

# Перспективы и возможности производства микроLED-дисплеев

В. Иванов<sup>1</sup>

УДК 621.3 | ВАК 05.27.06

По сравнению с такими технологиями устройств отображения информации, как жидкокристаллические дисплеи (LCD) и уже ставшие традиционными органические светоизлучающие диоды (OLED), микросветодиодные (микроLED) дисплеи обладают потенциальными преимуществами – быстрый отклик и широкая цветовая гамма, низкое энергопотребление и длительный срок службы. Поэтому микроLED 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 микроLED-дисплеев.

По данным Data Bridge Market Research, ожидается, что рынок микроLED 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 реальности (Virtual Reality – VR) и дополненной реальности (Augmented Reality – AR), а также повышенным интересом к данной технологии со стороны ведущих производителей дисплеев, что отражает количество их патентов по данным Yole Development (рис. 2) [2].

Патенты на микроLED в настоящее время поданы почти 480 организациями, их количество превышает 8900. Лидерами по числу заявок, ожидающих рассмотрения, являются BOE, LG и Samsung. Некоторые компании (Apple, AU Optronics Corporation (AUO)) получили много ранних патентов и сейчас не подают большого количества новых.

На сегодняшний день в производстве плоскочелюстных дисплеев (FPD) преобладают технологии LCD и OLED. Конструкция LCD-дисплея требует, чтобы светодиодная подсветка излучала свет через матрицу жидких кристаллов для генерации изображений. Такие дисплеи имеют целый ряд недостатков, связанных с высоким энергопотреблением, большим 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 многих дисплеев, включая носимые устройства, головные дисплеи и дисплеи с большой площадью отображения, требуются миниатюрные микросхемы, состоящие из массивов микроLED с высокой плотностью и размерами менее чем 100 × 100 мкм [3, 4].

Основные достоинства микроLED по сравнению с 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;



Рис. 1. Прогнозируемый рост рынка микроLED до 2027 года

<sup>1</sup> ООО «Остек-ЭК», главный специалист, Ivanov.v@ostec-group.ru.

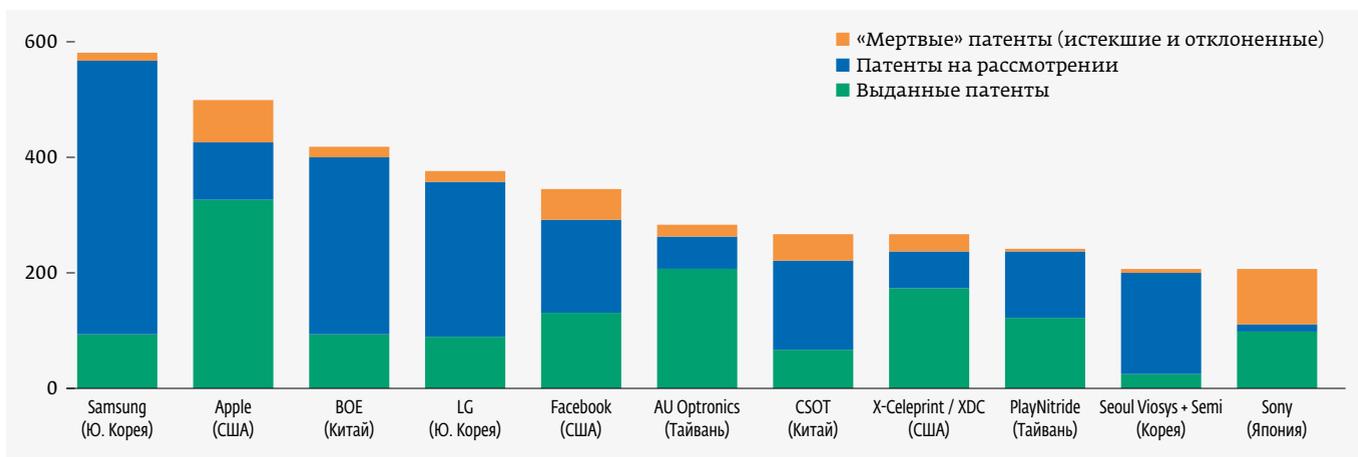


Рис. 2. Рейтинг подачи патентов на микроLED

- широкая цветовая гамма;
- продолжительность и стабильность работы;
- возможность создания дисплеев с высокими плотностью пикселей и разрешением;
- работа с высокими частотами обновления;
- быстроедействие, 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, микроLED дешевле других технологий создания дисплеев за счет принципиальной простоты (рис. 3).

