

Светлана Сысоева | Dr.Gold@sysoeva.com

Применение светоизлучающих и лазерных диодов в мобильных проекторах и сканерах.

Новый этап эволюции

В статье представлена информация о технологических новинках в освещении для применений в пикопроекторах, HUD (Head-up Displays), лазерных шоу и ТВ, 3D TOF-камерах и др. Полупроводниковые диоды как источники освещения дают массу преимуществ, которые наиболее ярко проявляются с внедрением лазерной технологии освещения. Светодиодные проекторы на данный момент обеспечивают более высокие потребительские характеристики — в первую очередь, в плане яркости, эффективности, достаточного времени непрерывной работы и, что немаловажно, с точки зрения безопасности. По мере того как развиваются технологии лазерного проецирования, они обещают превзойти своих светодиодных конкурентов по всем параметрам — мощности, яркости, разрешению/четкости, компактности, цене — и обеспечить экспансию применений лазеров, не ограниченную пределами данного сегмента.

Введение

Перспективы современного проецирования и сканирования связываются с технологиями полупроводникового освещения, которые делают возможным создание высокоразрешающих, компактных энергоэффективных и недорогих инновационных решений [1–4].

Использование полупроводниковых источников освещения для технологий проецирования дает следующие преимущества:

- высокие качество и характеристики изображения — живые цвета, яркость, контрастность, четкость;
- электрооптическая эффективность (Wall Plug Efficiency, WPE) и эффективность свечения (luminous efficiency или efficacy);
- малое потребление мощности;
- достаточное время непрерывной работы без подзарядки;
- компактный размер;
- более низкая цена при массовых объемах производства.

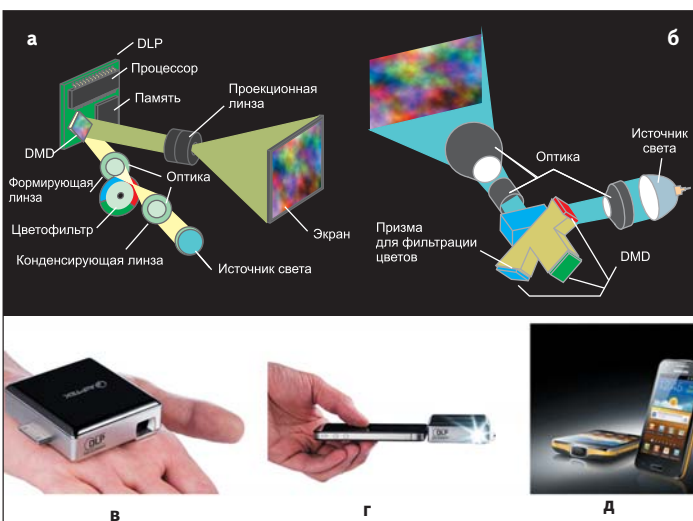
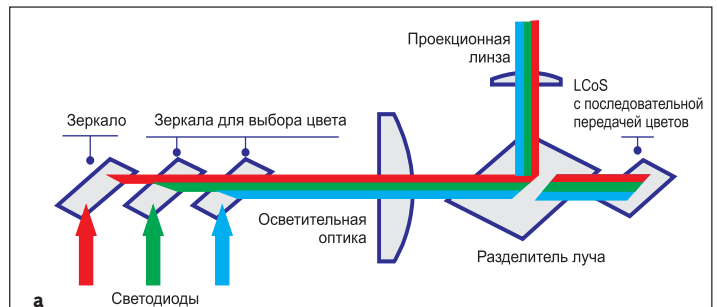
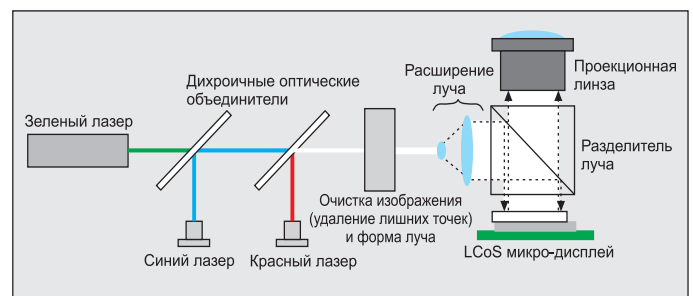


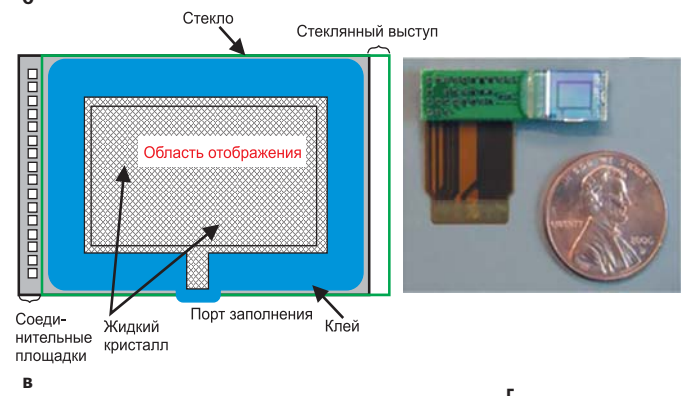
Рис. 1. Проекционные системы DLP Texas Instruments: а) однокристалльная DMD-система с цветовым RGB-фильтром; б) трехкристалльная система TI с тремя DMD-массивами и призмой для фильтрации цветов; в, г) применение технологии DLP в проекторах Aiptek i50D; д) применение технологии DLP в телефоне Samsung Galaxy Beam со встроенным пикопроектором



а



б



в

г

Рис. 2. Технология LCoS: а) типичная оптическая система; б) типичная оптическая система от Syndiant с применением лазеров; в) схема; г) внешний вид микродисплея Syndiant

В настоящее время весь набор преимуществ в полной мере используется в модулях проекторов, ключевыми рыночными сегментами которых являются пикопроекторы и проекционные блоки HUD.

В сегменте пикопроекторов наиболее распространены технологии на основе светодиодов (LED), массивов микрозеркал (Digital Light Processing, DLP) и жидких кристаллов на кремнии (Liquid Crystal on Silicon, LCoS) (рис. 1, 2). В сегменте HUD наибольшее развитие получила технология зеркального проецирования, которая использует как источники освещения светодиоды и/или дисплеи (рис. 3) [2]. Стремительно развивается лазерная сканирующая технология, и новые разработки уже обеспечивают конкурентоспособный набор преимуществ в плане достижения лучшего соотношения характеристик проекторов, качества изображения, размеров и цены (рис. 4) [1, 2]. Лазерные блоки обладают дополнительным преимуществом работы без ручной фокусировки.

Этим летом коммерциализирован первый лазерный проекционный блок HUD — в навигационной системе Cyber Navi Pioneer с дополненной реальностью (рис. 4). Лазерные проекторы уже давно представлены в нише мобильных устройств, пользователям которых доступно теперь следующее поколение технологий, которое в состоянии обеспечить весь набор преимуществ, включая высокую яркость спроецированного изображения и достаточную по времени непрерывную работу без подзарядки по цене, приемлемой для массовых рынков. Распространение лазерной технологии в сегменте мобильных пикопроекторов ожидается уже в 2013 г.

