

Jerzy Zieliński, Marek Olifierczuk, Marek Szwejca

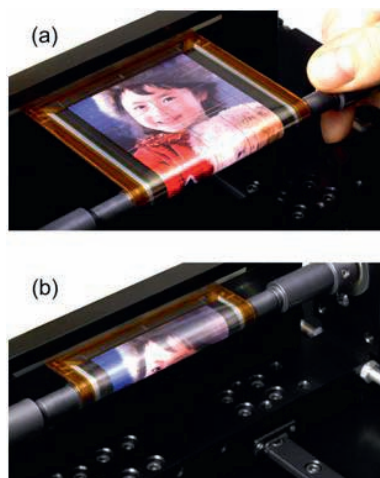
Organiczne diody elektroluminescencyjne – nowa generacja ekranów wideo

Wstęp

Ostatnie dwadzieścia lat w historii systemów zobrazowania to krok tak wielki, że gdyby ktoś dziś został przeniesiony do domu, laboratorium czy sali kinowej lat 80. XX wieku miałby duże trudności ze zrozumieniem jak można było w tym świecie żyć. Bez telefonów komórkowych, laptopów, z wielkimi telewizorami, których ekran nie przekraczał 30 cali, a monitor domowego komputera (często niezbyt bezpieczny dla zdrowia użytkownika) zajmował pół biurka.

Dziś mamy dwa wiodące systemy monitorów i wyświetlaczy do obserwacji bezpośredniej: ciekłokrystaliczne i plazmowe, oraz dwa systemy projekcyjne: ciekłokrystaliczny i mikrolusterkowy.

Na rynku pojawia się nowy, poważny konkurent – ekrany z organicznych diod elektroluminescencyjnych (OLED lub PLED). Ekrany aktywne – czyli emitujące światło bardzo dobrej jakości, a dodatkowo możliwe do wykonania jako wyświetlacze na podłożach elastycznych [1, 2].



Rys. 1. Elastyczny wyświetlacz OLED: a) w postaci płaskiej rozwiniętej, b) w postaci zwiniętej (zrolowanej). Wyświetlacz jest adresowany matrycą aktywną TFT [1]

Pojawia się z jednej strony pytanie o perspektywę szybkiego, masowego wprowadzenia tych wyświetlaczy na rynek i zastąpienia przez nie obecnie dominujących ciekłokrystalicznych i plazmowych, a z drugiej – o możliwość wypełnienia przez tę technikę luki w postaci wyświetlaczy na podłożach elastycznych dla elektronicznych gazet, książek oraz zobrazowania wielkowymiarowego. Analizując powyższy problem, musimy pamiętać, że chociaż technologia OLED od wielu lat jest uznawana za bardzo obiecującą, pozwalającą na budowanie ultracienkich, tanich, o bardzo dobrej jasności wyświetlaczy – to ciągle nie może się przebić do masowego odbiorcy. Z jednej strony mamy duże potencjalne możliwości, z drugiej – fizyczne i techniczne ograniczenia, które opóźniają praktyczne ekonomicznie uzasadnione wdrożenie takich systemów.

Podstawy budowy i działania organicznych LED-ów

Jako pierwszy zjawisko elektroluminescencji w materiałach organicznych – świecenie cienkich krystalicznych warstw oranżu akrydynowego i kwartyny pod wpływem wysokiego napięcia – zaobserwował zespół A. Bernanose'a z Nicei w 1953 roku [2]. Dziesięć lat później Pope zaobserwował elektroluminescencję w kryształach antracenu. Początkowo układy takie dla uzyskania świecenia wymagały przykładania napięcia rzędu kilkuset Volt, co nie zachęcało do głębszego nimi zainteresowania. Powodem takiego stanu była konieczność pokonania dużej pracy wyjścia dla wstrzykiwania nośników ładunków z elektrod do materiału organicznego. Proces wstrzykiwania nośników ładunku do materiałów organicznych, zarówno krystalicznych, jak i amorficznych, jest konieczny, ponieważ nie posiadają one własnych nośników swobodnych [3]. Przełomowe odkrycie nastąpiło w 1987 r. Zespół Kodaka, w skład którego wchodził Tang i Van Slake, opublikował wyniki badań opisujące emisję z dwuwarstwowej struktury chylałowych związków glinu, trzy 8-hydroxy hialiny glinu (Alq_3).

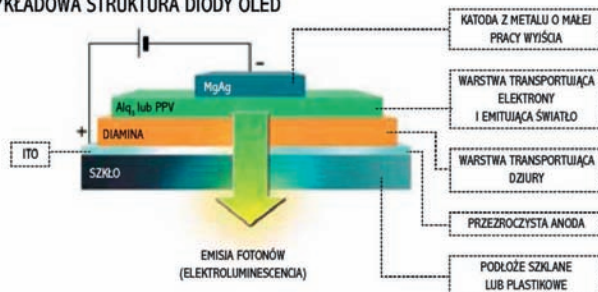
Na szklaną płytkę, pokrytą pełniącą rolę anody warstwą przewodzącego i przezroczystego ITO (Indium-Thin-Oxide), naniesiono warstwę tiaminy aromatycznej (75 nm). Tiamina ma za zadanie transportowanie dziur do umieszczonej na niej warstwy materiału luminescencyjnego (60 nm). Wysoki współczynnik emisji, przekraczający odpowiednie otrzymywane w klasycznych strukturach nieorganicznych, spowodował przełom w zainteresowaniu tymi materiałami. W 1990 r. Burroughs wraz z grupą współpracowników zbudował pierwsze urządzenie elektroluminescencyjne oparte na sprzężonych polimerach polifenylenowinylen (PPV). Był to pierwszy w historii jednowarstwowy polimerowy LED. Trzy lata później Greenham i jego zespół opracował dwuwarstwowy polimerowy LED. Pomiędzy organicznymi i polimerowym występują poważne różnice jakościowe. Próżniowo naporowane małowcząsteczkowe organiczne diody LED – OLED stworzono w celu lepszego dostosowania właściwości materiałów, takich jak pasmo zabronione i przyciąganie elektronów, natomiast polimery mają lepszą stabilność chemiczną oraz mogą być nanoszone na podłoże tańszą metodą nadrukowania.