Перспективы широкого спектра применений микроLED привлекли в свое время большое количество

производителей, стартапов и научно-исследовательских организаций. С начала 2000-х микроLED исследуются с точки зрения повышения КПД 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 микроLED:

- в 2012 году компания Sony продемонстрировала свою первую 55-дюймовую панель для телевизора с микроLED подсветкой и разрешением Full HD, в которой использовалось шесть миллионов микроLED. На тот момент по сравнению с существующими LCD-дисплеями и плазменными дисплеями прототип микроLED компании Sony имел коэффициент контрастности в 3,5 раза выше, ширина

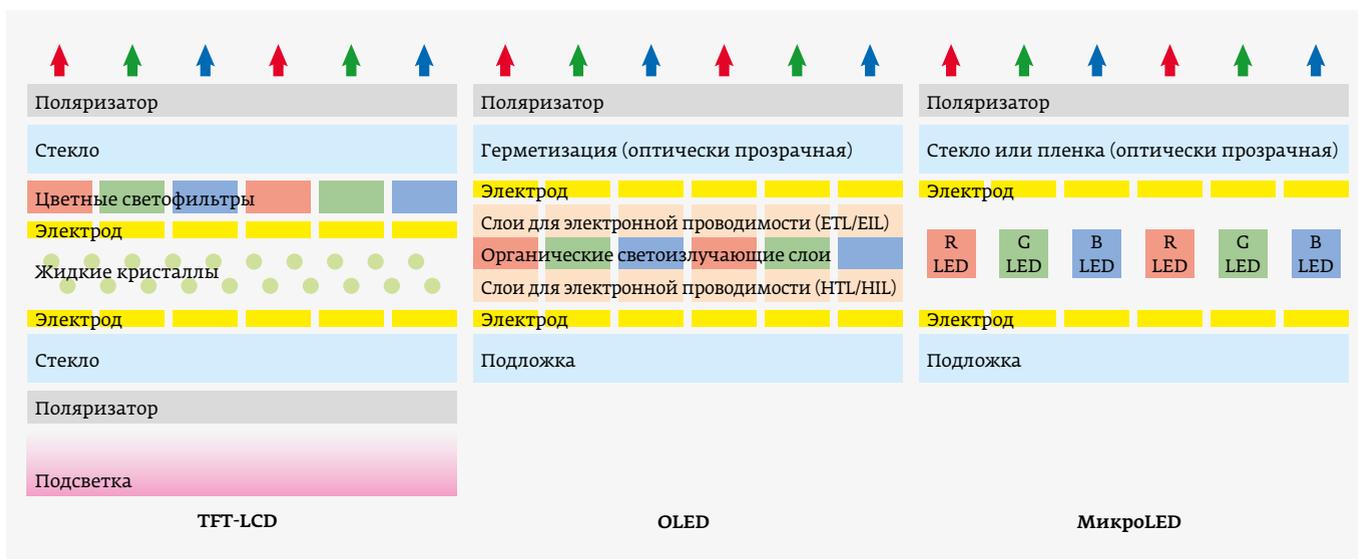


Рис. 3. Структурные различия между LCD-, OLED- и микроLED-дисплеями

цветовой гаммы была в 1,4 раза больше, а время отклика в 10 раз меньше;

- в 2018 году Sony выпустила свой первый микродисплей CLEDIS на основе микроLED с размерами порядка 55×55 мкм, его контрастность составляла более 1000000:1, а площадь отображения глубокого черного цвета – более 99% поверхности отображения;
- НИИ CEA-Leti (Франция) в 2017 году продемонстрировал свой прототип микродисплея с широким видеографическим массивом (WVGA) с шагом пикселя 10 мкм, который основан на монохромных (синих или зеленых) массивах GaN микроLED и комплементарной схеме «металл – оксид – полупроводник» (КМОП);
- в 2018 году компания PlayNitride выпустила два полноцветных прототипа микроLED 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 Corporation продемонстрировала полноцветный микроLED-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 микроLED-дисплеи с пассивной и активной матрицей.

