

Д. т. н. В. М. СОРОКИН, к. т. н. Ю. В. КОЛОМЗАРОВ,
к. х. н. Н. П. МАСЛАК-ГУДИМА, М. А. МИНЯЙЛО

Украина, г. Киев, Ин-т физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: vsorokin@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
29.08 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. ПРОХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ — ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА

Успехи в развитии современных OLED- и PLED-устройств в ближайшие 5—10 лет приведут к созданию приборов с энергетической эффективностью более 100 лм/Вт и сроком службы до 100 000 часов.

Развитие современных плоских средств отображения информации с высокой разрешающей способностью в последние годы привело к доминированию на рынке жидкокристаллических (ЖК) дисплеев различного назначения, отличающихся высоким сроком службы, малой массой, достаточными углами обзора, низким энергопотреблением, хорошей цветопередачей. Однако несмотря на ряд преимуществ таких дисплеев, они являются *пассивными* приборами (не излучают свет) и работа их в режиме «на просвет» требует систем подсветки, которые в настоящее время состоят из компактных люминесцентных ламп с устройствами формирования равномерного по площади дисплея светового потока.

Альтернативой жидкокристаллическим средствам отображения информации являются появившиеся в последние годы плоские *активные* (излучающие свет) дисплеи на основе органических светоизлучающих структур (OLED). Привлекательность и существенный прогресс в развитии таких структур объясняются рядом их особых преимуществ, которые позволяют использовать их не только в средствах отображения информации, но и в элементах подсветки жидкокристаллических дисплеев, а также и как источники освещения (в недалеком будущем). Например, высокоинформативные дисплеи на OLED-структурах отличаются малой толщиной (до 1 мм), высоким контрастом, широким углом обзора, низким потреблением энергии, возможностью формирования гибких экранов. В то же время преимуществом их как элементов подсветки ЖК-дисплеев основывается на возможности создания равномерно излучающей белой свет тонкопленочной структуры сравнительно большой площади с низким энергопотреблением. Наконец, при развитии технологии производства OLED-структур и повышении их энергетической эффективности (более 70 лм/Вт), а также с увеличением срока службы до 50 000 часов, появляется возможность замены низкоэффективных ламп накаливания на тонкопленочные излучающие свет панели, а также воз-

можность создания новых принципов построения плоских осветительных систем.

В данной работе приводится анализ современного состояния развития органических светоизлучающих структур, а также анализируются конструкции, материалы и технологии, обеспечивающие возможность создания OLED-дисплеев и других устройств с органическими светоизлучающими элементами.

Структуры и свойства органических светоизлучающих приборов

Органические светоизлучающие структуры можно разделить на два класса: **OLED** — органические молекулярные светоизлучающие диоды (созданные из малых органических молекул — низкомолекулярных соединений) [1] и **PLED** — полимерные светодиоды (на основе высокомолекулярных органических соединений) [2]. В основе работы обеих светоизлучающих структур лежит возможность некоторых органических соединений излучать свет под воздействием электрического тока.

Электронные процессы, происходящие в органических светоизлучающих устройствах, включают инжекцию электронов и дырок из электродов, транспорт их к активному излучающему слою и рекомбинацию с образованием экситонов, часть из которых распадается с излучением фотонов [3]. Основной характеристикой, отражающей эффективность процесса превращения электрической энергии в излучение, является квантовый выход люминесценции — число фотонов, приходящееся на каждую инжектированную пару «электрон — дырка» [4]. Типичные значения внешней квантовой эффективности для современных органических светоизлучающих структур составляют 8—14% [4—20].

На **рис. 1** показаны структуры двух излучающих свет ячеек на органических молекулярных материалах и высокомолекулярных органических соединениях.

Дисплеи, использующие рассмотренные структуры, классифицируются следующим образом:

- монохромные и цветные дисплеи с пассивной матричной адресацией;
- цветные дисплеи с активной матричной адресацией с использованием RGB излучающих элементов;
- цветные дисплеи с активной матричной адресацией и излучающей структурой белого цвета и пассивными цветными фильтрами.