Это также стимулирует расширение сферы применений лазерной сканирующей технологии — для лазерных проекторов и сканеров, 3D TOF-камер, сканеров штрих-кодов и других применений в различных рыночных сегментах, в том числе и промышленных, high-end, медицинских, например в лазерных сканирующих микроскопах.

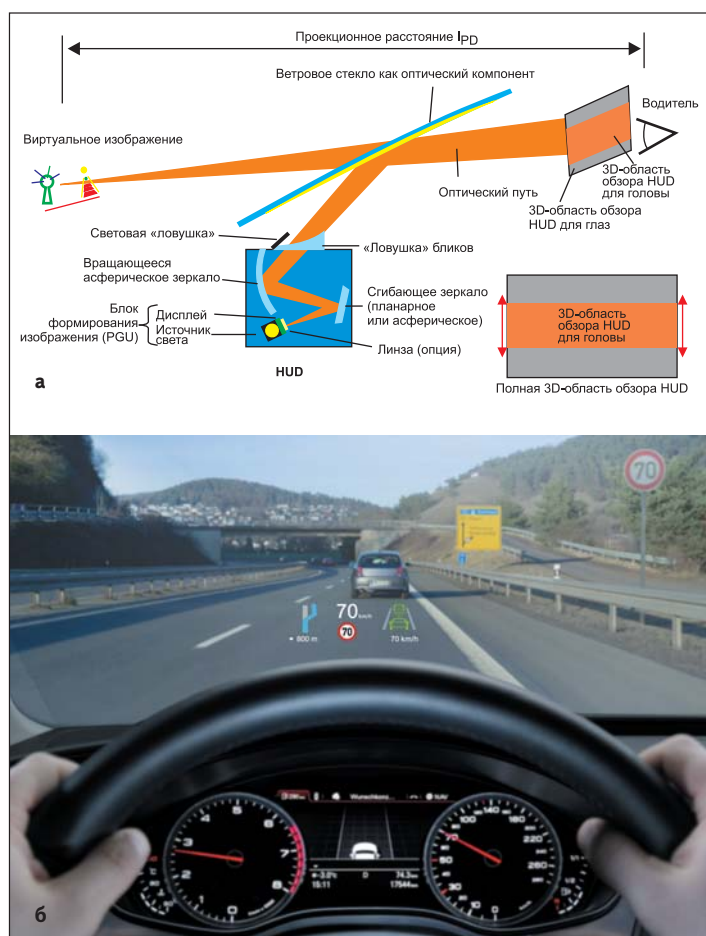


Рис. 3. Иллюстрация принципа работы HUD второго поколения от Continental: а) оптическая система; б) серийно выпускаемые HUD для автомобилей Audi А6 и А7, дающие высокое качество изображения и легкость восприятия

Новый виток эволюции технологий инициирован коммерциализацией непосредственно излучающих зеленый свет лазеров (Direct Green Lasers, DGL) — ключевых осветительных компонентов для лазерного МЭМС-сканирования. Красные и синие лазеры, непосредственно излучающие свет соответствующей длины, уже были коммерчески доступны достаточно длительное время. Для формирования полного RGB-набора первичных цветов лазерных источников не доставало только лазерных компонентов зеленого цвета. Вместо них широко использовались синтетические методы удвоения частоты источников излучения, близкого к инфракрасному (в так называемых синтетических зеленых лазерах — Synthetic Green Lasers, SGL). Эти методы не обеспечивали достаточной яркости лазерных проекторов помимо того, что делали получение зеленого света сложным, громоздким, недостаточно эффективным и сравнительно дорогим и затормаживали движение лазерной сканирующей технологии на массовые рынки.

Недавние достижения в разработках галлий-нитридных лазерных диодов позволили повысить характеристики DGL-диодов до уровня, достаточного для их практического использования при существующей конкуренции с СИД, причем за приемлемую цену. Последние разработки демонстрируют оптический выход мощностью около 100 мВт на длине волны порядка 530 нм. И уже известно о достижении оптической мощности выхода свыше 1 Вт на длине волны порядка 525 нм. Эффективность WPE первых DGL превышает 8%, а качество изображения, достижимое с DGL, и теоретически, и практически уже более высокое, чем это было возможно с применением SGL. Все это достигнуто благодаря совершенствованию технологии производства непосредственно излучающих зеленых лазеров, что стало толчком для последовавшего прорыва в лазерной сканирующей технологии, получившей импульс к своему дальнейшему развитию и широкому распространению.

Данная статья сфокусирована на решениях, ознаменовавших новый этап в дальнейшей эволюции технологий сканирования и проецирования. Значимую долю среди них составляют успешные разработки новых зеленых осветительных компонентов с более высокими характеристиками, инициировавшие волну других разработок технологий лазерного сканирования и проецирования, а также ответный всплеск со стороны конкурирующих технологий.

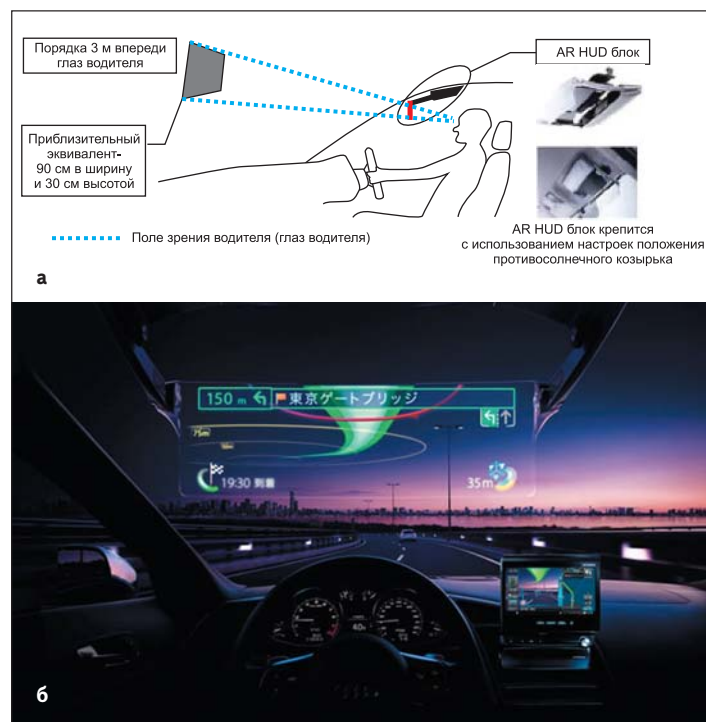


Рис. 4. Pioneer Cyber Navi — навигационная система, имеющая первый в мире блок AR-HUD (HUD-дисплей с дополненной реальностью) и первый в мире HUD, основанный на лазерах: а) принцип работы AR-HUD; б) работа навигационной системы Cyber Navi

Миграция технологий проекторов к полупроводниковому освещению

Возможность просмотра в большом или даже 3D-формате контента, который можно извлечь из устройства малых размеров, привлекает мобильных пользователей, для которых существует потребность обмениваться информацией в целях бизнеса, учебы или развлечений. Аналитики оценивают, что рынок карманных и встроенных мобильных проекторов имеет довольно яркие перспективы [1]. Как аксессуары, проекторы давно уже сопровождают ноутбуки и смартфоны. В последние годы наметилась тенденция непосредственного встраивания их в виде модулей в цифровые камеры и смартфоны.

