

ТЕХНОЛОГИИ

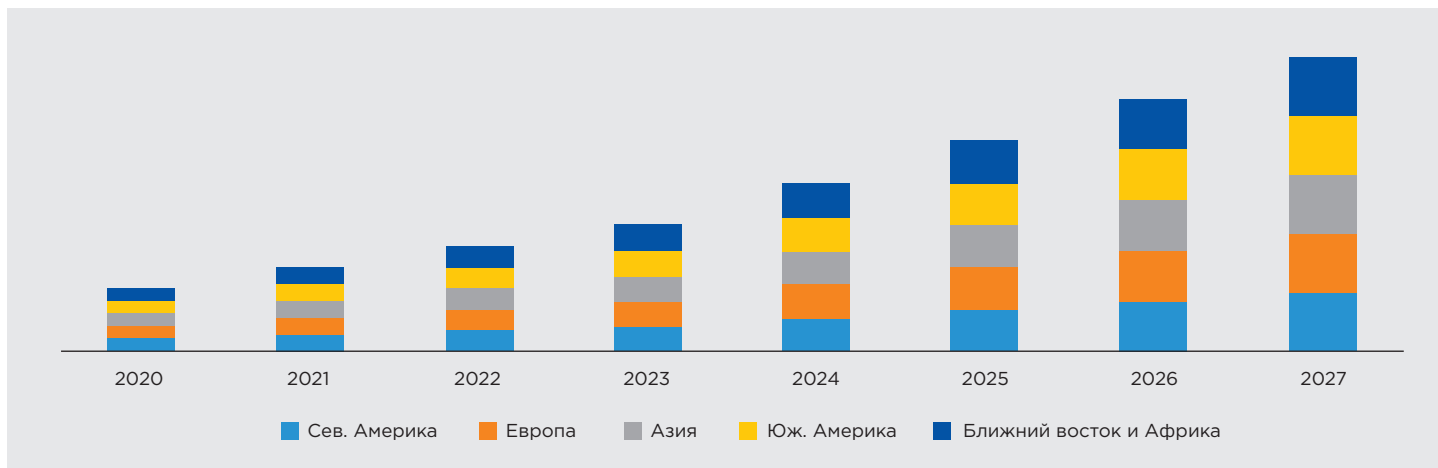
Перспективы и возможности производства микро-LED



Текст: Владимир Иванов



По сравнению с технологиями устройств отображения информации, такими как жидкокристаллические дисплеи (LCD) и уже ставшие традиционными органические светоизлучающие диоды (OLED), микро-светодиодные (микро-LED) дисплеи обладают потенциальными преимуществами – быстрый отклик и широкая цветовая гамма, низкое энергопотребление и длительный срок службы. Поэтому микро-LED считается перспективной технологией, которая может заменить LCD и OLED, по крайней мере, в некоторых приложениях. Хотя перспективы и радужные, существует ряд технологических проблем, которые не решены полностью для масштабной коммерциализации. К ним относятся проблемы эффективной и надежной сборки отдельных LED-матриц в адресные массивы, создание полноцветных схем, снижение дефектов и увеличение выхода годной продукции. В статье мы рассмотрим ряд технологических разработок для производства микро-LED.



1
Прогнозируемый рост рынка микро-LED до 2027

Введение

По данным Data Bridge Market Research ожидается, что рынок микро-LED будет расти со среднегодовым темпом 84,25 % до 2027 года (рис 1)¹.

Рост рынка обусловлен спросом на более яркие и энергоэффективные дисплеи для смарт-часов, мобильных гаджетов и устройств виртуальной и дополненной реальности (AR – англ. Augmented Reality / VR – англ. Virtual Reality), а также повышенным интересом к данной технологии со стороны топовых производителей дисплеев, что отражает количество их патентов по данным Yole Developpement (рис 2)².

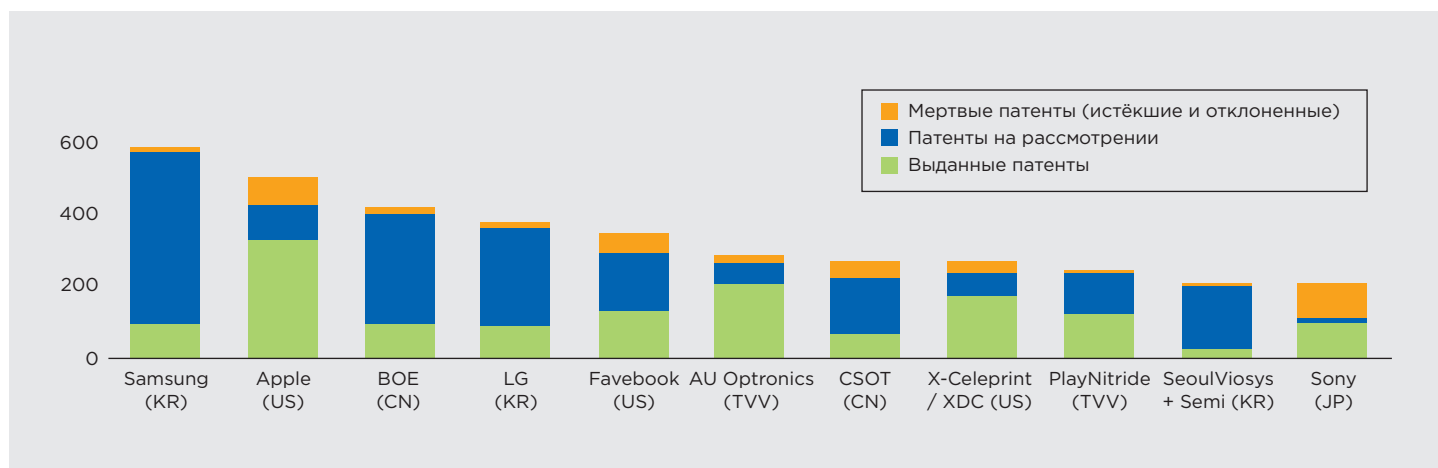
Патенты MicroLED в настоящее время поданы почти 480 организациями, их количество превышает 8 900. Лидерами по числу заявок, ожидающих рас-