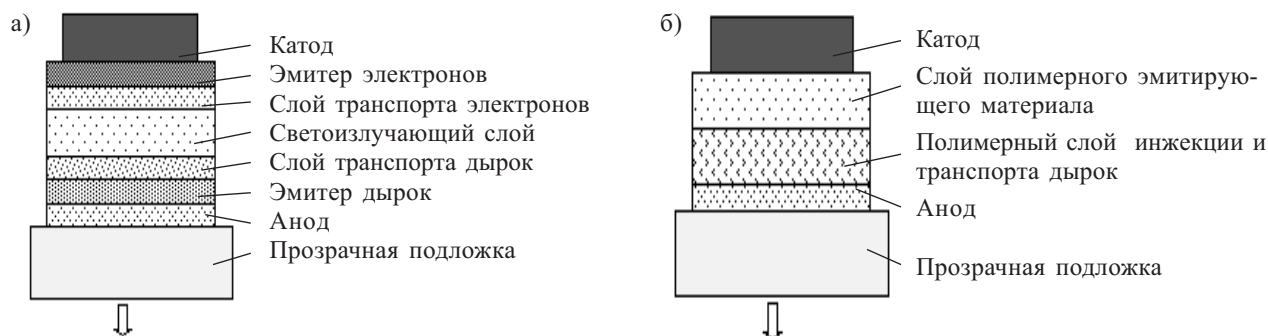


Рис. 1. Типичные структуры OLED (а) и PLED (б) излучающих элементов

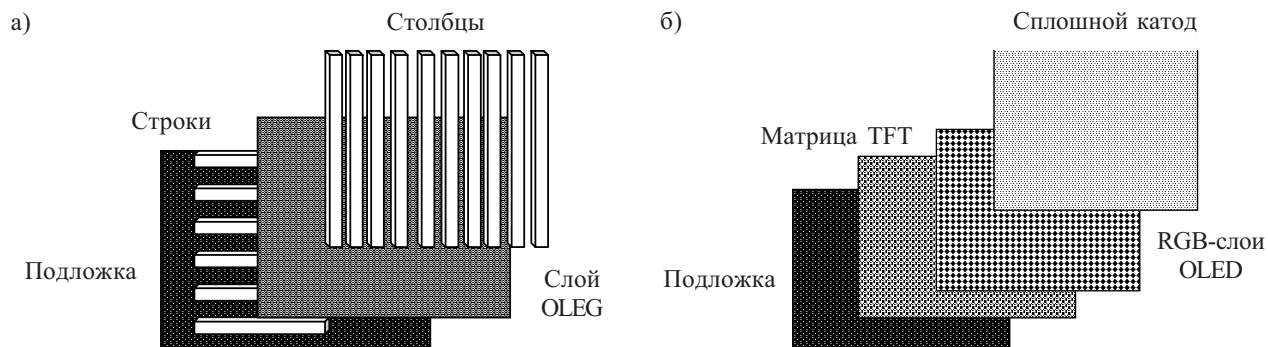


Рис. 2. OLED-дисплеи с пассивной (а) и активной (б) матричной адресацией

Представленные на **рис. 2** OLED-дисплеи с пассивной и активной (TFT) матричной адресацией отличаются друг от друга более широкими функциональными возможностями вторых благодаря их большей разрешающей способности, высоким значениям яркости изображения, контраста и, как следствие, высокому качеству полноцветных изображений. По этой причине дисплеи с пассивной матричной адресацией производятся только в монохромном варианте и применяются как индикаторные устройства в несложных и недорогих изделиях [4]. Для полноцветных дисплеев с активной матричной адресацией излучающая структура, показанная на рис. 2, б, представляет собой набор чередующихся RGB OLED-элементов. Отображение цветной информации в таких приборах осуществляется после установления тонкопленочных транзисторов активно-матричной структуры в открытые и закрытые состояния, соответствующие отображаемой информации, и подачи на общий электрод дисплея (сплошной катод) управляющего потенциала.

Еще одной разновидностью конструкции OLED-дисплея является структура, показанная на **рис. 3**. Ее отличие от предыдущей заключается в том, что излучающая структура представляет собой сплошную пленку OLED с белым цветом свечения. Для получения полноцветного изображения на пути выхода света из структуры устанавливаются пассивные RGB-фильтры, аналогичные тем, что устанавливаются в цветных ЖК-дисплеях.

Следует отметить, что развитию OLED-дисплеев с активной матричной адресацией дали толчок современные технологии жидкокристаллических дисплеев с активной матричной адресацией (TFT LCD) благодаря практически полной совместимости тех-

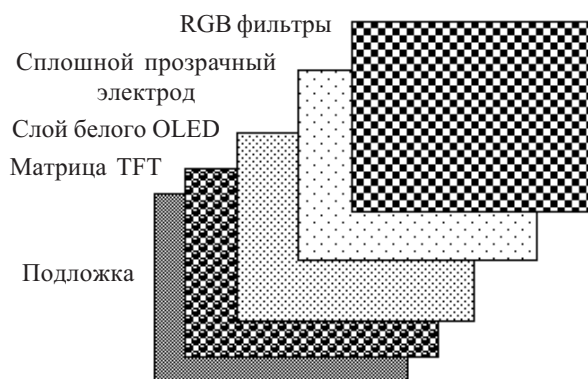


Рис. 3. OLED-дисплей с активной матричной адресацией, сплошным белым излучателем и пассивными RGB-фильтрами

нологий создания активно-матричных структур для ЖК- и OLED-дисплеев.

Органические светоизлучающие структуры для подсветки ЖК-дисплеев, а в недалеком будущем, возможно, — и для систем освещения, можно классифицировать следующим образом:

- структуры на основе RGB-метода создания белого цвета (**рис. 4, а**);
- структуры, у которых белый цвет формируется за счет преобразования ультрафиолетового (УФ) излучения одного органического слоя в белое излучение другого органического широкополосного люминофора (**рис. 4, б**).