Jak już wspomniano, obecnie można wyróżnić dwa typy diod elektroluminescencyjnych działających w oparciu o materiały organiczne. Pierwszym typem są zbudowane z organicznych cząsteczek o niewielkich wymiarach – małowcząsteczkowe diody LED nazywane SMOLED (ang. Small Molecule OLED), natomiast drugim

typem wykorzystującym wielkocząsteczkowe związki organiczne są zbudowane z polimerów diody polimerowe nazywane PLED (ang. Polymer LED). Podstawą fizyczną działania obu typów diod jest połączenie dobrych półprzewodników: dziurowego i elektronowego [2]. Schematycznie budowę takiej struktury przedstawiono na rys. 2.

Zarówno w jednym, jak i drugim typie przetworników OLED występuje elektroda ITO, która ze względu na wysoką wartość pracy wyjścia jest dobrym emitorem dziur, katoda jest metalowa i pełni rolę emitera elektronów. Oba przypadki łączy również to, że „aktywna” warstwa materiału organicznego ma grubość około 140 nm. Przy czym znane są konstrukcje diod emitujących światło w dół i w górę. Przyłożenie napięcia do wyświetlacza OLED lub PLED powoduje, że z jego struktury wydobywa się kolorowa poświata. W warstwach aktywnych ładunki dodatnie, czyli dziury z warstwy typu p, oraz ładunki ujemne, czyli elektrony z warstwy typu n, rekombinują, powodując emisję fotonów o długości fali zależnej od użytego związku w warstwie aktywnej.

PRZYKŁADOWA STRUKTURA DIODY OLED



Rys. 2. Schemat struktur diody OLED oraz wzór chemiczny zastosowanych materiałów małomolekularnych i polimerowych

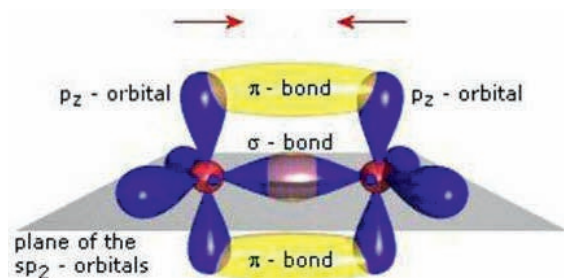
Struktura OLED jest bardziej skomplikowana. Na elektrodę ITO nakładana jest cienka (15÷20 nm) warstwa buforująca lub wstrzykująca dziury. Następnie nakładana jest warstwa o grubości 50÷60 nm, która realizowała zadania warstwy transportującej dziury. W początkowym okresie do budowy tej warstwy wykorzystywano N-naftylo-N-fenylobenzydyny. Właściwa warstwa emitująca światło o grubości 35–40 nm wykonana jest z Alq₃ domieszkowanego organicznym barwnikiem. Kolejna warstwa odpowiedzialna jest za transport elektronów oraz odizolowanie warstwy emitującej od metalicznej katody. Zbudowana jest z niedomieszkowanego Alq₃ o grubości 35÷40 nm. Ostatnią warstwą jest metaliczna katoda często wykonywana ze stopu magnezu i srebra (MgAg).

Struktura PLED charakteryzuje się prostszą budową. Najczęściej składa się tylko z dwóch warstw organicznych nałożonych na elektrody ITO: warstwy poliditlenku tiofuranu (PEDOT), pełniącej rolę transportera dziur, oraz warstwy odpowiedzialnej za transport elektronów i emisję światła, zbudowanej z PPV (polifenylenowinylen).

Diody OLED składają się z cząstek organicznych polimerów przewodzących. Nazywane są one także półprzewodnikami organicznymi, z tego względu, że ich poziom przewodzenia mieści się pomiędzy izolatorami a przewodnikami. W diodach OLED zachodzą analogiczne zjawiska jak w diodach LED ze złączem p-n, z tą różnicą,

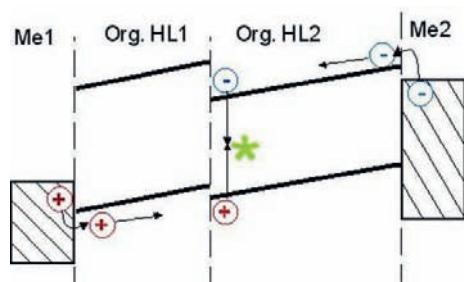
że organiczna warstwa odpowiada obszarowi warstwy zubożonej, katoda wstrzykująca elektrony odpowiada granicy warstwy zubożonej od strony półprzewodnika typu n, natomiast anoda wstrzykująca dziury odpowiada granicy od strony typu p. Materiały, z których zbudowane jest złącze p-n w przypadku OLED, są różnymi związkami chemicznymi. Organiczne półprzewodniki oparte są na własnościach aromatycznych związków węgla.