смотрения, являются BOE, LG и Samsung. Некоторые компании получили много ранних патентов (Apple, AUO) и сейчас не подают большого количества новых.

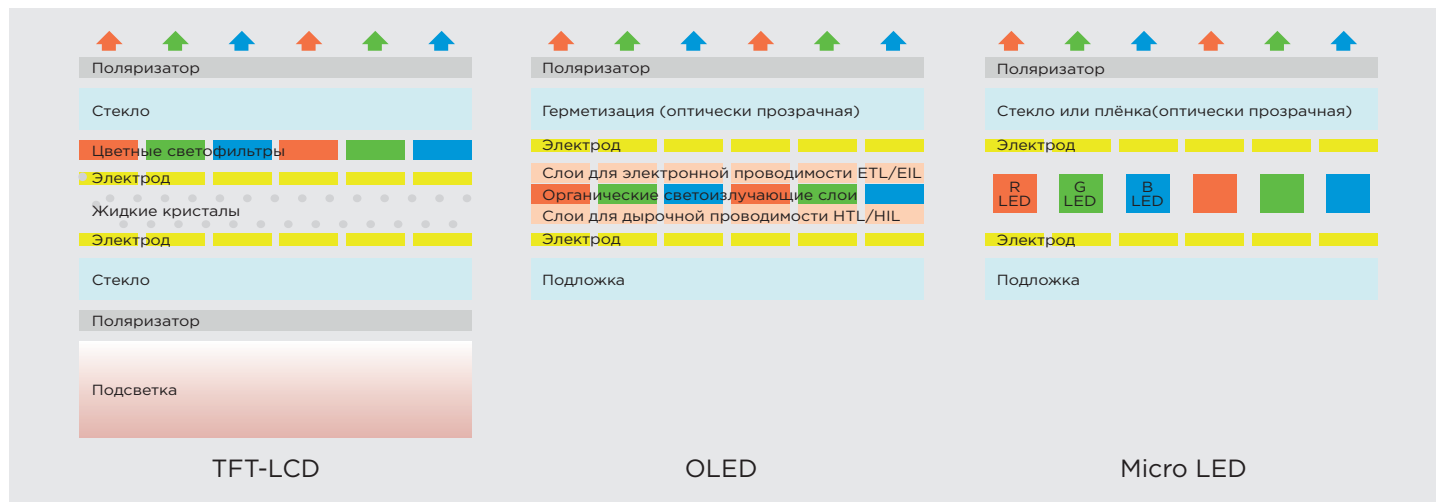
На сегодняшний день в производстве плоскопанельных дисплеев (FPD) преобладают технологии LCD и OLED. Конструкция LCD-дисплея требует, чтобы светодиодная подсветка излучала свет через матрицу жидких кристаллов для генерации изображений. И он имеет целый ряд недостатков, связанных с высоким энергопотреблением, медленным временем отклика, малым углом обзора и низкой однородностью. В отличие от LCD, OLED-дисплеи являются самоизлучающими, и каждый пиксель можно включать и выключать индивидуально. Однако OLED имеет ограничения по яркости и стабильности. Размеры обычных LED-кристаллов составляют более 200 × 200 мкм. Однако для дисплеев, включая носимые устройства, головные дисплеи и дисплеи с большой площадью отображения, требуются миниатюрные микросхемы, состоящие из массивов

¹ <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-micro-led-market>

² <https://www.microled-info.com/yole-developpement-says-rate-microled-patent-submission-rising-sharply>



2
Рейтинг подачи патентов на микро-LED



3

Структурные различия между LCD-, OLED- и микро-LED дисплеями

микро-LED с высокой плотностью и размерами менее чем $100 \times 100 \text{ мкм}^3$.⁴

Основные достоинства микро-LED перед традиционными технологиями:

- Низкое энергопотребление (в среднем на 70 % меньше, чем у LCD и на 30 %, чем у OLED).
- Глубокий черный цвет при высокой яркости, более широкий динамический диапазон (HDR) – до 30 раз выше.
- Широкая цветовая гамма.
- Продолжительность и стабильность работы.
- Создание дисплеев с высокой плотностью пикселей и разрешением.
- Работа с высокими частотами обновления.
- Быстродействие, скорость отклика измеряется в нано, а не миллисекундах.
- Максимальные углы обзора.
- Возможность создания экранов любой формы и размера, а также гибких экранов.
- Ниже стоимость производства.