Последние структуры являются не только перспективными для систем подсветки ЖК-дисплеев, но и могут быть основой создания плоских источников освещения, поскольку в настоящее время уже

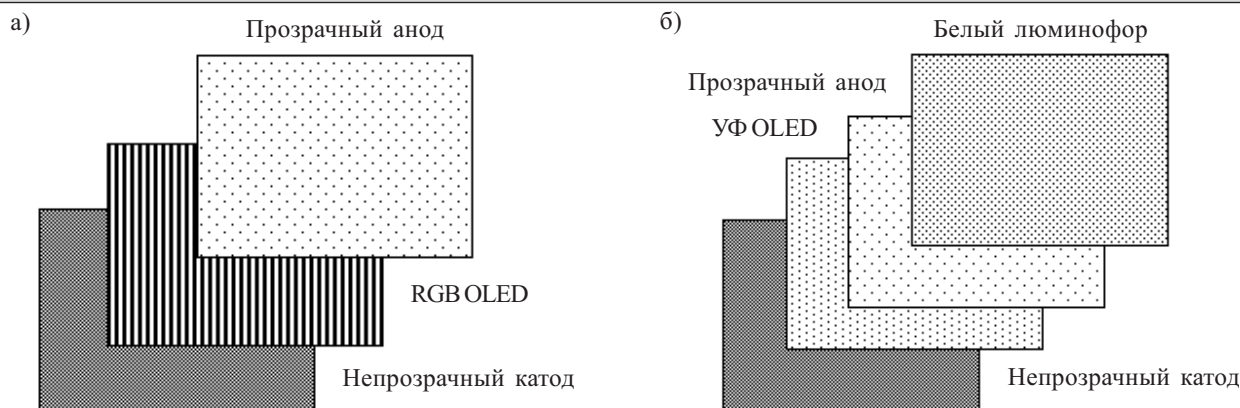


Рис. 4. Структуры плоских белых излучателей с RGB-методом формирования белого цвета (а) и на основе двойного преобразования УФ-излучения в белое (б)

достигнут внешний квантовый выход ультрафиолетовых OLED-структур порядка 4,2% на длине волны 380 нм, а яркость белого света в такой системе достигает 5000 кд/м² при стабильных цветовых координатах ($x=0,33$, $y=0,31$) [5].

Материалы

Материалы для OLED- и PLED-структур можно классифицировать в зависимости от их назначения: для создания омических контактов, для эффективного транспорта дырок или электронов в активную область структуры, для излучения света, для блокировки избыточного количества инжектируемых электронов или дырок.

Для создания эффективных органических излучающих структур используемые материалы должны удовлетворять следующим требованиям [6]:

- материалы активных слоев должны обладать высокими значениями квантового выхода люминесценции;
- материалы транспортных слоев должны обладать электронной или дырочной проводимостью;
- все используемые материалы должны легко наноситься на подложку без образования агрегатов и кристаллитов, а также быть совместимыми с другими компонентами излучающей структуры;
- иметь достаточную химическую и термическую устойчивость;
- обеспечивать технологичность нанесения на жесткие и гибкие подложки для получения сплошных гладких пленок без кристаллических включений.

Приборы на электролюминесцентных OLED- и PLED-структурах характеризуются комплексом параметров, основными из которых являются яркость (кд/м²), эффективность люминесценции (лм/Вт), токовая эффективность (кд/А), спектр люминесценции, величина порогового напряжения люминесценции. Для обеспечения высокой светимости и эффективности, а также для достижения небольших рабочих напряжений, материал активного слоя должен обладать как электронной, так и дырочной проводимостью со структурой энергетических уровней, сходной с зонной структурой в полупроводниках. Такая аналогия достигается строением высшей занятой (НОМО) и низшей свободной (LUMO) молекулярной орбитали.

Энергетический интервал между НОМО и LUMO соответствует запрещенной зоне в полупроводнике и количественно отражает энергию фотонов при рекомбинации дырок и электронов в активном слое. При этом эффективность излучения в основном определяется квантовым выходом люминесценции и топологическими особенностями конструкции излучающего прибора.

Материалы активных и транспортных слоев

Материалы для активных слоев по химической природе можно разделить на два основных класса — сопряженные органические полимеры (такие как полифенилвинилен, полиэтилендиокситиофен, полистиренсульфонат) и металлорганические координационные соединения (например 8-гидроксихинолиналюминия, бензоксазолные и бензотриазольные комплексы Zn и Al, фосфоресцентные циклометаллатные комплексы Ir(III) и Pt(II)). Для улучшения рабочих параметров и характеристик OLED-приборов в излучающие структуры вводят ряд дополнительных слоев с четко детерминированными свойствами. Например, введение дополнительных слоев с электронной и дырочной проводимостью в OLED-структуру позволяет понизить рабочее напряжение и увеличить квантовую эффективность электролюминесценции.