W diodach OLED wykorzystywane jest zjawisko oddziaływania pomiędzy orbitalami molekularnymi (MO) materiałów użytych do ich budowy. To oddziaływanie odbywa się pomiędzy najwyższym zajętym orbitalem molekularnym – HOMO (ang. Highest Occupied Molecular Orbital) oraz najniższym niezajętym orbitalem molekularnym – LUMO (ang. Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Ze względu na hybrydyzację sp^2 powstają dwa orbitale typu π : wiążące i antywiążące, które tworzą się nad i pod płaszczyznę cząsteczki (rys. 3). Elektrony zajmują tylko orbital wiążący, przez co mają mniejszą różnicę energetyczną pomiędzy HOMO i LUMO. W tym wypadku emisja światła lub jego pochłanianie przypada na długość światła z pobliża zakresu widzialnego. Zbyt duża różnica energii pomiędzy zajętymi wiązaniami i niezajętymi antywiązaniami spowoduje, że zjawisko będzie niewidoczne dla ludzkiego oka, gdyż odbywać się będzie poza granicami światła widzialnego [4].



Rys. 3. Schemat ideowy dwóch atomów węgla i wiązań pomiędzy nimi [4]

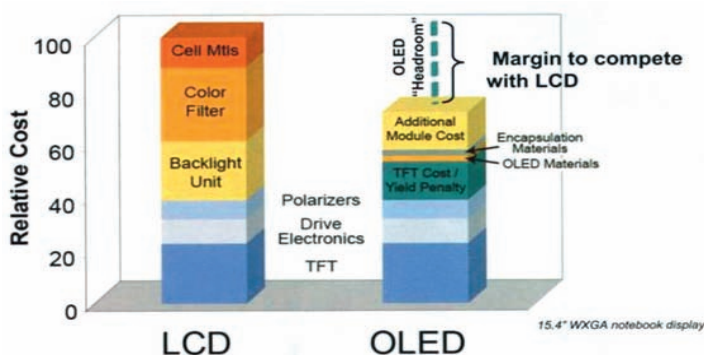
Pierwsze diody OLED składały się z pojedynczej warstwy organicznej, jednak ich wydajność nie była zadowalająca. Powodem tego był fakt, że trudno wprowadzić do pojedynczej warstwy organicznej taką samą ilość dziur i elektronów, przez co nie wszystkie mogły ze sobą rekombinować. Problem rozwiązali naukowcy laboratorium Kodaka w 1987 r., opracowując OLED z podwójną warstwą organiczną widoczną na rys. 4.



Rys. 4. OLED z podwójną warstwą organiczną [4]

Elektron, który płynie od katody, natrafia na barierę w postaci różnicy potencjałów LUMO innego materiału i tam „oczekuje” na nadpłynięcie dziury, z którą rekombinuje. To rozwiązanie pozwoliło na osiągnięcie większej sprawności przez wstrzykiwanie do warstwy organicznej tej samej ilości dziur i elektronów, które ze sobą rekombinują. Podwójna warstwa organiczna stosowana jest również do budowy diod polimerowych.

Tak więc otrzymujemy stosunkowo prosty wyświetlacz aktywny, czyli emitujący światło w zakresie widzialnym. Jednocześnie, biorąc pod uwagę jego budowę, powinien on być tańszy od analogicznego wyświetlacza ciekłokrystalicznego (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie przewidywanych kosztów produkcji wyświetlaczy OLED i LCD

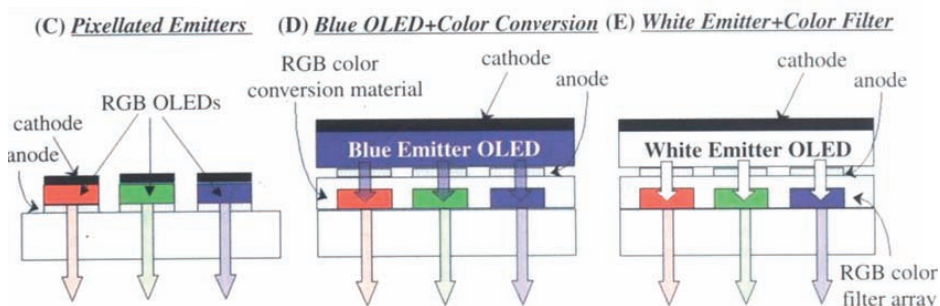
Barwne zobrazowanie OLED

Potencjalnie istnieją trzy główne metody uzyskiwania kolorowych wyświetlaczy OLED. Pierwsze rozwiązanie polega na użyciu białego emitera i filtrów barwnych. Jest to identyczna metoda jak w przypadku LCD. Jako źródło światła wykorzystuje się diodę OLED, emitującą białe światło, które przechodzi przez barwne filtry. Widoczną wadą tego rozwiązania jest to, że barwne filtry pochłaniają 2/3 światła emitowanego przez diodę OLED, co powoduje, że główne zalety tych diod tracą znacznie na wartości. Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest możliwość skorzystania z doświadczeń, filtrów opracowanych dla LCD.

Drugą metodą uzyskania barw jest zastosowanie niebieskiego emitera i warstw (barwników) reemitujących. Rozwiązanie to zostało opracowane przez firmę Kodak i Idemitsu Kosan. W tym przypadku emiterem jest niebieskie źródło światła, a w miejsce filtrów występują warstwy absorbujące światło niebieskie i reemitujące odpowiednie światło zielone i czerwone. W tej metodzie, aby uzyskać kolor czerwony, wymagana jest reemisja światła niebieskiego na zielony, a następnie zielonego na czerwony. W celu otrzymania koloru zielonego odbywa się reemisja jedynie koloru niebieskiego na zielony, a w przypadku koloru niebieskiego reemisja nie występuje, gdyż kolor diody jest właśnie tego koloru.

Trzecim i zarazem najbardziej wydajnym i praktycznie najczęściej stosowanym sposobem uzyskiwania zobrazowania barwnego jest wykorzystanie trzech niezależnych emiterów. W tym przypadku pojawia się problem z nanoszeniem barwnych emiterów. Rozpowszechniły się głównie trzy metody nanoszenia barwnych

emiterów. Dla OLED jest to naparowanie przez maskę, a dla displejów PLED nadruk metodą Ink-jet oraz metodą LITI. Przy trzech niezależnych emiterach uzyskuje się najbardziej wydajne wyświetlacze, gdyż świecą tylko te subpiksele, które mają dać nam pożądany obraz. Ekran y te charakteryzują się też dużo większą i ładniejszą gamą kolorów. Natomiast problemem jest równe starzenie się poszczególnych emiterów.