Таким образом, микро-LED дешевле других технологий создания дисплеев за счет принципиальной простоты (рис 3).

Перспективы широкого спектра применений микро-LED привлекли в свое время большое количество производителей, стартапов и научных исследовательских организаций. С начала 2000-х микро-LED исследуются с точки зрения повышения эффективности люминесценции для применения в освещении

высокой яркости из-за низкого энергопотребления, лучшего распределения тока и меньшего эффекта самонагрева^{5, 6}.

В последние годы десятки компаний по всему миру были вовлечены в разработки технологии микро-LED:

- В 2012 году компания Sony продемонстрировала свою первую 55-дюймовую панель для телевизора с микро-LED подсветкой и разрешением Full HD, в которой использовалось шесть миллионов микро-LED. На тот момент по сравнению с существующими LCD-дисплеями и плазменными дисплеями прототип микро-LED от Sony имел коэффициент контрастности в 3,5 раза выше, ширина цветовой гаммы была в 1,4 раза больше, а время отклика в 10 раз быстрее.
- В 2018 году Sony выпустила свой первый микро-дисплей CLEDIS на основе микро-LED с размерами порядка $55 \times 55 \text{ мкм}$, его контрастность более 1000000:1 и площадь отображения глубокого черного цвета более 99 % поверхности отображения.
- НИИ CEA-Leti (Франция) в 2017 продемонстрировал свой прототип микродисплея с широким видеографическим массивом (WVGA) с шагом пикселя 10 мкм, который основан на монохромных (синих или зеленых) массивах GaN микро-LED и комплементарной схеме металл-оксид-полупроводник (КМОП).

³ Radauscher, E.J.; Meitl, M.; Prevatte, C.; Bonafede, S.; Rotzoll, R.; Gomez, D.; Moore, T.; Raymond, B.; Cok, R.; Fecioru, A. Miniaturized LEDs for flat-panel displays. In Proceedings of the SPIE, San Francisco, CA, USA. Volume 10124. 2017. 1012418

⁴ Olivier, F.; Daami, A.; Dupré, L.; Henry, F.; Aventurier, B.; Templier, F. 25-4: Investigation and improvement of 10 μm Pixelpitch GaN-based Micro-LED arrays with very high brightness. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 48. 2017. Стр. 353

⁵ Adivarahan, V.; Wu, S.; Sun, W.H.; Mandavilli, V.; Shatalov, M.S.; Simin, G.; Yang, J.W.; Maruska, H.P.; Asif Khan, M. High-power deep ultraviolet light-emitting diodes based on a micro-pixel design. Appl. Phys. Lett. 85. 2004. Стр. 1838-1840

⁶ Konoplev, S.S.; Bulashevich, K.A.; Karpov, S.Y. From Large-Size to Micro-LEDs: Scaling Trends Revealed by Modeling. Phys. Stat. Sol. A. 215. 2018. 1700508

T 1

Некоторые технологии монтажа массива кристаллов

| МЕТОДЫ | КОМПАНИЯ / ИНСТИТУТ | ПРИНЦИП | СКОРОСТЬ МОНТАЖА |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| Лазерный перенос (Laser lift-off) | Optovate K&S and Uniqarta | Лазер | 1000 за цикл / более 100 миллионов в час |
| Флюидика | Foxconn (eLux) | Гравитация и капиллярность | 50 миллионов в час |
| Электростатический | Apple (LuxVue) | Электростатика | Нет информации |
| Эластомерная штамповка | X-Celeprint | Силы Ван-дер-Ваальса | 1 миллион в час |
| С рулона на рулон (Roll-to-roll) | KIMM / EV Group | Рулонный штамп | 10000 в секунду / 36 миллионов в час |

- В 2018 компания PlayNitride выпустила два полноцветных прототипа микро-LED дисплеев: один представлял собой панель 64 × 64 с диагональю 0,89 дюйма и разрешением 105 пикселей на дюйм (PPI), а другой – панель 256 × 256 с диагональю 3,12 дюйма и разрешением 116 PPI.
- AU Optronics Corp. продемонстрировала полноцветный микро-LED дисплей с диагональю 12,1 дюйма и разрешением 1920 × 720 (169 PPI) с размером пикселя менее 30 мкм. Также в 2018 году компания X-Celeprint выпустила полноцветные микро-LED дисплеи с пассивной и активной матрицей.