В качестве материалов для слоев переноса электронов и слоев переноса дырок используют органические соединения, содержащие в своем составе сопряженные ароматические или гетероциклические фрагменты. Материалами для переноса электронов являются многие комплексы металлов, производные оксадиазола, триазола, перилентетракарбоновой кислоты, силола, полифенилхиноксалин и другие, для переноса дырок — производные трифенилдиамина, CuPc, BMA-3T, TPTE, MTDATA, производные триазинстильбена, пиразолина, поливинилкарбазол, дифениламинофенилфлуорен, нафтилендиамин и др. Свойства переноса заряда сильно зависят от структуры молекул. Например, в зависимости от заместителей (электронодонорные или электроноакцепторные) органические молекулы (например оксадиазолы) могут быть материалами для переноса как дырок, так и электронов.

Поскольку к настоящему времени в литературе имеется большое количество обзоров и оригиналь-

ных работ по материалам для органических излучающих структур, в данной работе сделана попытка обобщить результаты исследований в этом направлении за 2007—2008 гг. (по данным международных дисплейных конференций Eurodisplay-2007, SID-2007 и SID-2008). Примеры наиболее существенных достигнутых результатов представлены ниже.

Создание полноцветных дисплеев на структурах ITO(45 нм)/PEDOT-PSS(60 нм)/interlayer(20 нм)/LEP(60—75 нм)/BaO(4 нм)/Al(200 нм) стало возможным после определения причин и механизмов деградации, а также создания способов их устранения для светоизлучающих полимеров. Это позволило обеспечить значения токовой эффективности (кд/А) и срока службы (тыс. часов) 10/89, 15/79 и 9,9/10 для красного, зеленого и синего излучателей, соответственно [7].

Применение водорастворимого термоустойчивого проводящего полимера, кислотность и гидрофобность которого можно варьировать, позволило получить низкий инжекционный барьер и однородный контакт между буферным слоем и инжекционным слоем в PLED-устройстве и обеспечить эффективность излучения порядка 10—11 кд/А [8].

Частичное блокирование избыточных электронов в многослойной PLED-структуре за счет формирования вблизи анода тонкой (≈ 20 нм) пленки сетчатого полимера позволило повысить токовую эффективность устройства (зеленый цвет свечения) до 40 кд/А при напряжении 9 В [9].

Создание PLED-структуры с использованием малых органических молекул и фосфоресцентных гость-примесей, которую можно наносить на подложку методом струйной печати, позволило реализовать токовую эффективность 9 кд/А, время жизни 53 000 часов и яркость 500 кд/м² [10]. Таким же образом была создана структура PLED-устройства, в котором в качестве слоя инжектора дырок использовалась смесь проводящих полимеров поли(этилен-диокситиофен)/поли(стиренсульфокислоты) (PEDOT:PSS марок CLEVIOS PH 500 и CLEVIOS PH 510, отличающихся вязкостью) [11].

Несмотря на то, что металлоорганические координационные соединения в качестве электролюминесцентных материалов для OLED-структур хорошо известны [6] (типичным примером этого соединения является гидроксидинолат алюминия Alq_3 [1]), усовершенствование этих материалов, поиск эффективных транспортных и эмиссионных слоев, а также разработка новых технологий их нанесения привели к значительному повышению эффективности излучающих структур и увеличению их срока службы. Например, разработка достаточно сложной мультифотонной эмиссионной структуры с использованием флуоресцентных эмиттеров [12] позволила реализовать токовую эффективность 34 кд/А, эффективность люминесценции зеленых OLED до 130 лм/Вт, а белых — до 50 лм/Вт. При этом срок службы рассмотренных структур увеличен до 100 000 часов.

Введение новых фосфоресцентных материалов в структуру OLED, а также новых материалов для транспорта дырок и электронов, позволило увеличить время жизни OLED-устройства с белым цветом све-

чения до 100 000 часов при яркости 1000 кд/м² и внешней квантовой эффективности 13,8%. Примененные материалы позволили создать достаточно большие дисплеи с цветными фильтрами, а также использовать белые излучающие структуры в качестве источников света [13].

За счет введения фенила в структуру 4,4'-N,N'-дикарбазолбифенила, уменьшающего барьер инжекции электронов и улучшающего их подвижность, были синтезированы новые биполярные материалы, обеспечившие устойчивую люминесценцию OLED-устройства в зеленой области спектра с яркостью 1000 кд/м² и энергетической эффективностью 53 кд/А при добавлении комплексных соединений иридия $Ir(ppu)_3$ [14].

Исследование структур новых материалов для эмитирующих слоев CB-201, -202, -203, -301 позволило получить внешнюю квантовую эффективность 7,18%. Структуры OLED-устройств на новых материалах с различным спектром свечения обеспечивали время жизни красного материала 100 000 ч при яркости 11 кд/м², зеленого — 100 000 ч при яркости 21 кд/м², голубого — 12 000 ч при яркости 7 кд/м² [15]. Электронные уровни голубых материалов обычно не совпадают с шириной запрещенной зоны других уровней, что приводит к несовпадению баланса электронов и дырок и, как следствие, к низкой эффективности электролюминесценции. Полученный новый трисциклометаллатный иридиевый(III) фосфоресцентный комплекс обеспечил высокую эмиссионную способность при комнатной температуре (для голубого спектра излучения достигнута рекордная внешняя квантовая эффективность — 8,8%) [16]. Такие комплексы могут быть очень перспективны при создании белых OLED.