Rys. 6. Sposoby uzyskiwania zobrazenia barwnego w diodach OLED [5]

Pomimo że displeje OLED zbudowane są z mniejszej ilości warstw niż LCD, proces ich produkcji jest dość skomplikowany ze względu na konieczność stosowania dwóch tranzystorów oraz nanoszenia na przemian warstw organicznych i krystalicznych. Generalnie stosuje się trzy różne technologie.

Kształtowanie warstw organicznych przez naparowanie próżniowe z wykorzystaniem metalowych masek cieniowych to technika, w której wykorzystuje się małomolekularne materiały organiczne, tj. barwniki organiczne, jeśli wykazują znaczne ciśnienie swoich par w temperaturze znacznie wyższej od temperatury termicznej dekompozycji. Inne stosowane materiały to fluorescencyjna kumaryna, a także różne materiały transportujące i blokujące, np. Alq_3 [2].

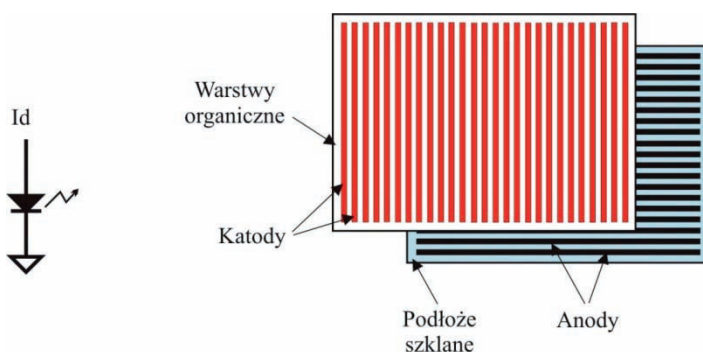
Kształtowanie metodą druku (Ink-jet) to bardzo popularna metoda produkcji wyświetlaczy OLED, która rozwinęła się w przeciągu ostatnich 10 lat. Technika ta stosowana jest przede wszystkim do produkcji ekranów polimerowych. Użyta tu technologia jest podobna do tej stosowanej w drukarkach atramentowych, z tą różnicą, że zamiast atramentu głowica nanosi na podłoże materiał organiczny. Nanoszenie subpikseli sterowane jest komputerowo przez wprowadzone odpowiednie programy drukowania. Jest to jedna z najwydajniejszych pod względem kosztów produkcji metod wytwarzania wyświetlaczy OLED.

Laserowo indukowane drukowanie (LITI) to metoda opracowana przez firmę 3M we współpracy z firmą Samsung SID. Pod względem ceny mieści się ona pomiędzy dwoma wcześniej wymienionymi. Jest droższa niż metoda druku Ink-jet i tańsza niż naparowanie próżniowe. Technologia polega na użyciu wstępnie osadzonej warstwy donorowej, laserowego układu oświetlającego i receptora. Proces zaczyna się od ustawienia receptora w układzie naświetlania laserowego, laminowanych warstw osadzonych wstępnie i przylegających do powierzchni receptora. Włączony układ laserowy naświetla laminowany układ. Podczas tego procesu z obszarów oświetlonych przez laser usuwane są donory i przyłączane do akceptorów. Proces ten jest powtarzany dwa lub więcej razy zależnie od konstrukcji diody OLED.

Adresowanie wyświetlaczy OLED

Matryca pasywna

Pasywne wyświetlacze PMOLED (ang. Passive Matrix OLED) nie posiadają w swojej budowie aktywnych elementów adresujących. Jak pokazano na rys. 7, elektrody w PMOLED mają kształt pasków. Elektrody katody i anody są względem siebie prostopadłe. W momencie przyłożenia napięcia pomiędzy określoną katodę i anodę, następuje emisja światła z materiału organicznego na skrzyżowaniu tych dwóch elektrod.

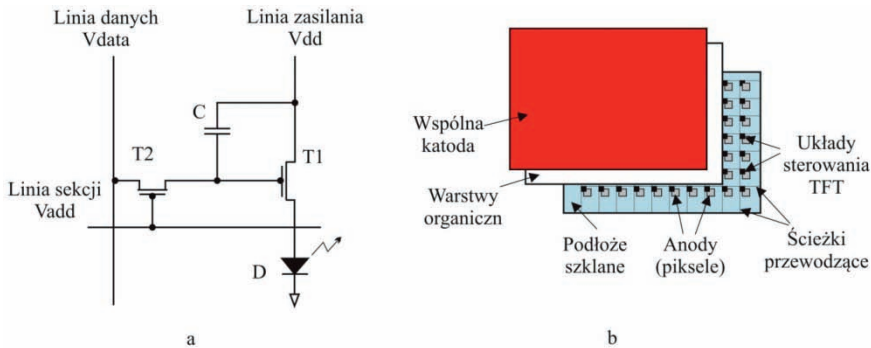


Rys. 7. Schemat adresowania matrycy pasywnej: a) pojedynczy piksel, b) wyświetlacz matrycowy PMOLED [2, 6]