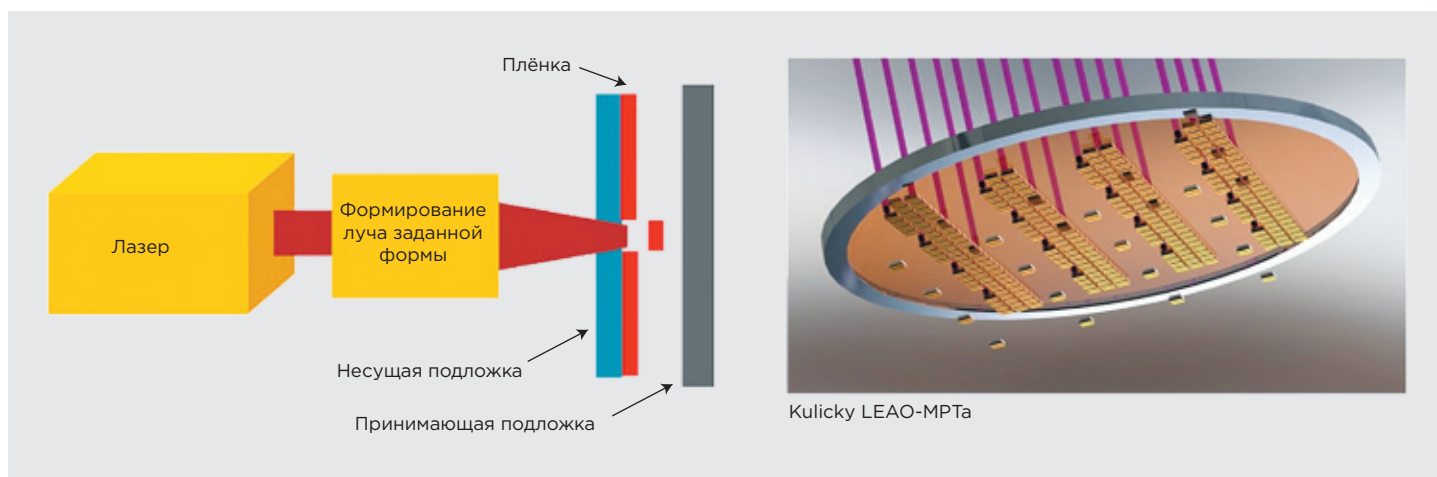
Технические проблемы возникают, когда размеры кристаллов уменьшаются, а их плотность увеличивается. Далее мы рассмотрим технологии сборки микро-LED и обсудим существующие узкие места и варианты их преодоления.

Технологии сборки микро-LED

Есть два метода для сборки дисплеев из отдельных кристаллов микро-LED. Первый – классический, так называемый «подобрать и разместить» (pick&place), который подразумевает захват каждого отдельного микро-LED, его точное позиционирование и монтаж на панель с последующим электрическим подключением к микросхеме драйвера. Таким методом можно собирать LED-дисплеи, в которых расстояние между LED это позволяет. Его можно использовать для производства дисплеев большого размера от нескольких дюймов до десятков дюймов, например для телевизоров, смартфонов и планшетов⁷.

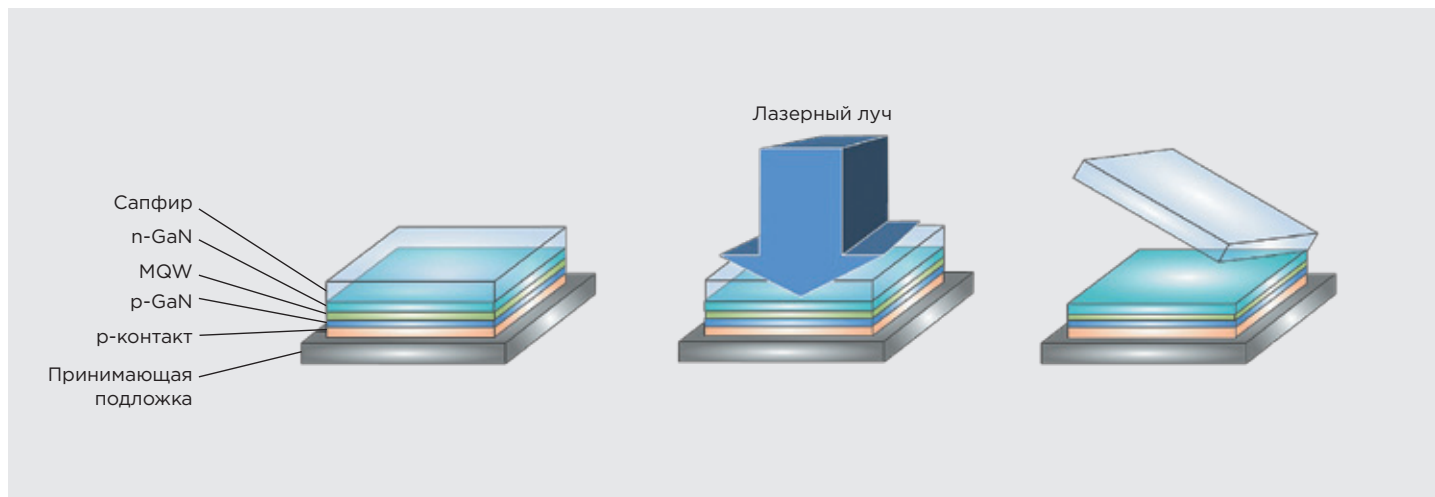
В качестве альтернативы, чтобы избежать сложностей процесса pick&place, были разработаны различ-

⁷ Lee, V.W.; Twu, N.; Kymissis, I. Frontline technology micro-LED technologies and applications. Inf. Disp. 32. 2016. Стр. 16-23



4

Технология монтажа кристаллов при помощи лазера (LEAP – Laser-Enabled Advanced Placement)



5

Схема процесса LLO для отслаивания пленки GaN от сапфировой пластины

ные технологии, позволяющие осуществлять монтаж массива кристаллов микро-LED за раз. На текущий момент из-за ограничения, связанного с размером пластины, используемой для роста светодиодов, данный метод применим в основном для создания микро-дисплеев, которые применяются в проекторах и служат экранами наручных смарт-часов.