Внешняя квантовая эффективность 12%, энергетическая эффективность 17 лм/Вт, яркость 1000 кд/м² при напряжении 4,5 В достигнута для фосфоресцентного OLED-устройства, использующего новую композицию излучающего слоя, состоящую из материала с широкой запрещенной зоной и органометаллического комплекса иридия как примеси [17].

Для белых OLED-устройств достигнута внешняя квантовая эффективность 13,1%, энергетическая эффективность 28,7 лм/Вт [18] при использовании сложной 13-слойной структуры, эмитирующими материалами которой были три вещества: 4''-(2,2-дифенилвинил)-1-[4-(N,N-дифениламино)-стирил]-терфенил (*PVAS-tPh*) — как синий эмиттер, фас-трис (2-фенилпиридин) иридия(III) ($Ir(ppu)_3$) — как зеленый эмиттер и бис(5-бензоил-2-фенилпиридинато-С,N) иридия(III) ацетилацетонат ($Bzppu)_2Ir(III)acac$ — как красный эмиттер.

Материалы электродов

Основными требованиями, предъявляемыми к аноду, являются хорошая прозрачность в видимом диапазоне спектра, хорошая проводимость и соответствие работы выхода положению НОМО вещества активного слоя. Наиболее полно этим требованиям для большого числа веществ удовлетворяет тонкая (≈ 100 нм) пленка из смеси оксидов индия и олова (ITO), обычно наносимая на стеклянную подложку с последующим нанесением остальных слоев OLED-прибора, послед-

ним из которых является слой алюминиевого (с примесями других металлов) катода. Оригинальная конструкция «инверсного» OLED-прибора, в которой алюминиевый катод наносился на стеклянную подложку, а анод из окислов цинка — на многослойную LED-структуру, позволила увеличить токовую эффективность с 34 до 42 кд/А для зеленого излучателя и с 15 до 20 кд/А для красного [19].

Для создания гибких дисплеев вместо ИТО на подложку методом газофазной полимеризации наносился полимер — триариламин, что позволило достичь яркости OLED-устройства до 1000 кд/м², энергетической эффективности красного излучателя 2,2 кд/А, зеленого — 5,5 кд/А, синего — 1,8кд/А и белого — 1,8 кд/А [20]. Нанесенные таким же методом нанопленки (3,4-этилендиокситиофена) — **PEDOT** (80—100 нм) обладали высокой прозрачностью (около 80%) и низким поверхностным сопротивлением (до 100 Ом/□) [21].

В качестве катода в OLED-приборах обычно выбирается металл с работой выхода, близкой или несколько меньшей глубины положения LUMO вещества активного слоя. Для большинства пригодных в качестве активного слоя веществ эта глубина составляет от 2 до 3 эВ. Все металлы с работой выхода в этом диапазоне (например кальций, барий, иттербий) являются химически активными. Как следствие, катодные слои из этих металлов чувствительны к воздействию окружающей среды и могут вступать в реакцию с материалами органических слоев, что вызывает нестабильность показателей рабочих характеристик OLED и ограничивает их надежность. Использование устойчивых к воздействию внешней среды материалов, таких как Al и In, ограничено из-за относительно высокого значения работы выхода (около 4,3 эВ), что приводит к повышению рабочего напряжения, уменьшению квантовой эффективности и времени жизни OLED. Наиболее подходящими и применяемыми в настоящее время материалами катодов являются сплавы Mg:Ag (10:1) и Al:Li (99:1), а также комбинации различных слоев: LiF/Al, CsF/Al, LiF/Ca/Al.

При создании прозрачных катодов (для прозрачных OLED-структур) использовали, например, полупрозрачный катод Ca/Ag с дополнительным пассивирующим слоем CsCl, что позволило достичь коэффициента пропускания 90% на длине волны 550 нм [22].

PLED-устройства нуждаются в высококачественной герметизации во избежание их расслоения под действием влаги и обесцвечивания под действием УФ-излучения. Использование в качестве катода лантаноидов (тулий, иттербий, самарий) позволяет не герметизировать структуру OLED дополнительно и получать свечение до 10 000 кд/м² при напряжении до 15 В [23].

Во избежание деградации и разрушения PLED-дисплея под действием влаги и кислорода вся структура может быть герметизирована прозрачной многослойной пленкой из органико-неорганического материала — смеси органических и неорганических компонентов [24].

Технологии OLED/PLED-производства

В данном разделе сделана попытка обобщить результаты технологических разработок по созданию

OLED- и PLED-устройств за последние 2—3 года. При этом основное внимание уделено технологиям дисплеев на органических структурах.