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

### ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ МИКРОLED-ДИСПЛЕЕВ

Есть два метода для сборки дисплеев из отдельных кристаллов микроLED. Первый – классический, так называемый «подобрать и разместить» (pick&place), который подразумевает захват каждого отдельного микроLED, 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 планшетов [7].

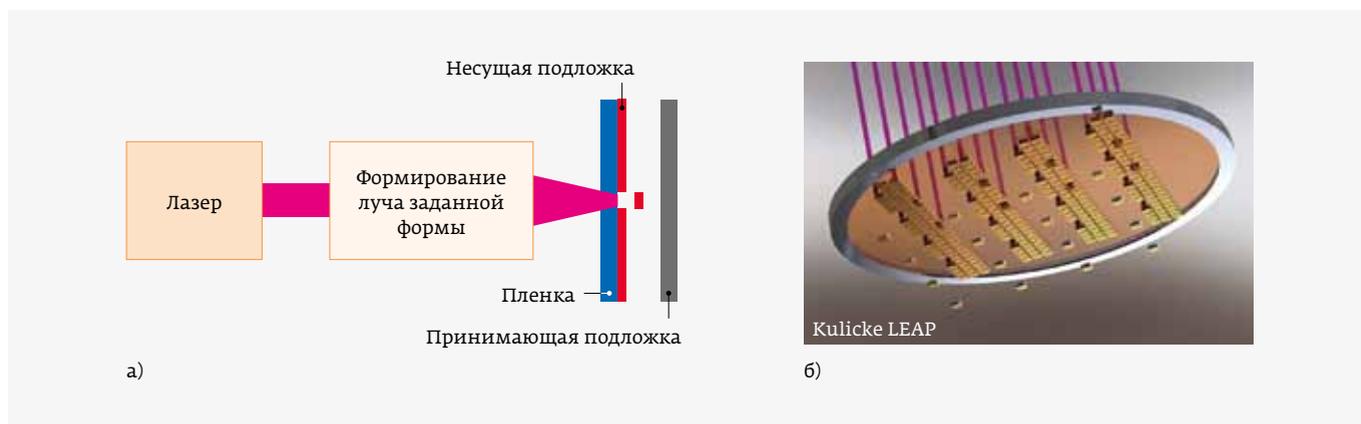
В качестве альтернативы, чтобы избежать сложностей процесса pick&place, были разработаны различные технологии, позволяющие осуществлять монтаж массива кристаллов микроLED за раз. На текущий момент из-за ограничения, связанного с размером пластины, используемой для роста светодиодов, данный метод применим в основном для создания микродисплеев, которые применяются в проекторах и служат экранами наручных смарт-часов.

Оборудование для pick&place не позволяет монтировать миллионы кристаллов микроLED 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, электростатическое взаимодействие, использование сил Ван-дер-Ваальса (табл. 1).

Технология лазерного переноса кристаллов – это процесс монтажа массива кристаллов, в котором лазерный луч вызывает отделение микроLED от их несущей подложки и переносит на принимающую подложку, как показано на рис. 4 [8]. Компания Kulicke & Soffa (K&S), эксклюзивный партнер «Остек-ЭК», расширила свои возможности в технологии сборки мини- и микроLED путем стратегического приобретения 100%-ной доли Uniqarta. Технология LEAP™ компании K&S позволяет монтировать около 1000 кристаллов за один лазерный импульс. Ожидается, что технология LEAP™ ускорит внедрение миниLED подсветки для классических дисплеев, а также станет базовым инструментом для самых передовых применений, связанных с разработкой и производством дисплейной техники с прямым излучением на микроLED.

**Таблица 1.** Некоторые технологии монтажа массива кристаллов

Методы	Компания/институт	Принцип	Скорость монтажа
Лазерный перенос (Laser lift-off)	Optovate, K&S (Uniqarta)	Лазер	1 000 за цикл / более 100 млн в час
Флюидика	Foxconn (eLux)	Гравитация и капиллярность	50 млн в час
Электростатический	Apple (LuxVue)	Электростатика	Нет информации
Эластомерная штамповка	X-Celeprint	Силы Ван-дер-Ваальса	1 млн в час
С рулона на рулон (Roll-to-roll)	KIMM/ EV Group	Рулонный штамп	10 тыс. в секунду / 36 млн в час