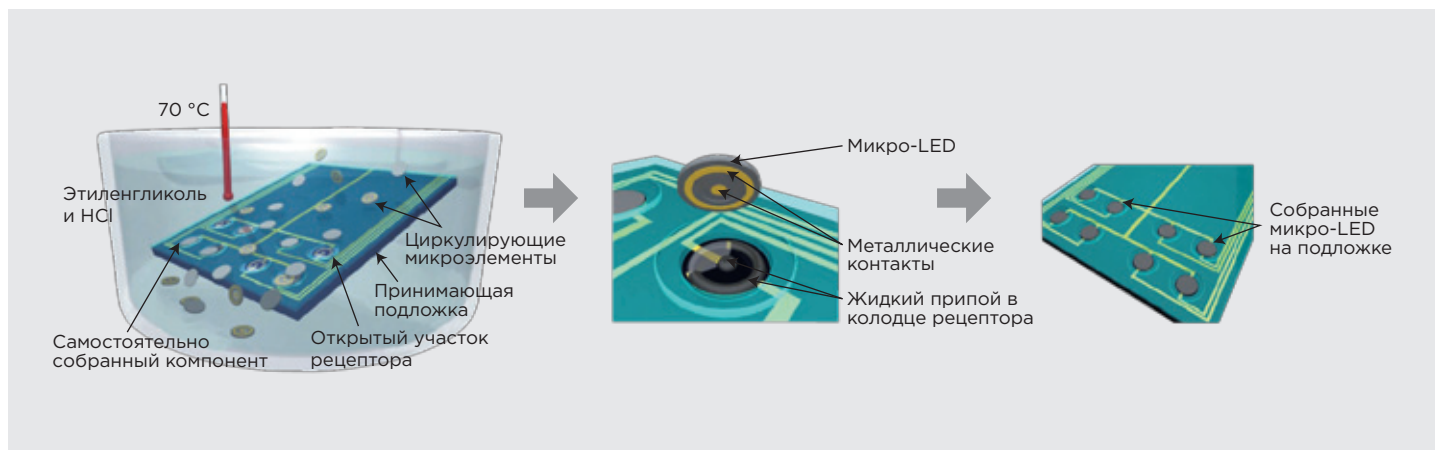
Оборудование для pick&place не позволяет монтировать миллионы кристаллов микро-LED с точки зрения временных и экономических затрат. Поэтому многие компании вложили внушительные средства и приложили значительные усилия для решения этой проблемы, исследуя ряд методов, включающих лазерные технологии, флюидику, электростатические или электромагнитные силы Ван-дер-Ваальса (11).

Технология лазерного переноса кристаллов – это процесс монтажа массива кристаллов, в котором лазерный луч вызывает отделение микро-LED от их несущей подложки и переносит на принима-

ющую подложку, как показано на рис 4⁸. Компания Kulicke & Soffa (K&S), эксклюзивный партнер «Остек-ЭК», расширила свои возможности в технологии сборки мини- и микро-LED путем стратегического приобретения 100 % доли Uniqarta. Технология LEAP™ от K&S позволяет монтировать около 1000 кристаллов за один лазерный импульс. Ожидается, что технология LEAP™ ускорит внедрение мини-LED подсветки для классических дисплеев, а также станет базовым инструментом для самых передовых применений, связанных с разработкой и производством дисплейной техники с прямым излучением на микро-LED.

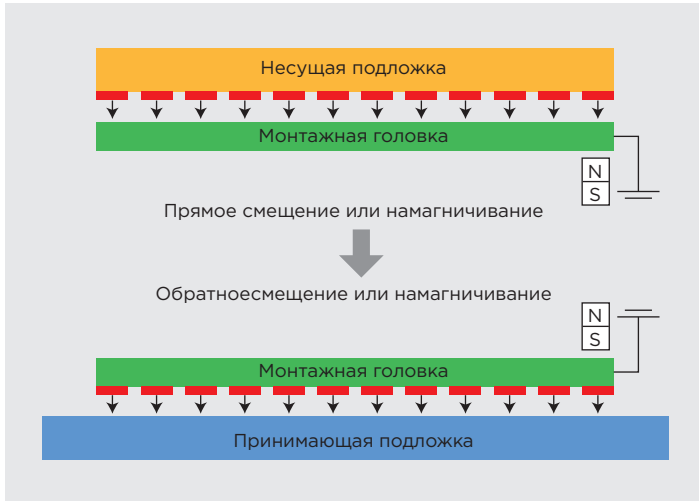
Облучение лазерным лучом приводит к взаимодействию света с веществом на границе раздела между несущей подложкой и кристаллами, в результате чего