Поскольку технологии производства OLED- и PLED-дисплеев явились продолжением технологий, развитых в производстве жидкокристаллических средств отображения информации, технологии нанесения материалов анодов и катодов являются сходными. Что касается технологии нанесения органических структур (транспортных, блокирующих, светоизлучающих слоев), то она не только постоянно совершенствуется, но также и пополняется новыми решениями и методами.

В работе [25] предложена технология переноса органического вещества с донорской стеклянной подложки на подложку для дисплея со сформированной матрицей активных транзисторов. Применение лазерных технологий было впервые предложено компанией 3M [26]. Такая технология была названа **LITI** (laser induced thermal imaging). Основная идея этой технологии заключается в переносе органического слоя, нанесенного на донорскую подложку, на сформированные на подложке дисплея активно-матричные структуры под непосредственным действием лазерного облучения. Другой лазерный процесс был предложен специалистами Kodak. Органический материал переносился с донорской пленки на подложку с активно-матричными структурами методом сублимации [27]. Преимуществом этого процесса является то, что в нем используются те же материалы, что и в традиционной технологии напыления органических слоев в вакууме через металлическую маску. Предложенная в [25] технология отличается тем, что сплошной слой органического материала сначала наносился на стеклянную подложку-донор с нанесенным металлическим светопоглощающим слоем, затем подложка-донор и подложка с активно-матричными структурами приводились в непосредственное соприкосновение, помещались в вакуум, и затем производился процесс переноса органического материала с подложки-донора на активно-матричную структуру методом лазерной сублимации. Преимущества процесса — нанесение органических материалов в вакууме, высокая точность, низкая себестоимость, возможность повторного использования подложки-донора.

Еще одну перспективную лазерную технологию предложили специалисты Corporate R&D Center, Samsung SDI Co. LTD, Корея [28]. Основная идея этой технологии заключается в том, что на подложке-доноре между самой подложкой и органическим материалом располагается специальный слой из материала с большим значением коэффициента термического расширения. При локальном нагреве лазерным излучением этот слой увеличивает свой объем, за счет чего на активно-матричной подложке в этом месте осуществляется перенос органического материала. Кроме того, в работе предложен оригинальный подход к формированию синего излучающего слоя: после нанесения зеленого и красного излучающих элементов синий наносится сплошным слоем, накрывая зеленые и красные эмиттеры и являясь для них слоем, блокирующим дырки. При этом не происходит

высвечивания голубого за красным и зеленым. Такая технология названа **BCL** (blue common layer). В результате таких технологических новшеств был изготовлен LITI OLED-дисплей с высокой стабильностью. Срок службы такого дисплея формата QVGA с диагональю 2 дюйма составил более 20 000 часов при яркости белого 150 кд/м².

Дальнейшее усовершенствование лазерной технологии было предложено в [29]. Этот метод также базируется на технологии LITI, однако отличие состоит в том, что вокруг каждого активно-матричного пиксела формируется выступающий над плоскостью подложки ограничивающий слой. Когда в вакууме приводятся в соприкосновение подложка-донор с нанесенными светопоглощающим и органическим слоями для переноса, подложка-донор опирается на ограничивающий слой. В этом случае увеличивается точность и качество переноса органического материала с подложки-донора на подложку дисплея при освещении лазерным излучением.

Важной проблемой органических светодиодных дисплеев является также увеличение выходного светового потока. Эта проблема может быть решена как путем создания новых высокоэффективных материалов для эмиттеров, так и введением специальных конструктивно-технологических элементов. Авторы [30] предложили вводить в структуру органических светодиодов специальным образом сформированные отражающие элементы в виде микропузырьков. Такой слой микропузырьков формировался методом фотолитографии с шагом 9 мкм. Высота микропузырьков изменялась от 0,7 до 2,2 мкм. Транспортные слои и светоизлучающий слой формировались из материалов с малыми размерами молекул. Применение таких структур микропузырьков позволило изготовить дисплей с диагональю 20,8 дюйма, с информационной емкостью 1280 RGB × 768 пикселей, светоизлучающий слой которого наносился методом струйной печати. Таким методом удалось повысить выходной световой поток в 1,4—1,7 раза.

Наряду с созданием новых технологий изготовления полноцветных OLED-дисплеев, дальнейшее развитие получают также и широко используемые в настоящее время технологические приемы нанесения полимерных материалов. Одной из таких технологий является технология струйной печати. Авторы [31] считают, что производство высококачественных полноцветных PLED-дисплеев с использованием технологии струйной печати требует очень точного нанесения капель органических веществ в строго определенные места активно-матричной подложки. Последние разработки в этой области существенно повысили точность нанесения органических веществ, что позволило создавать PLED-дисплеи с повышенной разрешающей способностью. Для производства высоко разрешающих (160—200 пикселей на дюйм) PLED-дисплеев необходимо обеспечить попадание капельки органического вещества с точностью до 5 мкм. Высококачественные печатающие головки обычно имеют угловой разброс вылета капли до 10 миллирадиан, что соответствует ошибке 3 мкм при расстоянии 300 мкм от печатающей головки до подлож-

ки. В результате максимальная ошибка позиционирования печатающей головки для всех печатающих сопел составляет ±3 мкм.