W PMOLED w danym momencie światło emitowane jest przez jeden rząd elektrod. Gdy wybrany zostaje rząd matrycy, sygnał, który dociera do odpowiednich kolumn, decyduje o tym, które piksele świecą, a które nie. Sygnał wideo jest wyświetlany poprzez sterowanie wszystkich rzędów matrycy z odpowiednią częstotliwością (najczęściej ponad 60 Hz). Przy tak szybkim przemiataniu kolumn i wierszy ludzkie oko uśrednia jasność emitowanego przed diody światła. Ale aby uzyskać dobrą jakość obrazu, wymagane jest chwilowe uzyskanie dużej jasności świecenia. Uzyskuje się to przez zwiększenie napięcia, a zatem i natężenia prądu. Diody OLED zasilane są przez źródła prądowe, co dodatkowo komplikuje układy sterowania, albowiem pojawiają się znaczne straty na rezystancjach elektrod wyświetlaczy pasywnych. To z kolei sprawia, że musi być podniesione napięcie zasilające (do około 20V). Tak wysokie napięcia są niepożądane, gdyż skracają czas życia diod OLED. Stosowanie wysokich napięć odbija się też na konieczności zwiększania wymiarów wyświetlaczy pasywnych (ścieżki doprowadzające, odprowadzenie ciepła), co jest w sprzeczności z typowymi zastosowaniami takich wyświetlaczy (fotograficzne aparaty cyfrowe czy telefony komórkowe). Pomimo tego wyświetlacze OLED są chętnie wybierane jako następcy technologii LCD w wymienionych urządzeniach. Charakteryzuje je dobra jasność, niski koszt produkcji i mimo wszystko dość niski pobór prądu, związany z tym, że w materiałach elektroluminescencyjnych jakimi są OLED-y energia elektryczna konwertowana jest na energię świetlną tylko w świecącym punkcie, a nie jest wymagane podświetlenie całej powierzchni wyświetlacza.

Matryca aktywna

Wyświetlacze adresowane pasywnie są bardzo atrakcyjne, niestety szybko okazało się, że w oparciu o takie adresowanie nie jest możliwa budowa ekranów wideo ani komputerowych. Niezbędną poprawę parametrów uzyskano po zastosowaniu – podobnie jak w przypadku LCD – technologii matrycy aktywnej – AMOLED (ang. *Active Matrix OLED*).



Rys. 8. Schemat adresowania matrycy aktywnej: a) pojedynczy piksel, b) wyświetlacz matrycowy AMOLED [5, 6]

AMOLED różni się od pasywnego wyświetlacza układem sterowania. Tutaj korzysta się ze sprawdzonego rozwiązania z ekranów LCD, czyli wyposażenia każdego piksela w dedykowany układ sterujący, którego schemat przedstawiono na rys. 8. W tym miejscu należy jednak podkreślić, że istnieje poważna różnica pomiędzy adresowaniem LCD a OLED. Diody OLED muszą być zasilane prądowo. Sterowanie takie niesie za sobą dodatkowe wymagania. Otóż do obsługi takiego układu wymagane są minimum dwa tranzystory TFT lub TFD. Na powyższym rysunku tranzystor T2 ma za zadanie przeładowanie kondensatora pomocniczego C. Tranzystor T1 jest źródłem prądowym, którego wydajność jest sterowana napięciem na bramce. Podczas każdego cyklu przemiatania kondensator pomocniczy przeładowany jest poprzez tranzystor T2, natomiast T1 w sposób ciągły dostarcza prądu zasilającego diodę OLED, a natężenie tego prądu jest funkcją napięcia na kondensatorze.

Pomimo konieczności ciągłego zasilania wyświetlaczy aktywnych, cechują się one mniejszym poborem energii niż dysплеje pasywne. Spowodowane to jest wyższą sprawnością matrycy z układem TFT. W pasywnie adresowanych OLED energia rozpraszana jest na rezystancjach elektrod na skutek przepływu prądów o wysokim natężeniu, a w AMOLED to zjawisko nie występuje. Dzięki lepszej sprawności wymagane napięcia dla AMOLED są niższe – wystarczające jest 10V, a nie 20V, jak miało to miejsce w przypadku PMOLED.

W tym miejscu musimy jednak podkreślić, że pojawiają się poważne problemy technologiczne i materiałowe (materiały na tranzystory), które nadal nie pozwalają diodom OLED skutecznie walczyć z LCD [7].

Miejsce displejów OLED wśród innych technik zobrazowania

Jedną z głównych zalet wyświetlaczy OLED jest to, że diody same emitują światło, przez co nie wymagają dodatkowych elementów podświetlających. Powoduje to, że ekrany charakteryzują się dobrą jasnością świecenia i bardzo cienkim przekrojem. W OLED nie występują problemy z kątami widzenia, gdyż są one bliskie 180°, kontrast, w szczególności czerń, jest również dużo głębszy w ekranach z diod. Co do szybkości reakcji matrycy to w OLED osiągają one czas reakcji na poziomie mikrosekund, czyli o trzy rzędy wielkości lepsze niż ich najgroźniejszy konkurent LCD. Kolejną zaletą wyświetlaczy OLED jest całkowite zużycie energii – zasilane są tylko punkty świecące, niestety jest to również moc, która musi być adresowana, czyli przejść przez tranzystory matrycy aktywnej.

Niestety rozwiązanie nie jest idealne. Jednym z najsłabszych punktów displejów OLED jest ich żywotność, a zwłaszcza dużo krótsza żywotność luminoforu niebieskiego. W wyświetlaczach kolorowych prowadzi to również do zmiany wyświetlanej barwy w czasie pracy displeja. Dodatkowo displeje OLED są wrażliwe na wilgoć i tlen, przez co muszą być hermetyzowane, co utrudnia wykorzystanie technik „drukarskich” do ich produkcji. Na koniec musimy sobie uzmysłwić fakt, że przyszłość OLED związana jest z niezawodną tanią matrycą aktywną, która pozwala budować ekrany o większych przekątnych. Najintensywniejsze badania trwają obecnie nad uzyskaniem lepszych tranzystorów TFT, które pozwoliłyby udoskonalić adresującą matrycę aktywną.