**Рис. 4.** Технология монтажа кристаллов при помощи лазера (LEAP – Laser-Enabled Advanced Placement): а – схема процесса; б – 3D-модель процесса

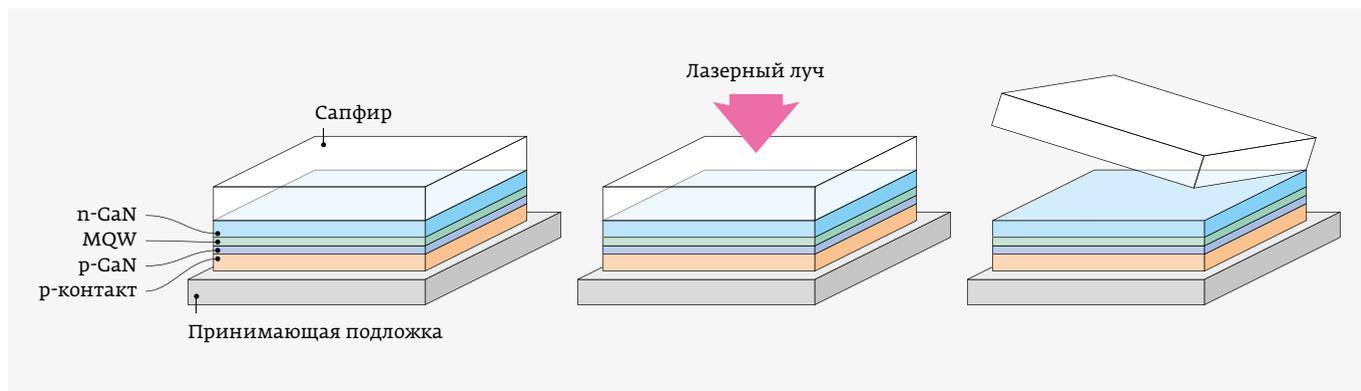
Облучение лазерным лучом приводит к взаимодействию света с веществом на границе раздела между несущей подложкой и кристаллами, в результате чего кристаллы отделяются от подложки и в то же время создается локальная механическая сила, которая толкает кристаллы к принимающей подложке. Межфазное взаимодействие 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 микроLED с сапфировой пластины на принимающую подложку. Лазерные технологии монтажа массива

кристаллов обладают высокой производительностью – свыше 100 млн кристаллов в час [9].

Технология флюидики базируется на использовании 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 микроLED соединяются с драйвером. Компания eLux, принадлежащая Foxconn, разрабатывает свои методы жидкостной сборки для монтажа массива кристаллов микроLED с производительностью более 50 млн кристаллов в час [11].

LuxVue, компания, принадлежащая Apple, разработала технологию монтажа, которая работает по электростатическому принципу, использующему притяжение противоположных зарядов для захвата микроLED [12]. Монтаж массива кристаллов микроLED осуществляется при помощи массива электростатических головок, к которым



**Рис. 5.** Схема процесса LLO для отслаивания пленки GaN от сапфировой пластины



Рис. 6. Схема процесса флюидной самосборки

подается напряжение для захвата, размещения и нагрева (рис. 7).

Компания X-Celeprint разработала технологию микросборки с помощью эластомерного штампа для монтажа массива кристаллов микроLED, как показано на рис. 8 [13]. Процесс начинается с подготовки подложки-донора, на которой формируются массивы микроLED. Затем мягкий эластомерный штамп контактирует с микроLED. Они прикрепляются к штампу и демонтируются с подложки-донора силой Ван-дер-Ваальса, поскольку адгезия штампа выше. Затем массив микроLED монтируется на принимающую подложку и отслаивается от штампа.