Современные OLED-дисплеи становятся все более тонкими и легкими по сравнению с другими видами плоских дисплеев. Снижается их энергопотребление и стоимость, возрастает контраст, достигнуты рекордно широкие углы обзора, высокая скорость смены информации. Однако OLED-дисплеи чрезвычайно чувствительны к влажности и наличию кислорода, который может потенциально сократить срок службы этих устройств. Чтобы защитить устройства от влажности или кислородной деградации, были разработаны специальные технологии герметизации готовых дисплеев [32—35]. Авторы [32] представили разработанный низкотемпературный CVD-процесс, который позволил нанести механически прочное теплостойкое герметизирующее покрытие как однослойное или как составную часть многослойного покрытия на OLED-дисплей. Жидкофазный материал (FAR2.2™) предварительно нагревался и испарялся из контейнера из нержавеющей стали. Парообразный FAR2.2™ проходил через каталитический реактор, в котором образовывались реакционноспособные радикалы, а затем транспортировался в вакуумную камеру, в которой конденсировался на охлажденной до температуры от 0 до -50°C подложке с образованием полимерной органической защитной пленки. Полученная полимерная пленка была готова к применению и не требовала дополнительных обработок, например отжига или обработки ультрафиолетовым излучением. Такая пленка была абсолютно чистой, не содержащей загрязнений в виде ионов металлов.

Пленка FAR2.2™ термостабильна, выдерживает нагрев до 425°C (температура ее плавления 485°C), на нее можно дополнительно наносить пленки состава SiO₂, SiO_xN_y или SiN_x. Температурный коэффициент расширения составляет величину $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Пути совершенствования OLED-технологий

Высокие темпы развития OLED-технологий, подтверждаемые рекордными темпами роста основных эксплуатационных параметров и характеристик дисплейной техники за последние 5 лет, объясняются ощутимыми результатами исследований и разработок в области новых технологий, материалов, элементов и конструкций органических светоизлучающих приборов. Для успешной конкуренции OLED-дисплеев с ближайшими по совокупности технических параметров и характеристик аналогами — ЖК-дисплеями — остаются первоочередными проблемы повышения срока службы, яркости, энергетической эффективности, технологичности и стоимости этих перспективных приборов. Эта конкуренция может усилиться благодаря тому, что жидкокристаллические приборы по своей физической природе не обладают рядом свойств, присущих OLED-структурам, — возможностью работать как активные излучающие структуры с широкими углами обзора и высоким контрастным отношением. Более того, поскольку ЖК-дисплеи требуют специальных систем подсветки, сверхтонкие OLED-плоские источники подсветки больших площадей могут ощутимо упростить системы подсветки для ЖК-дисплеев.