Najważniejsze parametry charakteryzujące displej to:

- kontrast – to parametr, który określa stosunek jasności segmentów najciemniejszych (nieaktywnych) do jasności segmentów najjaśniejszych (aktywnych). Im wyższy jest ten współczynnik, tym displej będzie prezentował wyraźniejszy i czytelniejszy obraz. Wyższy kontrast umożliwi uzyskanie głębszej czerni oraz lepszej reprodukcji barw. W przypadku ekranów OLED możemy uzyskać ekstremalnie duże kontrasty, ponieważ gdy dioda nie świeci, czerń jest bardzo głęboka, a gdy świeci, to biel jest bardzo jasna. Różnica pomiędzy najjaśniejszymi a najciemniejszymi punktami jest na tyle duża, że pozwala uzyskać bardzo dobry kontrast rzędu 1 000 000:1 w przypadku telewizora XEL-1 firmy Sony, przy grubości jedynie 3 mm,

- czas reakcji wyświetlacza – parametr wyświetlaczy, który opisuje opóźnienie, z jakim segmenty wyświetlacza są aktywowane lub dezaktywowane, przy czym z tych dwóch wartości wybiera się większą. Dla displejów OLED typowe czasy reakcji są o 3 rzędy wielkości krótsze od monitorów LCD i podaje się je w mikrosekundach,

- kąt widzenia – parametr, który określa maksymalne odchylenie od optymalnego kąta obserwacji. Optymalny kąt to taki, który nie powoduje zmniejszenia kontrastu poniżej pewnego poziomu. Kąt widzenia zależy od możliwości sterowania napięciami, równomierności podświetlenia i jasności podświetlenia. W displejach OLED z równomiernym podświetleniem nigdy nie było kłopotu, gdyż każda dioda sama emituje jasne światło, co wystarcza, aby uzyskać równomierne oświetlenie i zapewnić dobre kąty widzenia rzędu niemal 180°,

- maksymalna rozdzielczość – właściwość każdego ekranu zbudowanego z oddzielnych punktów obrazu, która określa maksymalną liczbę pikseli w danym wyświetlaczu. Im więcej wyświetlacz może wyświetlić pikseli, tym lepiej, gdyż obraz staje się bardziej wyraźny i pokazuje więcej szczegółów. Z rozdzielczością związane

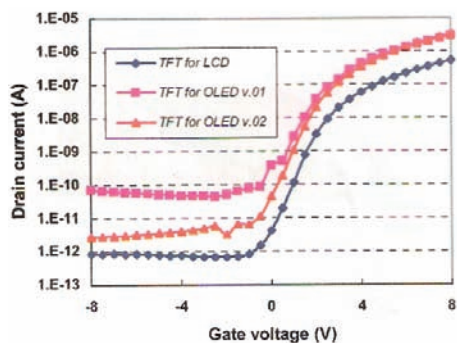
są także proporcje ekranu. Dawniej standardem były wyświetlacze 4:3. Obecnie standardem są tzw. wyświetlacze panoramiczne 16:9, gdzie długość ekranu w poziomie została wydłużona, a w pionie skrócona, przy niezmięnionej przekątnej ekranu. Technika OLED mimo skomplikowanej budowy matrycy aktywnej pozwala na budowanie ekranów HD bez żadnych problemów. Pod tym względem OLED-y są bliższe LCD niż wyświetlaczom plazmowym, które mogą uzyskać duże rozdzielczości dopiero powyżej pewnej przekątnej.

Rozwój techniki organicznych LED-ów

Pierwsze wyświetlacze OLED pojawiły się na rynku na początku lat 90. XX w. Niestety dopracowanie technologii wytwarzania tych displejów do rozsądnego poziomu zajęło ponad 10 lat. Pierwsza masowa produkcja wyświetlaczy AMOLED – adresowanych matrycą aktywną – ruszyła w roku 2002. Autorami tego rozwiązania byli członkowie zespołów z Eastman Kodak Company oraz Displej Corporation, którym udało się nanieść struktury OLED na zmodyfikowane niskotemperaturowe podłoże polikrystalicznego krzemu LTPS (ang. Low-temperature PoliSilicon). W ten sposób rozpoczęła się produkcja ekranów wideo z diod organicznych.

Kolorowe AMOLED-y buduje się także, wykorzystując światło białego luminoforu oraz filtry barwne. Technologia ta nie wymaga tak precyzyjnego maskowania jak stosowanie trzech luminoforów, wadą jej jest natomiast to, że część światła jest pochłaniana przez filtry. Dzięki zredukowaniu ilości procesów technologicznych, displeje takie są tańsze, a zastosowanie jednorodnego barwnego emitera powoduje, że ich starzenie jest bardziej równomierne niż w przypadku zastosowania kilku emiterów. Na dodatek diody białe są bardziej wydajne niż diody barwne. Tej samej mocy biały emiter pobiera średnio połowę mniej energii od barwnego. Tak więc technologia pozornie niekorzystna okazuje się możliwa do praktycznego wdrożenia.

O problemie związanym z budową matrycy aktywnej świadczy poniższy wykres pokazujący charakterystyki tranzystorów adresujących LCD i OLED (rys. 9).