И лазерные диоды, и светодиоды (LED) имеют перспективы использования в малых проекционных блоках как источники света для проецирования дисплейного контента на подходящую или даже не очень подходящую поверхность. Потребитель оценивает проекторы по качеству изображения, характеристикам, удобству использования, которые в состоянии обеспечить обе технологии.

В основе работы всех проекторов лежат схожие принципы. Проекционное изображение формируется при помощи первичного набора базовых цветов (RGB) от источника света.

Некоторые проекторы используют перед световым источником цветное колесо, служащее фильтром для производства RGB-лучей, которые затем перенаправляются посредством одного микродисплея на экран для создания одного RGB-изображения (рис. 1а). Другие версии проекторов используют освещение каждого первичного цвета для индивидуальных микродисплеев, перенаправляющих монохроматические изображения для их смешивания на проекционном экране (рис. 1б).

В офисных проекторах и домашних кинотеатрах для освещения широко используются галогеновые лампы. LED или лазеры, в сравнении с лампами, позволяют создавать более компактные и эффективные с точки зрения потребления мощности батарейные модули, не требующие охлаждения, и позволяют формировать RGB-лучи непосредственно, не применяя цветных фильтров.

Дисплейная машина — ядро проектора на основе полупроводникового источника освещения — состоит только из источника света в виде трех RGB LED или трех RGB-лазеров, драйверной схемы, оптических компонентов для освещения и проекционной линзы, микродисплея, причем некоторые (лазерные) версии проекторов позволяют обходиться даже без микродисплея.

Светодиодные проекторы получили значительно большее распространение на ключевых рынках сбыта — пикопроекторах и HUD. В большинстве надголовных дисплеев в автомобилях для проецирования используется светодиодное освещение. Малые проекторы на приборной панели проецируют актуальную информацию, например скорость или навигационные данные, на ветровое стекло (рис. 3).

Светодиодные проекторы

Светодиодные LED-проекторы создают изображения от первичных источников RGB LED, перенаправляя лучи посредством микродисплея на экран. Микродисплеи играют важную роль не только как зеркало, но и для формирования пиксельного цвета. Известно два ключевых типа микродисплеев:

- массивы микрозеркал (технология Texas Instruments, известная под названиями DLP или DMD (Digital Micromirror Devices), представляющие собой ИС с индивидуальной компоновкой каждого пикселя МЭМС (МОЭМС) зеркалами (рис. 1);
- ЖК-дисплеи на кремнии (LCoS), имеющие отражательную и подключенную к электронике заднюю сторону, каждый кристалл которых соответствует пикселю и индивидуально адресуется (рис. 2).

Архитектура оптической системы главным образом зависит от размера и типа микродисплея. Расхождение лучей отдельных светодиодов устраняется с использованием коллимирующих линз. С использованием специального дихроичного фильтра лучи различных длин волн могут только отражаться или передаваться, а специальные гомогенизирующие линзы рассеивают цвета и их интенсивность по всему поперечному сечению луча. Другие линзы переводят свет к микродисплею, перенаправляющему свет через проекционную оптику на экран. Поскольку угол наклона микрозеркала ограничен ($\pm 12^\circ$), падающий и отраженный лучи должны достаточно

разделяться, чтобы избежать интерференции при функционировании освещающей и проекционной линз, что достигается за счет специальной призмы. Лучи, приходящие на призму с полным внутренним отражением (Total Internal Reflection, TIR), полностью отражаются.

Фундаментальное различие между DMD- и LCoS-решениями состоит в том, что жидкие кристаллы могут обрабатывать только линейно поляризованный свет — в отличие от DMD. Вместо призмы TIR для них требуется разделитель поляризованного луча (PBS). LED излучают неполяризованный свет, поэтому системы LCoS требуют поляризационной оптики. В дизайн оптической системы LCoS хорошо вписываются лазеры, лучи которых являются поляризованными.

Современные светодиоды характеризуются высокой интенсивностью света, которая позволяет создавать пикопроекторы с оптическим выходом более 1 Вт и выходом светового потока свыше 20 лм (достигающим порядка нескольких сотен люмен). Светодиоды характеризуются высокой эффективностью и воспроизводят, в зависимости от условий освещения, изображения на расстоянии свыше 1,5 м. Но первые разработки, пикопроекторы и HUD, обладая низкой системной яркостью (примерно 5–15 лм для пикопроекторов), имели довольно высокую себестоимость. Разработки эффективных диодов и новых типов корпусов повышают характеристики проекторов и усиливают к ним пользовательский интерес. Помимо индивидуальных RGB LED различной мощности, разрабатываются компоненты специально для проецирования, комбинирующие два и более цветов для достижения соответствующей яркости и эффективности.

Лазерные проекторы

Лазерные диоды, как и светодиоды, могут быть яркими и компактными источниками трех первичных цветов.

Лазеры в проекторах могут использоваться для:

- лазерного сканирования (Laser Beam Steering, LBS);
- лазерного освещения микродисплея с использованием пространственных световых модуляторов (Spatial Light Modulators, SLM).

Сканирующий лазерный принцип основан на оптическом объединении RGB-лучей и производстве одного лазерного луча размерами в один пиксель, посредством которого сканирующее одно- или двунаправленное МЭМС-зеркало выполняет пиксельное сканирование изображения на экран (рис. 5). Частота переключения является высокой, и изображение воспринимается как целостная картина. Цветовая смесь в пикселе является результатом рабочего цикла соответствующего лазерного диода.

Лазерная сканирующая технология позволяет обходиться без многих компонентов, требуемых для светодиодного проецирования, — микродисплея и оптики. Вместо микродисплея на основе микрозеркал или LCoS с большим числом пикселей достаточно только одного МЭМС-зеркала, хотя может использоваться даже массив LBS MEMS-зеркал. Сканирующий принцип отличает LBS от микродисплейного освещения, при котором 2D-массив пиксельных зеркал модулирует лазерный свет в каждом пикселе. Лазерные проекторы могут обеспечивать разрешение

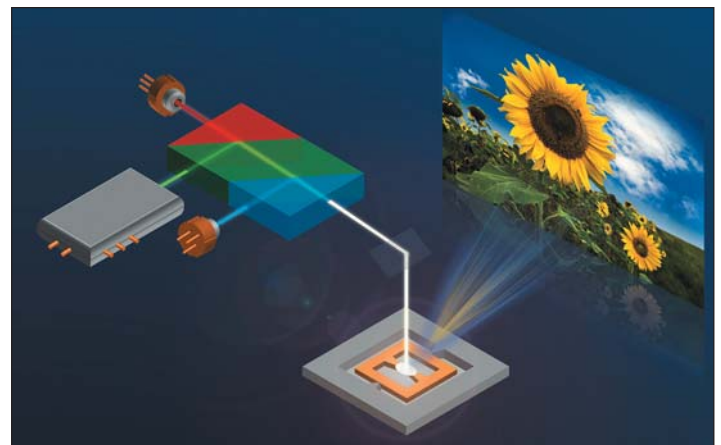


Рис. 5. Дисплейная технология PicoP от MicroVision: МЭМС-сканер+RGB-лазеры

и четкость до HD без увеличения размера, а в LBS-версии — вообще без микродисплея проекционной машины, что снижает цену лазерной технологии при крупносерийном производстве.