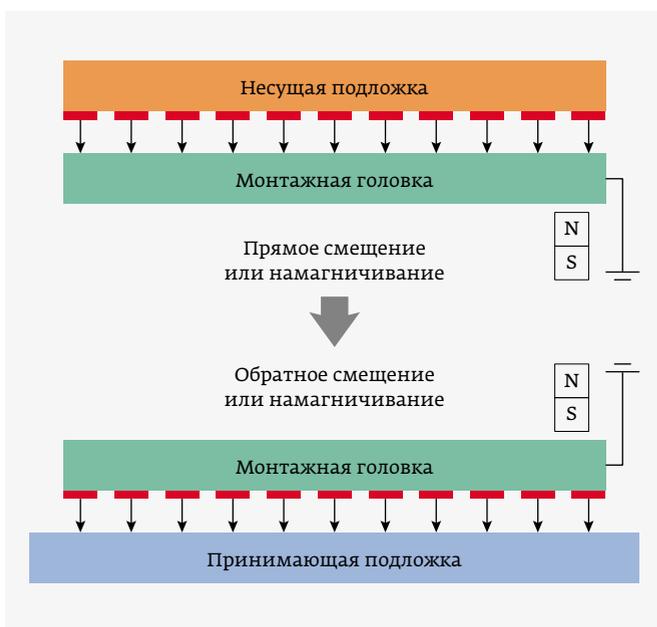


Рис. 7. Схема процесса монтажа кристаллов при помощи электростатики

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 микроLED с размерами кристаллов менее 100 мкм и толщиной до 10 мкм, как показано на рис. 9. Процесс может обеспечить производительность до 10 тыс. 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;

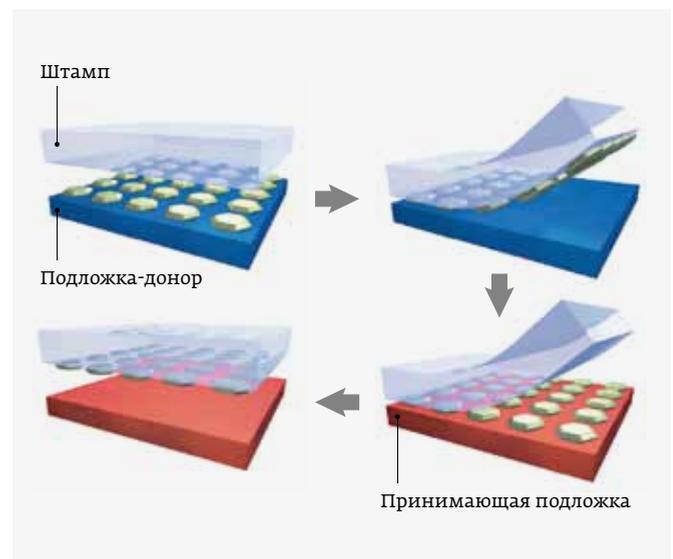


Рис. 8. Схема процесса монтажа кристаллов с помощью эластомерного штампа

- на втором этапе микроLED снимаются с несущей подложки, помещаются на временную подложку и соединяются с TFT с помощью пайки;
- на последнем этапе массив соединенных между собой микроLED и TFT накатывается на принимающую подложку, чтобы сформировать микроLED-дисплей с активной матрицей.

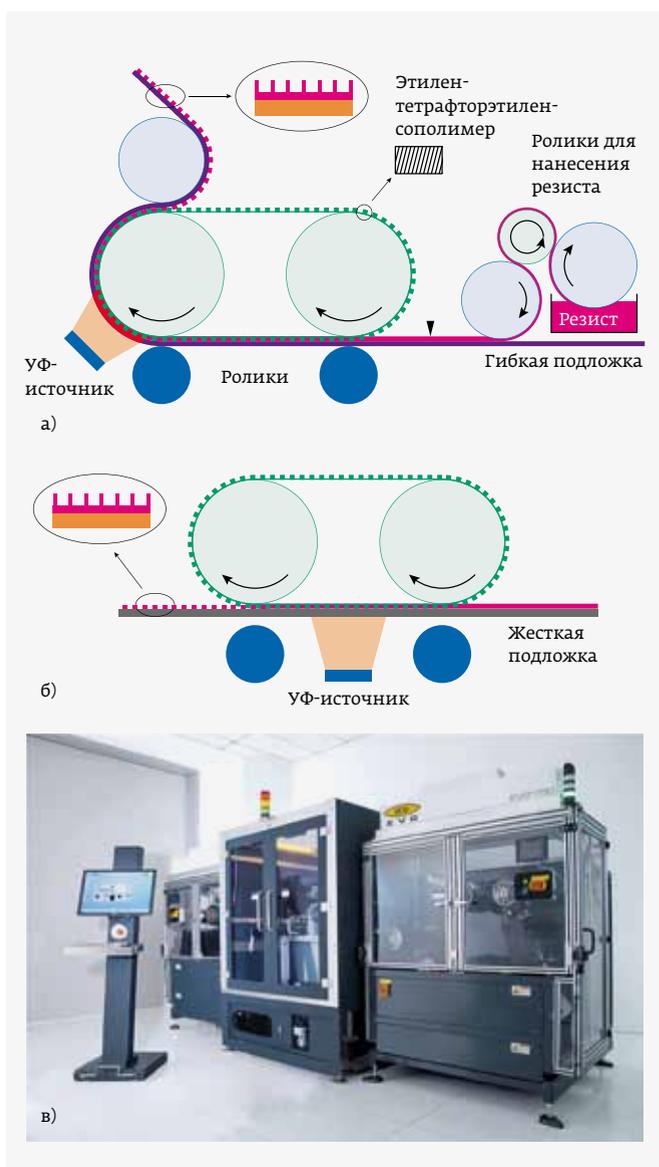
Компания EV Group (EVG) в 2013 году представила первую в отрасли машину EVG 570R2R для рулонной наноимпринтной литографии. Данное оборудование было