Rys. 9. Krzywa I-V dla a-Si TFT po modyfikacjach [8]

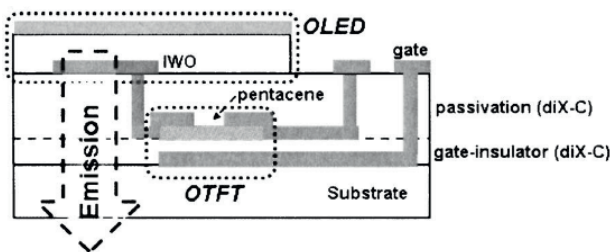
Z rysunku widać, że do zasilenia OLED potrzebne są tranzystory o znacznie lepszych charakterystykach niż w przypadku LCD – wyższych prądach wyjścia. Dlatego ważnym problemem jest znalezienie odpowiednich materiałów, które zapewnią tranzystorom TFT odpowiednią ruchliwość nośników. I właśnie opracowanie takich

materiałów stanowi na razie problem wpływający na cenę wyświetlacza, która jest około 10 razy wyższa jak analogicznego LCD.

Poza tranzystorami nieorganicznymi prowadzone są intensywne badania nad wykonaniem tranzystora w oparciu o materiały organiczne. Zainteresowanie tymi materiałami rozpoczęło się po publikacji Tsumury w 1986 roku, w której autor omówił działanie pierwszego tranzystora polowego z półprzewodnikiem organicznym jako elementem aktywnym. Takie tranzystory noszą nazwą Organic Thin Film Field-Effect Transistor, w skrócie OTFT. Tranzystory te otwierają nowe możliwości zastosowania displejów w niespotykanych dotąd urządzeniach, jak elektroniczne czasopisma oraz giętkie displeje.

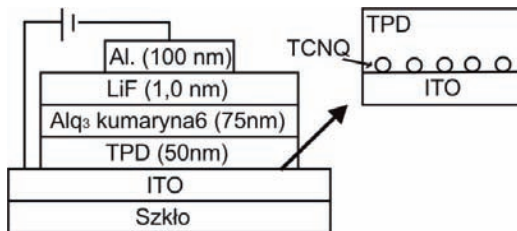
Fenomen displejów AMOLED polega na tym, że mogą być one wykonywane na podłożach wykonanych z polimerów, którego podstawową zaletą jest giętkość oraz lekkość. Wytwarzanie elementów aktywnych na takim podłożu jest trudne, gdyż temperatura przejścia w stan szklisty wielu polimerów jest znacznie niższa niż szkła. Wysoka temperatura wywiera niekorzystny wpływ na proces wytwarzania i eksploatacji podłoża z plastiku, gdyż w trakcie cyklu termicznego łatwo ulegają one rozszerzeniu i kurczeniu. Jeżeli temperatura podłoża jest zbyt wysoka, prowadzi to do wydzielania się gazów i zanieczyszczenia elementów osadzonych na podłożu. Wniosek jest taki, że do wytworzenia elementów na podłożach plastikowych potrzebna jest możliwie najniższa temperatura. W tym przypadku dobrze sprawdzają się tranzystory organiczne.

Jeden z zaproponowanych procesów pozwala na wytworzenie elementów OTFT i OLED na podłożach z plastiku z poli (naftalan etylen) - PEN bez ogrzewania tych podłoży. W procesie tym konieczne jest wykonanie warstwy pasywacyjnej i transparentnej anody w emiterze OLED. Wymiar każdej diody OLED miał powierzchnię $1000 \times 1000 \mu\text{m}$, a długość i szerokość tranzystora wynosiły odpowiednio 50 i $1000 \mu\text{m}$. Tranzystor OTFT wykonany był z pentacenu z konfiguracją górno-kontaktową. Jako izolatora bramki użyto poli (paraksylen), którego warstwę o grubości 200 nm nałożono poprzez chemiczne naporowanie na nieogrzewane podłoże. Warstwa ta powoduje, że tranzystory OTFT nie odczuwają działania podłoża. Na rys. 10 widoczny jest schemat budowy piksela składającego się z OLED i OTFT. Pomiędzy kanałem z pentacenu i metalową elektrodą znajduje się cienka warstwa tetracyjanochinodimetanu (TCNQ), użyta w celu dostosowania przyłożonego napięcia sterującego do diody OLED za pomocą OTFT. Obniżono w ten sposób oporność kontaktu tranzystora OTFT, wywołując wzrost prądu w stanie wyłączonym. Na tranzystorze OTFT znajduje się kolejna warstwa diX-C (600 nm), utworzona jako warstwa pasywacyjna.



Rys. 10. Schemat budowy piksela OLED-OTFT [8]

Dioda OLED nanoszona jest na warstwę pasywacyjną poprzez termiczne naporowanie na nieogrzewane podłoże. Fluoroscencyjną strukturę tworzyły tris(8-chinoliolano) glin (Alq_3) i N-di(meta-tolilo) benzylina (TPD). Przejroczysta anoda utworzona została poprzez osadzanie warstw ITO lub IWO. Na poniższym rysunku widoczne są kolejne warstwy diody OLED. Struktura diody z anodą ITO prezentowała się następująco: ITO/TPD (50 nm/ Alq_3 domieszkowana 1,6% kumaryna 6 / Alq_3 (75 nm)/LiF(1,0nm)/Al.(100nm) na szkle [8].



Rys. 11. Struktura warstw użytych do budowy diody OLED [8]

Na podstawie tej i podobnych technologii opracowane zostały na poziomie laboratoryjnym giętkie, zwijalne, wytrzymałe dysплеje AMOLED. I w tym właśnie miejscu widać wyraźną przewagę OLED nad konkurencyjnymi LCD i PDP (rys. 12).



Rys. 12. Przykłady wskaźników skonstruowanych na podłożach z polimerów

Problemy hamujące rozwój technologii OLED

Jak widać, przedstawione powyżej organiczne diody świecące potencjalnie i wymiennie mają bardzo dużo zalet. Tak dużo, że mówi się, że są obecnie techniką dającą najdoskonalszy obraz, w dodatku możliwy do realizacji na podłożu giętkim. Jednak laptop z ekranem 15-calowym LCD można kupić poniżej 1000 zł, a podobny z OLED kosztuje ponad 8000 zł.