Есть все основания полагать, что решение комплекса технологических, материаловедческих, технических проблем при создании современных OLED- и PLED-устройств в ближайшие 5—10 лет приведет к созданию приборов с энергетической эффективностью более 100 лм/Вт и сроком службы до 100 000 часов. Реализация таких параметров позволит расширить область применения рассмотренных систем и создать в будущем уникальные плоские энергоэффективные органические осветительные системы нового поколения — источники света XXI века.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Tang C. W., VanSlyke S. A. Organic electro-luminescent diodes // *Appl. Phys. Lett.*— 1987.— Vol. 51, N 12.— P. 913.
2. Burroughes J. H., Bradley D. D. C., Brown A. R. et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // *Nature.*— 1990.— Vol. 347, N 6293.— P. 539—541.
3. Parker I. D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes // *J. Appl. Phys.*— 1994.— Vol. 75, N 3.— P. 1656.
4. Самарин А. OLED дисплеи: от мифов к реальности // *Компоненты и технологии.*— 2007.— № 2.— С. 116—127.
5. Mikami A., Mizuno Y., Takeda Sh. High efficiency ultraviolet light emitting organic devices and its application to white light source / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B I.— P. 215—218.
6. Кузьмина Н. П., Елисева С. В. Фото- и электролюминесцентные свойства координационных соединений РЗЭ (III) // *Журн. неорг. химии.*— 2006.— Т. 51, № 1.— С. 80—86.
7. Yamada T., Tsubata Y., Sekine Ch., Ohnishi T. Recent progress in light-emitting polymers for full color OLEDs / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B I.— P. 404—406.
8. Huh D. H., Lee J. W., Kang E. S., Chae M. Novel buffer materials with high work function for efficient and stable organic light-emitting diodes / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 1985—1988.
9. Jin R., deMelio J. C., Bradley D. D. C. et al. Internal electric field for green phosphorescent polymer light emitting diodes with crosslinked interlayers / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B I.— P. 776—779.
10. Xia S., Cheon K.-O., Brooks J. J. et al. Printable phosphorescent organic light emitting devices / SID 2008 International Symp. Digest of Technical Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B I.— P. 295—298.
11. Elschner A., Jonas F., Kirchmeyer St., Lovenich W. PEDOT – based layers for TCO – substitution and hole-injection / SID 2008 International Symp. Digest of Technical Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B I.— P. 407—410.
12. Kido J. High performance OLEDs for displays and general lighting / SID 2008 International Symp. Digest of Technical Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B II.— P. 931—932.
13. Nishimura K., Kawamura M., Jinde Y. et al. The improvement of white OLEDs performance / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 1971—1974.
14. Jeon W. S., Park T. J., Park J. J. et al. New green phosphorescent host materials / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 1993—1996.
15. Kim S.-K., Park Y.-II, Park J.-W., Jaung J. Y. High quantum efficiency of new deep-blue EML materials in OLED / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 2001—2004.
16. Ren X., Liao L.-Sh., Giesen D. J. et al. Phosphorescence ranging from blue to red from tris-cyclometalated iridium (III) complexes and application to organic light-emitting devices / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 1997—2000.
17. Lee M.-T., Lin J.-Sh., Chu M.-T., Tseng M. R. Improved carrier transport into wide-bandgap host for low-voltage high-efficiency blue PHOLED / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 2014—2017.
18. Seo J. H., Seo J. H., Kim Y. K. et al. High-efficiency white organic light-emitting diodes using hybrid-spacer / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 2025—2027.
19. Noh J. K., Kang M. S., Kim J. S. et al. Inverted OLED / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B I.— P. 212—214.
20. Levermore P. A., Wang X., Chen I., Bradley D.D.C. Flexible OLEDs with anodes formed by vapour phase polymerization / SID 2008 International Symp. Digest of Tech. Papers. Los Angeles (California).— 2008.— Vol. XXXIX, B III.— P. 1989—1992.
21. Kim J.-Y., Kwon M.-H., Kim J.-T. et al. Polymer electrode and micro-patterning using PEDOT and its organic display applications / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. I.— P. 810—812.
22. Kim S. Y., Lee C., Ha M.-Y. et al. Tuning the emission characteristics of transparent organic light-emitting devices with CsCl passivation layer / *Proceeding of the 27 International Display Research Conference "Eurodisplay-2007"*.— Moscow (Russia).— 2007.— P. 383—386.
23. Illichev V., Katkova M., Konev A. et al. Comparative characteristics of rare-earth metals as cathodes for organic light-emitting diodes / *Proceeding of the 27 International Display Research Conference "Eurodisplay-2007"*.— Moscow (Russia).— 2007.— P. 396—399.
24. Chu X., Moro L., Visser R. J. Analysis of failure modes of multilayer thin film encapsulation of OLED devices and Ca films / *Proceedings of The 11-th International Display Workshops IDW'04.*— Niigata (Japan).— 2004.— P. 1427—1428.
25. Urabe T., Sasaoka T., Tatsuki K., Takaki J. Technological evolution for large screen size active matrix OLED display / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. I.— P. 161—164.
26. Spindler J. P., Hatwar T. K., Miller M. E. et al. Lifetime- and power-enhanced RGBW displays based on white OLEDs / SID 2005 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Boston (Massachusetts).— 2005.— Vol. XXXVI, B. I.— P. 36—39.
27. Lee S. T., Lee J. Y., Kim M. H. et al. A new patterning method for full color polymer light-emitting devices: laser induced thermal imaging (LITI) / SID 2002 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Boston (Massachusetts).— 2002.— Vol. XXXIII, N II.— P. 784—787.
28. Lee S. T., Suh M. C., Kang T. M. et al. LITI (Laser induced thermal imaging) technology for high-resolution and large-sized AMOLED / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. II.— P. 1588—1591.
29. Hirano T., Matsuo K., Kohinata K. et al. Novel laser transfer technology for manufacturing large-sized OLED displays / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. II.— P. 1592—1594.
30. Okutani S., Kamiura N., Sano H. et al. A 20.8-inch WXGA full color AMOLED display by integrating scattering reflector with micro-bumps / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. I.— P. 173—176.
31. Bruner S., Xu D., Phillips Ch. Drop landing accuracy improvements in inkjet printed OLED displays / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. II.— P. 1611—1612.
32. Chen C., Kumar A., Lee Ch. J. Low-temperature thermal CVD process for thin film encapsulation of organic light emitting devices / SID 2007 International Symp. Digest of Tech. Papers.— Long Beach (California).— 2007.— Vol. XXXVIII, B. II.— P. 1701—1704.
33. Lewis J. S., Weaver M. S. Thin-film permeation-barrier technology for flexible organic light-emitting devices // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.*— 2004.— Vol. 10, Issue 1.— P. 45—57.
34. Chwang A. B., Rothman A. B., Mao S. Y. et al. Thin film encapsulated flexible organic electroluminescent displays // *Applied Physics Letters.*— 2003.— Vol. 83, Issue 3.— P. 413—415.
35. Ghosh A. P., Gerenser L. J., Jarman C.M., Fornalik J. E. Thin-film encapsulation of organic light-emitting devices // *Applied Physics Letters.*— 2005.— Vol. 86, Issue 22.— P. 413—415.