Красные лазеры как источники освещения широко используются в DVD-плеерах, а синие и зеленые лазерные диоды относятся к числу самых последних разработок — например, для Blu-ray DVD. В 2009 г. OSRAM достигла прорыва в разработке своего первого непосредственно излучающего зеленого лазера. До того времени зеленые лазеры могли производиться только с использованием специальных кристаллов, которые преобразовывали ИК-излучение в специальный свет (SGL). При запуске непосредственно излучающих диодов в 2012 г. лазерные проекционные модули будут становиться меньше по размеру и более конкурентоспособными со светодиодами в плане соотношения характеристик и цены.

Помимо возможности дизайна экстремально малых проекционных блоков, светодиодные и лазерные проекторы обладают способностью воспроизводить яркие цвета в широкой цветовой гамме с высокой контрастностью. Обе технологии обеспечивают низкое энергопотребление и срок службы порядка 20 000 ч. Ожидается рост рынка пикопрокторов, работающих от аккумуляторных батарей, что требует высокой эффективности дисплейного устройства и источника света.

Границы применимости лазерной технологии в сравнении с методами, основанными на светодиодном освещении, шире — от пикопрокторов до домашних кинотеатров, от лазерных проекторов HUD до высоко-разрешающих сканеров, мобильных и промышленных роботов.

Даже в тех применениях, которые выше именуется светодиодными, светодиоды могут быть вытеснены лазерами, то есть лазеры могут применяться для освещения зеркальных массивов DLP и LCoS. И Syndiant, и TI разработали лазерные версии своих проекторов. Syndiant уже выпускает лазерные модули LCOS, в дизайн которых лазеры органично вписались ввиду того, что генерируют поляризованный свет и показали высокую эффективность в сравнении с LED.

Отличительная особенность лазерной технологии — отсутствие необходимости в фокусирующей и другой оптике для получения резкого, четкого изображения на любых поверхностях. Высокое *f*-число лазерного света соответствует высокому проценту передачи света и низкому проценту потерь в оптических системах. Вследствие этого лазерное освещение исключает необходимость в фокусировке при применении как LBS, так и микродисплейной технологии.

Разрешение микродисплеев с фиксированной решеткой определяется числом и размером пикселей, но растровая технология LBS с тем же самым числом пикселей будет иметь более низкое разрешение вследствие отклонений в процессе развертки.

Выход для обеих технологий состоит в снижении размера пикселя, повышении фактора заполнения микродисплеев, точности переключения и яркости лазерного света.

Важнейшей проблемой, ассоциируемой с использованием лазерных проекторов, является зернистость (или пятнистость, speckle), вызванная узким спектром когерентного излучения лазера. Известны два наиболее общих метода снижения зернистости (despeckling): спектральное уширение и варьирование эффективного расстояния.

Для диодных лазеров зернистость снижают, применяя ВЧ-модуляцию в схеме управления лазера, что расширяет набор длин волн на выходе. Но эта техника применима к цветным RGB непосредственно излучающим DGL и не подходит для частотно удваиваемых лазеров. Поэтому наиболее распространенным до появления DGL был метод временного или пространственного варьирования длины пути посредством вращающихся, вибрационных или электронно-модулируемых элементов.

Еще один аспект применения лазеров связан с безопасностью. Лазеры мощных сканирующих проекторов являются довольно опасными. Например, лазерные компоненты Nichia характеризуются согласно Class 3B и 4 IEC60825-1 и 21 CFR Part 1040.10 Safety Standards. На лазерные лучи проектора нельзя смотреть непосредственно без использования защитных очков, отражения лазерного луча также опасны. В наибольшей степени опасны лазеры при их применении в сканирующих лазерных проекторах, так как в оптических системах микродисплейных проекторов прежде достижения микродисплея и в проекционной линзе происходит уширение и рассеивание лазерного света.

Полупроводниковые RGB-источники для проекционного освещения. Уровень развития технологий и проблема «зеленого зазора»

Обычные и лазерные диоды имеют много общего. Кроме того, что это излучающие свет полупроводниковые диоды на основе кристаллов, что находит отражение в устройстве и конструкции, полупроводниковые осветительные диоды также сближает проблема, известная как green gap, или так называемый «зеленый зазор» (это название ассоциировано также с шириной запрещенной зоны лазеров для получения соответствующей длины волны).

Светодиоды

Светодиод, или светоизлучающий диод (СД, СИД, LED), — это оптоэлектронный полупроводниковый диод, способный генерировать свет в результате электролюминесценции, то есть излучать при пропускании через *p-n*-переход электрического тока так называемое спонтанное оптическое излучение в узком (хотя и более широком, чем у лазеров) диапазоне спектра.

LED, в отличие от лазеров, генерируют сильно расходящийся свет, что требует собирающей оптики, а также многоканального модулятора и проекционной оптики. Светодиодные проекторы не обладают такой же монохроматичностью и качеством луча, как лазеры, и нуждаются в ручной фокусировке, но не имеют проблем зернистости и более безопасны.

Кристалл светодиода излучает конкретный цвет. Белый свет достигается посредством смешения отдельных цветов излучения скомбинированных вместе светодиодов, либо посредством преобразования длины волны. Таким же способом могут быть получены другие цвета.

Люминофоры — спутник СИД-технологии, обеспечивающий преобразование монохроматического синего или близкого к УФ излучения СИД-кристаллов в спектр цветов в широкой спектральной полосе.

В настоящее время доступны СИД практически всех цветов, включая требуемые для проецирования красный, зеленый и синий. Полупроводник GaP, например, излучает свет в красном спектре. Для глубоко красного излучения может использоваться AlGaAs — распространенный материал светодиодов, излучающих в ближнем ИК. Более короткие длины волн в красном диапазоне достигаются с использованием GaAsP и AlInGaP. Внутренняя квантовая эффективность (извлеченные из LED фотоны) близка к 100% для волн длиной порядка 650 нм, но высокие эффективности сложно достижимы на длинах волн 620 нм, к которым человеческий глаз более чувствителен [7]. Полупроводниковый материал InGaN — нитрид галлия, модифицированный индием, — один из самых распространенных материалов светодиодов, которые излучают свет в синей, фиолетовой и зеленой части спектра. Возможно использование и других нитридных материалов (AlN).

По данным IMS Research, галлий-нитридные светодиоды с 2012 г. ожидает новый этап роста, и, как видно из диаграммы (рис. 6), с этого времени применение данной технологии для проекторов становится более активным.