Jak wiadomo, matryce OLED mogą być sterowane pasywnie lub aktywnie. Matryca ta jest skanowana, aby umożliwić uaktywnienie każdego piksela. Podstawową wadą matrycy pasywnej jest to, że wraz ze wzrostem przekątnej

ekranu proces skanowania staje się bardziej skomplikowany. Dlatego też zastosowanie tych matryc ogranicza się do małych wyświetlaczy.

Początkowe problemy z wyświetlaczami AMOLED dotyczyły sterowania pikselem. Problemy te udało się rozwiązać poprzez zastosowanie dwóch tranzystorów TFT do sterowania każdym pikselem. Różnica w stosunku do LCD polega na tym, że w OLED regulujemy prąd, a nie napięcie – jak w LCD. Jako przykład można podać 11-calowy wyświetlacz firmy Sony TV OLED XEL-1. Do produkcji tego displeja wykorzystano tranzystory wykonane w technologii LTPS, natomiast warstwa organiczna zbudowana została z materiałów małowcząsteczkowych. W powyższym wyświetlaczu wykorzystano technikę nanoszenia masek cieniowych. Maska jest osadzana pod podłożem. W przypadku większych podłoży, czyli większych ekranów, maska może się odkształcić poprzez zwiększoną masę, co spowoduje pogorszenie rozdzielczości i innych parametrów ekranu. Wadą są także wysokie prądy przełączania, co przy dużych ekranach powodowałoby widoczne smugi.

Część problemów związanych z zastosowaniem OLED do dużych wyświetlaczy udało się rozwiązać, budując matryce z amorficznego krzemu. Ich wadą jest jednak bardzo słaba ruchliwość nośników w porównaniu do LTPS.

Kolejnym poważnym problemem wyświetlaczy OLED są same diody, a ściślej żywotność diod organicznych. Trzeba pamiętać, że dla kolorowych wyświetlaczy trzeba równać do najsłabszej barwy, a taką w przypadku OLED jest niebieska. Żywotność diody niebieskiej to około 20 000 godzin i na tyle szacuje się właśnie czas użytkowania tych displejów. LCD jest w tym aspekcie 3 razy lepsze, gdyż żywotność wynosi około 60 000 godzin. Dodatkowo kolor niebieski jest najmniej efektywny, gdyż wydajność kwantowa wynosi zaledwie 4–6%, podczas gdy dla diody czerwonej i zielonej około 20%. Wpływ na to ma ludzkie oko, gdyż jest mniej wrażliwe na światło niebieskie. Bardzo słabą cechą OLED jest ich wydajność przy dużym zewnętrznym oświetleniu, np. na zewnątrz budynku przy padającym słońcu. Metaliczna katoda w wyświetlaczach OLED działa jak lustro z odbiciem zbliżającym się do 80%, co powoduje że obraz staje się praktycznie niewidoczny. Zauważyli to już posiadacze wielu telefonów komórkowych opartych na tym typie wyświetlaczy.

Dodatkowo wadą OLED jest zużycie energii. Jak wiadomo, OLED same generują światło, przez co nie potrzebują dodatkowego podświetlenia, jednak do wyświetlenia koloru białego muszą świecić wszystkie trzy diody. Powoduje to wysokie zużycie energii, nieraz przewyższające LCD. W przypadku czarnej barwy zużycie energii jest najmniejsze, a pośrednie dla kolorowych obrazków.

Podsumowując, należy stwierdzić, że mamy do czynienia z nowoczesną technologią potencjalnie najlepszą i najwyszczestronniejszą z obecnie dostępnych – niestety wymagającą jeszcze dopracowania pewnych rozwiązań, tak aby były trwałe, a kupno monitora uzasadnione ekonomicznie jego parametrami i trwałością.

Literatura

- [1] Noda M. i in., *An OTFT-driven rollable OLED display*, Journal of SID, v19, 2011, nr 4, s. 316–322.
- [2] Žmija J., Małachowski M.J., *Organic Light Emitting Diodes operation and application in displays*, Archives of Materials Science and Engineering, v40, 2009, nr 1, s. 5–12.

- [3] Żmija J., Małachowski M.J., Zieliński J., *Postępy w zastosowaniach półprzewodników organicznych w budowie cienkich lekkich o dużej jasności i giętkich displejów*, V Sympozjum TPO Serock 2006, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006, s. 40–59.
- [4] Kalinowski J., *Electroluminescence in organics*, Journal of Physics D: Applied Physics, 32, 1999, s. 179–250.
- [5] Chang-Wook Han i in., *15-in. RGBW panel Rusing two-stocked OLED and color filters for large-sized display applications*, Journal of SID, v19, nr 2, 2011, s. 190–195.
- [6] Baranowski R., *Wyświetlacze graficzne i alfanumeryczne w systemach mikroprocesorowych*, Wyd. BTC, Legionowo 2008.
- [7] Małachowski M.J., Żmija J., *Organic field effect transistor*, OptoElectronic Review, v18, nr 2, 2010, s. 50–65.
- [8] K. Tsukagoshi, Tanabe J., Yagi I., Shigeto K., Yanagisawa K., Aoyagi Y., *Organic light-emitting diode driven by organic thin film transistor on plastic substrates*, Journal Applied Physics, 2006, 99, 064506-1-5.

Organic LEDs: the new generation of video displays

Abstract

The paper presents problems related to the achievement of the organic LED's technological level allowing their use in imaging systems. Discussed problems resulting the current addressing on phosphors sustainability. Presents the advantages of allowing the construction of OLED displays on flexible substrates.

Jerzy Zieliński, Marek Sz wajca

UP – Kraków

Instytut Techniki

Marek Olifierczuk

WAT – Warszawa

Instytut Fizyki Technicznej