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 микроLED. Главный из них – количество годных пикселей дисплея. Должно быть не более пяти битых пикселей на полноцветном RGB-дисплее с высоким разрешением (FHD) (1920 × 1080 пикселей); так как каждый микроLED 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 микроLED [16]. Еще пример: в пассивной матрице с массивом микроLED после flip-chip-монтажа кристаллов GaN микроLED на кремний с общим 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 микроLED 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 микроLED-элементов для каждого пикселя. Однако эффективность дублирования в любом случае зависит от начального уровня дефектности. Если выход составляет 99,99%, удвоение количества микроLED может уменьшить количество битых пикселей с 5 тыс. до 5 пикселей на дисплее FHD. Но если выход составляет всего 99,9%, то количество битых пикселей будет снижено до 500 [17]. При этом если удваивать количество микроLED, 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 микроLED.



**Рис. 9.** Рулонная наноимпринтная литография: а – схема процесса рулонной наноимпринтной литографии (R2RNIL) на гибкую подложку; б – схема процесса рулонной наноимпринтной литографии (R2PNIL) на жесткую подложку; в – фотография системы EVG 570R2R для рулонной наноимпринтной литографии

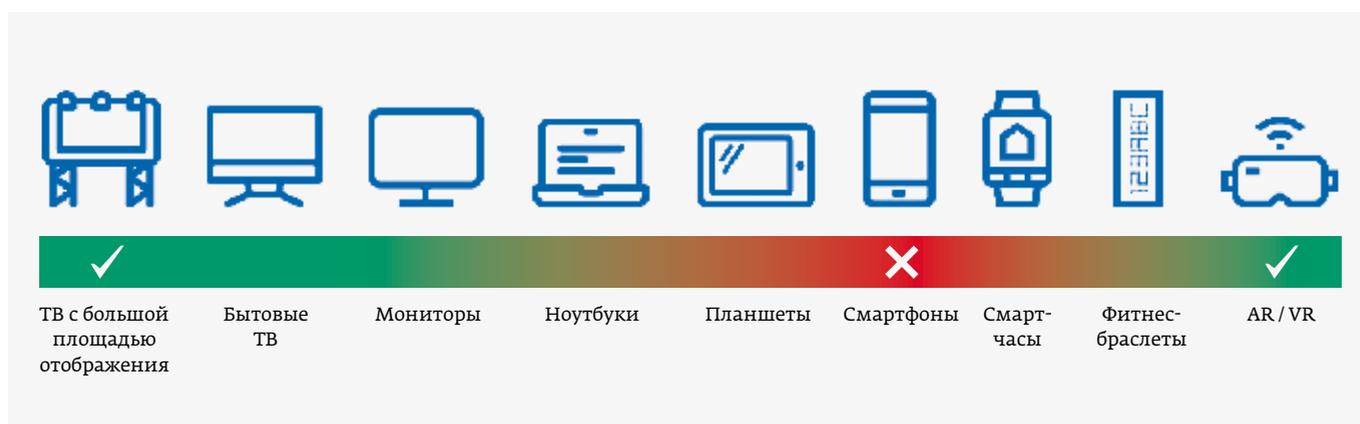


Рис. 10. Фактическая конкурентоспособность технологии микроLED на 2021 год

Реализация массового производства микроLED-дисплеев зависит от их конкурентоспособности по стоимости по сравнению с LCD- и OLED-дисплеями. Стоимость микроLED-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 микроLED-дисплеи расширят рынок сбыта, и в ближайшем будущем их производство начнет быстро расти. Некоторые считают, что значительный скачок и фактическое массовое производство микроLED-дисплеев произойдет не раньше 2030 года или около того. Некоторые настроены более оптимистично и считают, что массовое производство начнется примерно через 3–5 лет.

\* \* \*

В заключение можно отметить, что основными преимуществами микроLED являются высокие яркость, КПД и срок службы.

Высокий КПД имеет важное значение, но в основном для носимых устройств. Для стационарных мониторов и телевизоров требования к КПД значительно ниже. По мере того, как кристаллы LED становятся меньше, их КПД растет. Анализ общего КПД систем отображения показывает, что применение микроLED 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 микроLED не будет, как на OLED-дисплеях.

Несмотря на узкие места, разработчики, мотивированные большим потенциалом технологии, с оптимизмом смотрят на производство микроLED-дисплеев. Ожидается, что полноценная коммерциализация микроLED-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 микроLED и другими технологиями, оборудованием, оснасткой и инструментами для производства микроэлектроники, можно обратиться в компанию «Остек-ЭК» (тел.: +7495 877-44-70, e-mail: micro@ostec-group.ru).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Global Micro Light Emitting Diode (LED) Market – Industry Trends and Forecast to 2029. – <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-micro-led-market>