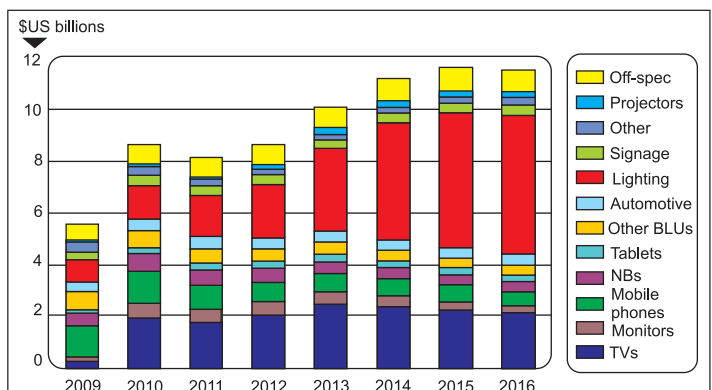


Рис. 6. Динамика роста рынка закорпусированных GaN LED для различных применений в 2009–2016 гг. Источник: IMS Research

Яркость, или световой поток в люменах, — наиболее важный параметр светодиодов. Причем для проецирования наиболее важен полезный световой поток LED, используемый в оптической системе. Доступная мощность мобильных пикопроекторов ограничена, чтобы гарантировать определенное время батарейной работы. Для мобильных устройств приобретает актуальность другой важный параметр — эффективность свечения, измеряемая в лм/Вт. Светодиодный источник должен соответствовать требованиям эффективности на уровне кристалла, корпуса, оптической системы проектора.

OSRAM Opto Semiconductors ввела LED тонкопленочные кристаллы на основе технологий ThinFilm и ThinGaN с высокой эффективностью свечения [8]. Доминирующие длины волн — 617, 525 и 460 нм. Красные ThinFilm, зеленые и синие ThinGaN кристаллы используют AlInGaP и InGaN соответственно. Эффективность свечения падает с током неодинаково для различных размеров кристаллов, она является максимальной для максимального размера LED-кристалла.

Одной из крупнейших проблем нитридных СД является так называемый green gap — резкое снижение эффективности излучателей на более длинных волнах. Хотя для светодиодов проблема green gap начала решаться раньше, чем для лазеров, полностью проблема не была решена. Технологически наиболее сложной является спектральная область зеленого–желтого–оранжевого цвета. Данный недостаток ограничивает эффективность излучения белого и других цветов на основе зеленого и, следовательно, системную яркость проектора. Для генерации белого света необходим вклад зеленого компонента потока свыше 65%.

Для перекрытия низкой эффективности зеленого излучения OSRAM разработала LED-продукты RGGB-типа для одноканального освещения, в которых два зеленых кристалла компенсируют низкую эффективность зеленого свечения. Хотя одноканальный подход исключает необходимость в оптическом объединении, для достижения однородности по-прежнему требуются оптические элементы (массивы линз), а яркость ограничена вследствие того, что максимальная излучающая область содержит три цвета. Поэтому OSRAM рекомендует свое решение для недорогих проекторов, не требующих высокой яркости.

Трехканальный метод — это способ использовать максимальную излучающую поверхность для каждого цвета, но его стоимость выше. Двухканальный метод основан на оптическом объединении в одном корпусе синего и красного кристаллов, а для зеленого света используется максимальная площадь излучающей поверхности в отдельном корпусе. При этом важно, что каждая проекционная оптическая система имеет максимально полезную светоизлучающую область LED, за пределами которой излучение не может быть использовано [8]. Цена светодиодов пропорциональна площади кристалла, поэтому цель состоит в увеличении площади для эффективности свечения кристалла, но без превышения системного предела параметра étendue оптической системы — характеристики распространения света в среде по площади излучения и углу.

Вследствие необходимости в более чем 65%-ном вкладе зеленого компонента для получения белого света OSRAM разработала метод преобразования свечения синего LED посредством люминофора, что дает 90% светового потока в люменах с широким спектром. Выход в люменах белого светового потока в двух- и трехканальной архитектуре повышается на 40%. Мобильный проектор Dell M110 с использованием трехканальной архитектуры и данного метода преобразования для зеленого света дает выход в 300 лм.

Другой метод состоит в получении истинно зеленого света, что достигается совершенствованием технологии производства кристаллов на основе GaN — InGaN и AlGaIn. Для GaN-материалов характерна высокая плотность дефектов, но, несмотря на это, достигается внутренняя квантовая эффективность 70–90% и выше. Длинные волны излучения (зеленого и желтого цвета) достигаются при увеличении содержания индия, но эффективность резко падает при увеличении длины волн.

Для перекрытия проблемы «зеленого зазора» инженеры компании Toshiba помещали тонкие слои AlGaIn в активную область обычного устройства. Проблемы, ассоциируемые с движением светодиодов к более длинным волнам, состоят в старении кристаллической структуры и фазовом разделении, что было исправлено улучшением процесса наращивания. Переключение к полуполярной или неполярной плоскости наращивания позволило смягчить увеличение разделения электронов и дырок.

Специалисты Toshiba добились улучшения, используя сапфировые *c*-плоскости, и показали, что увеличение содержания Al позволяет уменьшить эффекты снижения эффективности на более длинных волнах. LED, излучающий на 532 нм, включает слой AlGaIn с содержанием алюминия порядка 0,3 и обеспечивает выход с квантовой эффективностью в 25,9%.

Новый OSRAM Ostar Projection Cube (рис. 7) в настоящее время уменьшает «зеленый зазор» за счет специальной технологии корпусирования. Эффективность представленного зеленого светодиода составляет 110 лм/Вт, что намного выше, чем у прежде доступных зеленых светодиодов в секторе встроенного проецирования. В первую очередь OSRAM Ostar Projection Cube допускает достижение высокого выхода встроенных проекторов: становятся возможными встроенные проекторы с системной яркостью до 25 лм, изображение которых будет ясно различимо даже в условиях окружающего освещения при ограниченной батарейной емкости. Отличающиеся размером кристалла, две версии светодиода производят 260 лм на 700 мА и 2,3 Вт или 130 лм на 350 мА и 1,2 Вт. Высокая яркость от малой поверхностной области размерами 3,8×4,1 мм при высоте в 0,6 мм достигнута благодаря специальному корпусированию, резко определяющему световую поверхность так, что свет излучается без отражений в пределах корпуса. Срок службы светодиода — свыше 20 000 ч, что также ярко показывает преимущества полупроводникового светодиодного освещения.



Рис. 7. Новый OSRAM Ostar Projection Cube LED для встроенного проецирования ярких цветов от смартфона

Таким образом, LED как источники освещения весьма перспективны в секторе мобильного проецирования вследствие своего компактного размера и высокого выхода светового потока. Выбор оптимального светодиода для проектора зависит от требуемых системных характеристик, размера, мощности, цены и может варьироваться с использованием доступных опций кристаллов, корпусов, архитектур освещения. Трехканальные архитектуры допускают оптическую эффективность до 90%, а двухканальные — до 80%.

Лазерные диоды

Лазерный диод представляет собой полупроводниковый лазер, в котором оптическое усиление генерируется при пропускании электрического тока через *p-n*-переход или *p-i-n*-структуру. В гетероструктуре электроны и дырки рекомбинируют, высвобождая энергию в виде фотонов. Данный процесс может быть спонтанным, а также может стимулироваться падающими фотонами, что приводит к так называемому вынужденному, или индуцированному, излучению или оптическому усилению с обратной связью в лазерном резонаторе и лазерному излучению.

Известны различные типы лазерных диодов, различающихся режимом работы, выходной мощностью, длиной волны, частотной по-

лосой, другими свойствами. Характеристики зависят от типа диодов и используемых материалов [7].