⁸ Delaporte, P.; Alloncle, A.-P. Laser-induced forward transfer a high-resolution additive manufacturing technology. Opt. Laser Technol. 78. 2016. Стр. 33-41

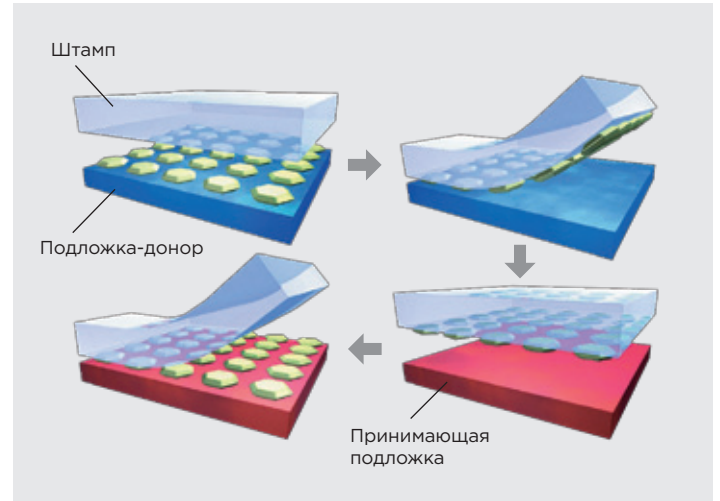


6

Схема процесса флюидной самосборки



7
Схема процесса монтажа кристаллов при помощи электростатики



8
Схема процесса монтажа кристаллов с помощью эластомерного штампа

кристаллы отделяются от подложки и в то же время создается локальная механическая сила, которая толкает кристаллы к принимающей подложке. Межфазное взаимодействие может быть таким же, как при лазерной взрывной литографии (Laser Lift-Off – LLO) в производстве GaN-LED на сапфировых пластинах (рис 5), в котором тонкий слой GaN (~10 нм) удаляется на эпитаксиальной границе пластины и разлагается на газообразный азот и жидкий галлий (Ga). Также данный метод может быть реализован путем использования временной подложки с полимерным клеем, служащим межповерхностным слоем на границе раздела, который разлагается при облучении лазерным лучом.

Британская компания Optovate, специализирующаяся на оптических технологиях, продемонстрировала свой метод patterned laser lift-off (p-LLO) для монтажа синих микро-LED с сапфировой пластины на при-

мающую подложку. Лазерные технологии монтажа массива кристаллов обладают высокой производительностью свыше 100 миллионов кристаллов в час⁹.

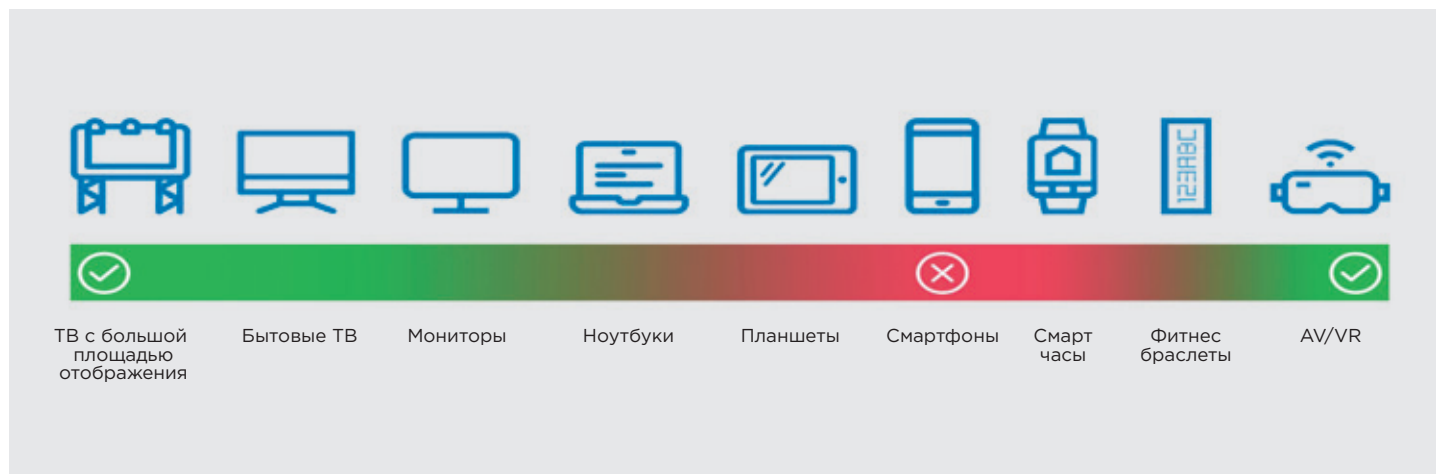
Технология флюидики базируется на принципе сил тяжести и капиллярного эффекта (рис 6)¹⁰. Самосборка проводится в жидкости: изопропанол, ацетоне или дистиллированной воде. Жидкость позволяет кристаллам свободно перемещаться по поверхности принимающей подложки, пока они не достигнут открытых участков рецептора и не будут смонтированы. После монтажа анодный и катодный электроды микро-LED соединяются с драйвером. Компания eLux, принадлежащая Foxconn, разрабатывает свои методы жидкостной сборки

