127 (2016).
- Hecht E. *Optics, Addison-Wesley (Boston)*, **10**, 443 (2001).
- Takaki Y., Okada N. *Appl. Opt.*, **48**, 3255 (2009).
- Matsumoto Y., Takaki Y. *Opt. Lett.*, **39**, 3433 (2014).
- Lum Z.M.A., Liang X., Pan Y., Zheng R., Xu X. *Opt. Eng.*, **52**, 015802 (2013).
- Smalley D.E., Smithwick Q.Y., Bove V.M., Barabas Jr.J., Jolly S. *Nature*, **498**, 313 (2013).