Конструкция лазерного диода, которая считается классической, включает тонкий прямоугольный полупроводниковый кристалл, служащий оптическим волноводом и ограничивающий излучение. Верхний и нижний слои кристаллического волновода легируются для создания *p-n*-перехода большой площади. Лазерный диод генерирует лазерное излучение при смещении *p-n*-перехода. Торцы кристалла полируются для формирования оптического резонатора Фабри-Перо. Механизм вынужденного излучения лазера работает следующим образом. Фотон спонтанного излучения соответствующей резонансной частоты, движущийся перпендикулярно этим плоскостям, проходит через волновод с многократным отражением от торцов, каждый раз вызывая вынужденную рекомбинацию электронов и дырок и создавая новые фотоны той же частоты, вследствие чего излучение будет усиливаться, вызывая лазерную генерацию.

Квантовая яма (quantum well) — это тонкий слой, который ограничивает движение электронов и дырок перпендикулярно поверхности слоя, движение в других направлениях при этом не ограничивается. Квантовая яма создается посредством размещения тонкого слоя между двумя другими слоями с широкой запрещенной зоной (например, GaAs квантовая яма встраивается в AlGaAs, или InGaAs в GaAs). Большинство лазеров отражают свет от торцов, но бывают также и поверхностно-излучающие лазеры (VCSEL и VECSEL).

Лазерные диоды могут быть одно- и многомодовыми. Одномодовый лазер имеет ширину волновода, сравнимую с длиной волны излучения, и генерирует излучение только в одном направлении, параллельном тонким слоям структуры. Ширина луча будет определяться только пределами дифракции. Многомодовый (multi-mode) лазерный диод генерирует излучение в нескольких поперечных режимах, что возможно, если волновод достаточно широкий в сравнении с длиной волны. Мультимодовые лазеры применяются, когда необходима высокая мощность излучения без условия хорошей сходимости луча. Если требуется хорошая фокусировка луча, применяются однорежимные лазеры, которые не могут генерировать излучение на разных длинах волн одновременно.

Перечислим ключевые характеристики полупроводниковых диодов, необходимые для понимания их преимуществ.

Электрооптическая эффективность wall-plug efficiency — общая эффективность преобразования энергии лазерной системы, которая должна измеряться при питании от стационарного источника (wall plug — «настенная розетка»), вследствие чего происходят потери в мощности питания и возникают затраты на охлаждение. Но WPE часто вычисляется на основе мощности, подаваемой на лазерный диод, то есть как электрооптическая эффективность лазерного диода при питании от мобильного источника.

Качество луча (beam quality) лазера — характеристика фокусировки луча в связи с его незначительной дивергенцией. Методы количественного определения изложены в [7]. Многие маломощные лазеры характеризуются высоким качеством луча, тогда как высокоомощные в большинстве своем имеют плохое качество, вследствие чего для них применяется коллимационная оптика (Beam Shaping).

Beam Splitter — это оптическое устройство, способное делить лазерный луч на два или более лучей. Так как свет, излучаемый лазерным диодом, линейно поляризован, то возможно комбинировать выходы двух диодов посредством поляризующего сплиттера, при этом создается неполяризованный луч удвоенной мощности с тем же качеством луча, что и от одного диода. Возможно комбинирование лучей лазерных диодов различных длин волн с использованием дихроичных зеркал.

Лазерные диоды применяются как управляемые источники света в волоконно-оптических линиях связи, считывателях штрих-кодов, лазерных указках, компьютерных мышках, лазерных шоу и дальнотемерах. Инфракрасные и красные лазеры применяются в проигрывателях CD- и DVD-дисков, лазерных указках, фиолетовые — в устройствах HD DVD и Blu-Ray. Синие лазеры нашли применение в проекторах нового поколения в качестве источника синего и зеленого света (при воздействии синего света на люминофор). Новыми применениями для лазеров являются проекторы, спектроскопия, 3D ToF-камеры.

Лазерные сканирующие проекторы, принцип действия которых был рассмотрен выше, требуют RGB-световых источников. Посредством аддитивного смешения красного, зеленого и синего получаются другие

цвета. Лазерные источники дают более широкое цветовое пространство, чем светодиоды и лампы, благодаря намного лучшей пространственной когерентности (качества луча) и высокой эффективности.

Воспринимаемые человеком цвета локализованы в 2D-диаграмме цветности CIE 1931 (рис. 8). Монохроматический свет соответствует краям цветной области. Лазерный свет близок к монохроматическому, что означает, что вся область цветов доступна для воспроизведения. Для ламп и светодиодов края доступной цветовой области лежат внутри диаграммы.

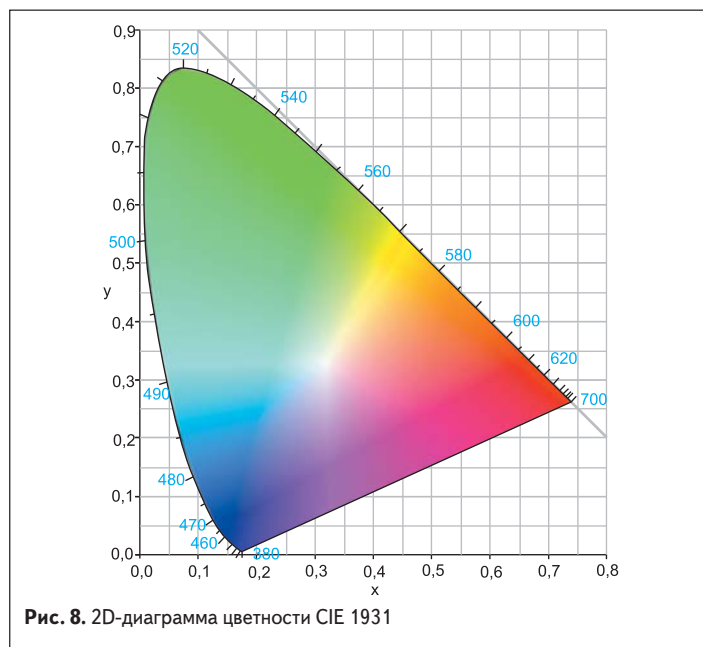


Рис. 8. 2D-диаграмма цветности CIE 1931

Выбор трех длин волн RGB определяет индекс цветового рендеринга (Color Rendering Index, CRI), который количественно измеряет, как хорошо передается цвет при освещении белым светом, состоящим из трех спектральных компонентов. Ввиду того, что лазерный свет имеет узкую спектральную полосу, лазерный рендеринг точно передает цвета. Выбор длин волн также влияет на эффективность свечения источника.

Для проекторов, работающих в помещениях, достаточно мощности до 1 Вт для каждого цвета. Для карманных устройств достаточно даже нескольких десятков милливольт, хотя желательны более высокие уровни мощности, особенно в условиях окружающего освещения. Проекторы кинотеатров потребляют порядка 10 Вт для каждого цвета. Но на данный момент RGB-лазеры достигли мощности, подходящей только для мобильных проекторов.

Для достижения малого пиксельного размера и высокого разрешения с использованием лазерной сканирующей технологии требуется высокое качество луча и одномодовые лазеры. Для других типов проекторов (микродисплейных) качество луча может быть ниже, и могут применяться многомодовые лазеры.

В наборе RGB-источников освещения красные и синие лазерные диоды являются зрелой технологией. Красные лазерные диоды для пикопроекторов выпускает, например, компания Mitsubishi (рис. 9).