⁹ Marinov, V.R. Laser-Enabled Extremely-High Rate Technology for LED Assembly. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 49. 2018. Стр. 692-695
¹⁰ Saeedi, E.; Kim, S.S.; Parviz, B.A. Self-assembled inorganic micro-display on plastic. In Proceedings of the 2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Hyogo. Japan. 2007

9

Схема процесса: (а) рулонной наноирипнтной литографии (R2RNIL) на гибкую подложку, (б) рулонной наноирипнтной литографии (R2PNIL) на жесткую подложку, (в) фотография системы EVG 570R2R для рулонной наноирипнтной литографии

Этилен-тетрафторэтилен-сополимер ETFE
 Ролики для нанесения резиста
 Резист
 Гибкая подложка
 Жесткая подложка
 УФ-источник
 Ролики



10

Фактическая конкурентоспособность технологии микро-LED на 2021

для монтажа массива кристаллов микро-LED с производительностью более 50 миллионов кристаллов в час¹¹.

LuxVue, компания, принадлежащая Apple Co., разработала технологию монтажа, которая работает по электростатическому принципу, использующему притяжение противоположных зарядов для захвата микро-LED¹². Монтаж массива кристаллов микро-LED осуществляется при помощи массива электростатических головок, к которым подается напряжение для захвата, размещения и нагрева (рис 7).

Компания X-Celerprint разработала технологию микро-сборки с помощью эластомерного штампа для монтажа массива кристаллов микро-LED, как показано на рис 8¹³. Процесс начинается с подготовки подложки-донора, на которой формируются массивы микро-LED. Затем мягкий эластомерный штамп контактирует с микро-LED. Микро-LED прикрепляются к штампу и демонтируются с подложки-донора силой Ван-дер-Ваальса, поскольку адгезия штампа выше. Затем массив микро-LED монтируется на принимающую подложку и отслаивается от штампа.

В Корейском институте техники и материаловедения (Korea Institute of Machinery and Materials – KIMM) был разработан процесс переноса кристаллов с рулона на пластину^{14, 15}, который можно

использовать для монтажа микро-LED с размерами кристаллов менее 100 мкм и толщиной до 10 мкм, как показано на рис 9. Процесс может обеспечить производительность до 10 000 кристаллов в секунду для гибких, растягиваемых и легких дисплеев. Весь процесс состоит из трех этапов:

- Первый шаг – подобрать и разместить массив управляющих тонкопленочных транзисторов (TFT) на временной подложке с помощью роликового штампа, покрытого одноразовой пленкой для переноса изображения.
- На втором этапе микро-LED снимаются с несущей подложки, помещаются на временную подложку и соединяются с TFT с помощью пайки.
- На последнем этапе массив соединенных между собой микро-LED и TFT накатывается на принимающую подложку, чтобы сформировать микро-LED дисплей с активной матрицей.

Компания EV Group (EVG) в 2013 представила первую в отрасли машину EVG 570R2R для рулонной наноимпринтной литографии. Данное оборудование было создано в сотрудничестве со специалистами Industrial Consortium on Nanoimprint (ICON) и A*STAR Institute of Materials Research and Engineering (IMRE). EVG является эксклюзивным технологическим партнером «Остек-ЭК» и специализируется на решениях для нанотехнологий, литографии и полупроводникового производства.

Текущие проблемы и перспективы

Несмотря на вышеописанные технологические достижения, все еще остаются некоторые критические узкие места, которые необходимо преодолеть при крупносерийном производстве дисплеев с микро-LED. Главный из них – количество годных

¹¹ Schuele, P.J.; Sasaki, K.; Ulmer, K.; Lee, J.-J. Display with surface mount emissive elements. Patent No. 9,825,202, 11 May 2017

¹² Bibl, A.; Higginson, J.A.; Hu, H.-H.; Law, H.-F.S. Method of transferring and bonding an array of micro devices. Patent No. 9,773,750, 26 September 2017

¹³ Meiti, M.A.; Zhu, Z.-T.; Kumar, V.; Lee, K.J.; Feng, X.; Huang, Y.Y.; Adesida, I.; Nuzzo, R.G.; Rogers, J.A. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp. Nat. Mater. 5. 2006. Стр. 33

¹⁴ Ahn, S.H.; Guo, L.J. Large-area roll-to-roll and roll-to-plate nanoimprint lithography: a step toward high-throughput application of continuous nanoimprinting. ACS Nano. 3. 2009. Стр. 2304-2310

¹⁵ Sharma, B.K.; Jang, B.; Lee, J.E.; Bae, S.-H.; Kim, T.W.; Lee, H.-J.; Kim, J.-H.; Ahn, J.-H. Load-Controlled Roll Transfer of Oxide Transistors for Stretchable Electronics. Adv. Funct. Mater. 23. 2013. Стр. 2024-2032