2. Yole Developpement says rate of MicroLED patent submission is rising sharply. – <https://www.microled-info.com/yole-developpement-says-rate-microled-patent-submission-rising-sharply>
3. **Radauscher E. J., Meitl M., Prevatte C., Bonafede S., Rotzoll R., Gomez D., Moore T., Raymond B., Cok R., Fecioru A. et al.** Miniaturized LEDs for flat-panel displays // Proceedings of the SPIE, San Francisco, CA, USA. 2017. V. 10124. 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. P. 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. 2004. V. 85. PP. 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. 2018. V. 215. 1700508.
  7. **Lee V. W., Twu N., Kymissis I.** Micro-LED technologies and applications // Information Display. 2016. V. 32. PP. 16–23.
  8. **Delaporte P., Alloncle A.-P.** Laser-induced forward transfer: A high-resolution additive manufacturing technology // Opt. Laser Technol. 2016. V. 78. PP. 33–41.
  9. **Marinov V. R.** Laser-Enabled Extremely-High Rate Technology for  $\mu$ LED Assembly. – SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 49. 2018. PP. 692–695.
  10. **Saeedi E., Kim S. S., Parviz B. A.** Self-assembled inorganic micro-display on plastic. In Proceedings of the 2007 IEEE 20<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Hyogo. Japan. 2007.
  11. **Schuele P. J., Sasaki K., Ulmer K., Lee J.-J.** Display with surface mount emissive elements. Patent No. 9,825,202, 11 Nov. 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. **Meitl 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 // Nature Materials. 2006. V. 5. PP. 33–38.
  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. 2009. V. 3. PP. 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. 2013. V. 23. PP. 2024–2032.
  16. **Xie E., Stonehouse M., Ferreira R., McKendry J. J. D., Herrnsdorf J., He X., Rajbhandari S., Chun H. et al.** Design, Fabrication, and Application of GaN-Based Micro-LED Arrays With Individual Addressing by N-Electrodes // IEEE Photonics J. 2017. V. 9. 7907811.
  17. **Henry W., Percival C.** ILED Displays: Next Generation Display Technology. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 47. 2016. PP. 747–750.
  18. Why microLED displays may take longer than expected to reach the market. – <https://www.microled-info.com/why-microled-displays-may-take-longer-expected-reach-market>

**ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ 2022**

15-я специализированная выставка электроники и информационных технологий для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта [www.publictransportweek.ru](http://www.publictransportweek.ru)

**11-13 МАЯ / МОСКВА / ЦВК ЭКСПОЦЕНТР**

WWW.E-TRANSPORT.RU