Рис. 9. Красные лазерные диоды для пикопроекторов ML501P73 Mitsubishi Electric с выходной мощностью 1 Вт

На длине волны 638 нм диоды ML501P73 генерируют выход мощностью в 1 Вт (в импульсном мультимодовом режиме) и достигают WPE в 28%. Красный лазер HL63133DG на основе материала AlGaInP разработан для пикопроекторов фирмой Orpnext, его выход составляет 170 мВт (CW) на длине волны 638 нм (рис. 10). Фирма Sony долгое время находилась на передовом фронте со своими красными и близкими к ИК GaAs лазерными излучателями, а позднее со своими разработками синих GaN лазерных диодов для Blu-ray дисков и игровой консоли PlayStation.



Рис. 10. Красный лазер Orpnext HL63133DG для пикопроекторов

Синие лазерные диоды обычно производятся на основе нитрида галлия (GaN) или подобных материалах (InGaN), их излучение ранжировано в диапазоне длин волн 400–480 нм. В сравнении с предыдущим поколением лазерных диодов синие излучатели были более проблематичны с точки зрения высокого выхода мощности, срока службы и производства материалов, излучающих синий свет. Если близкие к ИК и красные лазеры для CD- и DVD-приводов объединяют активные слои GaAs, нанесенные на подложку из того же материала, то синие вначале были основаны на комбинации GaN активных слоев, наращенных на сапфировой подложке, поскольку GaN-подложки были недоступны. Ввиду несогласований кристаллических решеток GaN и сапфира синие диоды раннего поколения имели ограниченную выработку, были дорогими и имели ограниченный выход мощности.

Впоследствии Sony решила проблему производства и начала поставки дешевых и более мощных InGaN лазерных диодов, что позволило снизить цену Blu-ray плееров. Синие лазеры Sony для Blu-ray DVD не используются для проецирования. Но на основе данной техноло-



Рис. 11. Синий лазерный диод PL TB450 OSRAM OS с оптическим выходом мощностью в 1,4 Вт

гии Sony совместно с Sumitomo разработала первый в мире зеленый лазерный диод на основе материала GaN.

OSRAM Opto Semiconductors сконцентрировала свои усилия на производстве синих и зеленых лазеров специально для мобильного проецирования, и в настоящеем имеет в своем портфолио и тот, и другой. Синий лазерный диод от OSRAM на длине волны 450 нм, представленный в 2012 г. для профессиональных проекторов яркостью порядка 100 лм, имеет оптическую мощность 1,4 Вт, эффективность 27% (рис. 11). Для генерации зеленого излучения рекомендуется применять данный лазерный диод синего цвета в комбинации с люминофором. Таким же способом возможно получение красного цвета.

Японская компания Nichia разработала синие лазерные диоды на основе InGaN полупроводниковых материалов, например одномодовый диодный лазер NDB4216E с оптическим выходом 100 мВт в режиме непрерывной работы (CW) на длине волны 450–460 нм. Nichia достигла успеха в разработке зеленого GaN-LD еще в 2010 г., тогда же стартовали продажи образцов. В настоящее время компания продает также зеленый лазер, характеризующийся длиной волны 515 нм с максимальным выходом в 100 мВт.

На фоне того, что красные и синие лазерные диоды достигли высоких показателей в плане мощности и эффективности при компактном размере и низкой цене, зеленых лазерных диодов с аналогичными характеристиками долгое время не было. Зеленый свет обычно генерировался частотным удвоением выхода Nd:YAG или Nd:YVO₄ лазера, излучающего на 1064 нм. До недавнего времени большинство зеленых лазеров проекторов представляли собой ИК-устройства, дополненные для удвоения частоты кристаллической оптикой (кристаллы LiNbO₃, LiTaO₃ и др.). В результате так называемые синтетические зеленые лазеры были намного более громоздкими и дорогими, чем красные и синие источники непосредственного излучения. Их использование снижало системную эффективность и повышало сложность применения в мобильных устройствах. По яркости и качеству изображения, потреблению мощности и цене лазерная технология уступала светодиодной, результатом чего стало превалирование LED над лазерами в возникающем рынке пикопроекторов и практически полное отсутствие до 2012 г. лазеров в HUD.

Лидирующие производители активно работали над проблемой закрытия «зеленого зазора», и на данный момент это им, можно сказать, удалось.

В октябре 2012 г. OSRAM OS объявила о коммерческой доступности непосредственно излучающих лазерных диодов (рис. 12). Два первых компактных лазерных диода характеризуются оптическим выходом мощностью в 30 и 50 мВт в волновом диапазоне в 510–530 нм и отличаются высоким качеством луча.

Еще раньше, в июне 2012 г., Sony, известная своими разработками InGaN синих лазерных диодов для Blu-ray дисков и игровой консоли PlayStation, за счет введения новой полуполярной структуры смогла представить новое истинно зеленое лазерное устройство с выходом



Рис. 12. Непосредственно излучающий зеленый свет лазерный диод PL 520 от OSRAM OS, обеспечивающий высокое качество луча для лазерного проецирования

100 мВт на длине волны 530 нм [1] (рис. 13). Цветовая гамма расширена на 182% согласно стандарту NTSC (СIE 1976). Помимо своих достоинств на уровне характеристик, это был первый коммерчески доступный для OEM истинно зеленый полупроводниковый лазерный диод. Истинно зеленый полупроводниковый лазер является высоконадежным и характеризуется эффективностью работы (WPE) свыше 8%. Компания использовала GaN-подложку, технологии наращивания кристаллов и обработки пластин от Sumitomo Electric, объединяя их с лазерной технологией Sony для GaN, усовершенствованной при разработке Blu-ray.



Рис. 13. Первый в мире «истинно зеленый» полупроводниковый лазерный диод с выходом 100 мВт, разработанный Sumitomo Electric и Sony

Успех, состоящий в разработке первого в мире истинно зеленого полупроводникового лазерного диода, который имеет оптический выход свыше 100 мВт на 530 нм, был достигнут при использовании полуполярной GaN-подложки и за счет улучшения методов производства гомогенных активных слоев на индиевой основе, что приводит к успешному наращиванию высококачественного светоизлучающего слоя.

Soraa и Nichia — другие потенциальные поставщики зеленых лазеров. Большинство фирм, использующих GaN для производства осветительных диодов (и обычных, и лазерных), рассматривает его именно как излучающий материал. В отличие от них Soraa разрабатывает технологию GaN-on-GaN и связывает с ней большие перспективы для LED, лазерных диодов, силовой электроники.

Nichia разработала и продает зеленый лазер с длиной волны 515 нм с максимальным выходом в 100 мВт. А уже в ноябре 2012 г. Nichia объявила о своей новой разработке истинно зеленых лазерных диодов для дисплейных применений с выходной мощностью в 10 раз более высокой — свыше 1 Вт на длине волны 525 нм, и в 1,5 раза более высокой электрооптической эффективностью WPE, чем у предложений от конкурентов на основе GaN.

DGL по сравнению с синтетическими лазерами характеризуются стандартным меньшим размером, низкими ценами и высокими объемами выработки. При запуске непосредственно излучающих диодов в 2012 г. лазерные проекционные модули будут становиться меньшими и более конкурентоспособными в сравнении со светодиодными проекторами. Выход на рынок новых поставщиков DGL-лазеров облегчает OEM-выбор компонента с подходящими характеристиками и стимулирует ценовую конкуренцию.