пикселей дисплея. Должно быть не более пяти битых пикселей на полноцветном RGB-дисплее с высоким разрешением (FHD) (1920 × 1080 пикселей), т. к. каждый микро-LED является пикселем, то выход годных должен составлять 99,9999 %. Битый пиксель может появляться на разных этапах производства: эпитаксия, процесс создания кристаллов LED и сборка. Например, брак вызванный остатками фоторезиста внутри зазоров между элементами на кристалле микро-LED¹⁶. Еще пример: в пассивной матрице с массивом микро-LED после flip-chip-монтажа кристаллов GaN микро-LED на кремний с общими полосковым р-электродом образуются многочисленные битые пиксели из-за отслаивания кристаллов от электрода. Без добавления процесса плазменного травления в кислородной среде для массивов с зазором между мезаструктурами в 170 мкм выход годных микро-LED в матрице составляет примерно 90 %. Однако когда ширина зазора уменьшается до 6 мкм, выход годных падает примерно до 67 %. Если добавить процесс плазменного травления для удаления остатков фоторезиста, то выход годных поднимется до 100 % для массивов с зазорами между мезаструктурами 170 мкм и станет более 95 % для массивов с зазорами между мезаструктурами 6 мкм.

Еще одна проблема – это обнаружение дефектов и технология ремонта. Для изготовления дисплея без дефектов даже при условии высокого выхода годных процесс ремонта неизбежен. Есть простое решение – удвоить количество микро-LED элементов для каждого пикселя. Однако эффективность дублирования в любом случае зависит от начального уровня дефектности. Если выход составляет 99,99 %, удвоение количества микро-LED может уменьшить количество битых пикселей с 5 000 до 5 пикселей на дисплее FHD. Но если выход составляет всего 99,9 %, то количество битых пикселей будет снижено до 500¹⁷. При этом если удваивать количество микро-LED, стоимость дисплея значительно возрастет. В качестве альтернативы некоторые разработчики предложили индивидуальные технологии восстановления пикселей. Например, компания Ras Tech, еще один технологический партнер «Остек-ЭК», имеет решения для ремонта бракованных микро-LED.

Реализация массового производства микро-LED дисплеев зависит от их конкурентоспособности по стоимости в сравнении с LCD- и OLED-дисплеями. Стоимость микро-LED дисплеев

включает в себя затраты на полупроводниковые пластины с кристаллами, сборку панелей, а также стоимость ремонта. На момент написания этой статьи конкурентоспособность по стоимости для некоторых применений уже реалистична (рис 10)¹⁸.

Большинство аналитиков согласны с тем, что микро-LED дисплеи расширят рынок сбыта, и в ближайшем будущем их производство начнет быстро расти. Некоторые считают, что значительный скачок и фактическое массовое производство микро-LED дисплеев произойдет не раньше 2030 года или около того. Некоторые настроены более оптимистично и считают, что массовое производство начнется примерно через 3-5 лет.

Заключение

Основными преимуществами микро-LED являются высокая яркость, эффективность и срок службы.

Высокая эффективность имеет важное значение, но в основном для носимых устройств. Для стационарных мониторов и телевизоров требования к эффективности значительно ниже. По мере того, как кристаллы LED становятся меньше, их эффективность растет. При просмотре общей эффективности систем отображения применение микро-LED позволяет примерно на 30 % снизить энергопотребление по сравнению с современными OLED.

Срок службы дисплея является проблемой для современных OLED, поскольку излучающая природа OLED в сочетании с его ограниченным сроком службы приводит к остаточным изображениям или выгоранию. Срок службы неорганических LED намного выше, а это означает, что остаточного изображения на дисплеях микро-LED не будет, как на OLED-дисплеях.

Несмотря на узкие места разработчики, мотивированные большим потенциалом технологии, с оптимизмом смотрят на производство микро-LED дисплеев. Ожидается, что полноценная коммерциализация микро-LED дисплеев может стать реальностью в ближайшие годы, при этом ставка делается на устройства небольшого размера, такие как проекционные дисплеи (HUD) для AR / VR, носимые устройства и гаджеты, а также дисплеи с низким PPI для архитектуры, видеостен, крупногабаритных табло и стендов (согласно оценке Yole Developpement).

По вопросам, связанным с микро-LED и другими технологиями, оборудованием, оснасткой и инструментами для производства микроэлектроники, обращайтесь по телефону: +7 (495) 877-44-70 или по e-mail: micro@ostec-group.ru.

¹⁶ Xie, E.; Stonehouse, M.; Ferreira, R.; Jonathan, J.; McKendry, D.; Herrnsdorf, J.; He, X.; Rajbhandari, S.; Chun, H.; Aravind, V.; et al. Design, Fabrication, and Application of GaN-Based Micro-LED Arrays With Individual Addressing by N-Electrodes. *IEEE Photonics J.* 9. 2017. 7907811

¹⁷ Henry, W.; Percival, C. ILED Displays Next Generation Display Technology. *SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap.* 47. 2016. Стр. 747-750

¹⁸ <https://www.microled-info.com/why-microled-displays-may-take-longer-expected-reach-market>