Рост рынка лазерных проекторов и сканеров

Ключевыми применениями для технологий проецирования с использованием полупроводникового освещения являются пикопроекторы и HUD. Как предсказывают аналитики Pacific Media Associates, рынок пикопроекторов обещает стремительно расти — от 3 млн единиц в 2011 г. до 58 млн в 2015 г. Яркие перспективы ожидаются и для рынка HUD. В 2012 г. объем рынка HUD близок к \$1 млрд. В исследовании MarketsandMarkets, посвященном анализу состояния и перспектив глобального рынка HUD в 2012–2017 гг., текущий объем оценивается в \$991,86 млн и дается прогноз, что данный рыночный сегмент достигнет \$2,91 млрд в 2017 г. с CAGR в 24%.

Ключевыми применениями лазерной сканирующей технологии остаются пикопроекторы и HUD, но набор функций и опций в рам-

ках данных применений пополняется, а спектр применений расширяется. Весьма интересными являются разработки виртуальных touch- и 3D-дисплеев — например, от Microvision и LightBlueOptics. Все разработки, многие из которых представляют собой различные способы МЭМС-сканирования и проецирования или различные опции мобильного проецирования, рассмотреть нет возможности. Акцентируем внимание только на одной из тех, которые открывают новые перспективы применения именно в связи с усовершенствованиями полупроводниковых источников света, а именно — в связи с коммерциализацией эффективных непосредственно излучающих лазеров.

Институт Fraunhofer IPMS объявил о новых усовершенствованиях квазистатической технологии LinScan с динамическим переключением луча (рис. 14). Перечень усовершенствований включает разработку новой схемы для более быстрого переключения целевых позиций лазерного луча, динамической регулировки скорости сканирования, достижение более высокого разрешения и четкости при применениях в 3D-камере или миниатюрных лазерных проекторах.

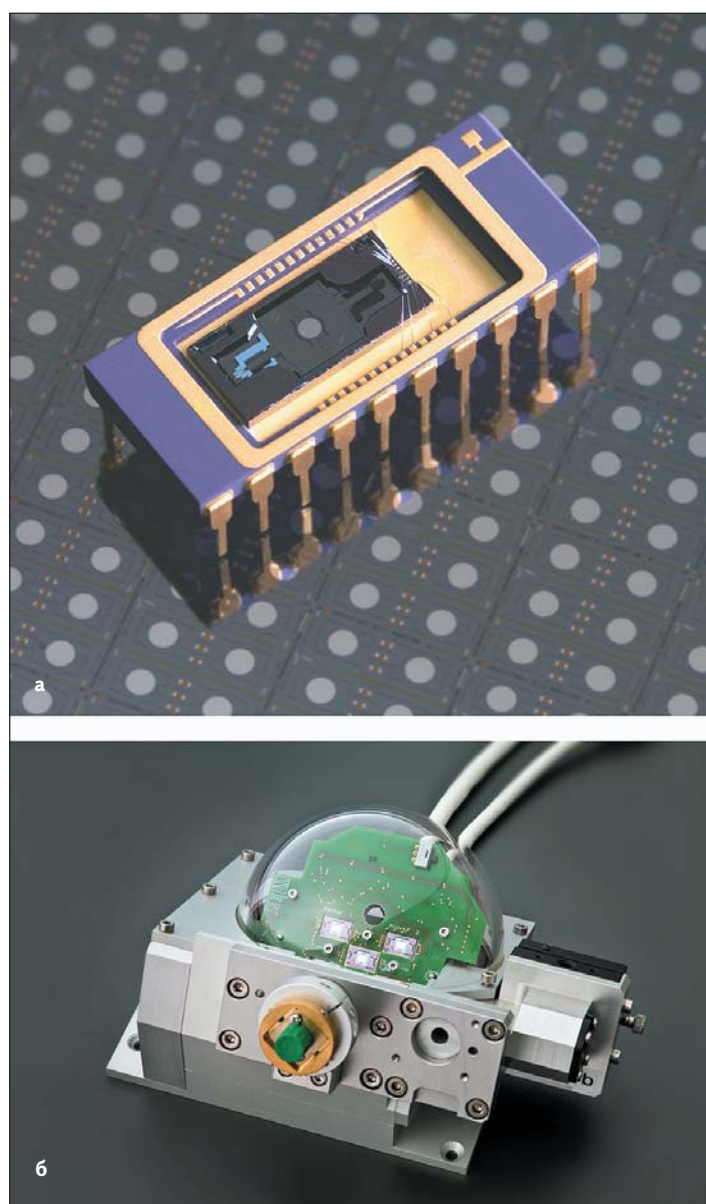


Рис. 14. Лазерная сканирующая технология LinScan Fraunhofer IPMS, сущность и применение: а) квазистатический/резонансный LINSCAN MEMS-сканер; б) оптическая сканирующая головка 3D TOF-камеры с интегрированным MEMS сканирующим зеркальным массивом

Заключение

Повышение характеристик и коммерциализация DLG-лазеров стали сильнейшим стимулом, во-первых, к дальнейшему совершенствованию технологий лазерного МЭМС-сканирования и проецирования во всех аспектах, а во-вторых — к конкуренции технологий. Конкурирующие с лазерной технологией на основе светодиодных источников освещения и микродисплеев LCoS, DLP обладают преимуществами высоких характеристик и качества изображения, зрелости, безопасности и цены, и именно они заложили область применений. Только в случае, если весь набор в сумме преимуществ лазерной технологии — в плане характеристик, цены и безопасности — качественно превысит показатели светодиодной и других технологий, клиенты и производители будут готовы перейти на лазерные проекторы/сканеры. Так как весь набор преимуществ лазерной технологии является нативным, то ее коммерческий успех будет во многом зависеть от следующих технологических открытий со стороны позиционированных в данной нише ведущих игроков — Microvision, OSRAM, Sumitomo и Sony, института IPMS им. Фраунгофера, bTendo и ST, а также ряда других. Конкуренция между технологиями полупроводникового освещения предостит серьезная, вследствие чего потребителям можно будет надеяться на появление новых коммерческих предложений, технологиче-

ских усовершенствований и расширение сферы применений с использованием методов проецирования или сканирования. ●

Литература

1. Сысоева С. Зеленый свет в дорожной карте лазерных сканирующих дисплейных технологий // Компоненты и технологии. 2012. № 11.
2. Сысоева С. HUD: проекция будущего // Компоненты и технологии. 2012. № 10.
3. Сысоева С. МОЭМС — доступные технологии генерации и сканирования оптической информации // Компоненты и технологии. 2010. № 9.
4. Сысоева С. МОЭМС — доступные технологии генерации и сканирования оптической информации // Компоненты и технологии. 2010. № 8.
5. Lincoln J. March of the Pico Projectors. <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/audiovideo/march-of-the-pico-projectors/0>
6. Gutttag K. PICOPROJECTION DISPLAYS: Laser-LCOS microdisplays make for tiny, low-cost picoprojectors. <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-46/issue-1/features/picoprojection-displays.html>
7. <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
8. Nguyen F., Morgott S. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Pico-projector design uses color LEDs. <http://www.edn.com/design/consumer/4371210/Pico-projector-design-uses-color-LEDs>