

ŚWIATŁO NOWEGO WIEKU

NIE ZAWSZE ZDAJEMY sobie sprawę, że do powstania teorii kwantów doprowadziła w dużej mierze potrzeba opracowania wzorcowego źródła światła, wynikająca z konkurencji między powszechnym na przełomie XIX i XX wieku oświetleniem gazowym a zyskującym na popularności oświetleniem elektrycznym. Dzięki mechanice kwantowej dowiedzieliśmy się, że emisja promieniowania jest wynikiem przechodzenia atomów lub cząsteczek z wyższego stanu energetycznego do niższego. Nowa fizyka umożliwiła stworzenie źródeł światła o zupełnie innym niż dotychczas mechanizmie pobudzenia atomów lub cząsteczek. W żarówce bowiem ten mechanizm jest identyczny jak w źródłach wykorzystujących spalanie. W obu przypadkach światło emitują atomy lub cząsteczki pobudzone do świecenia wskutek zderzeń będących konsekwencją ruchów cieplnych w wysokiej temperaturze; inny jest tylko mechanizm wytwarzania ciepła.

Zastosowana w lampach wyładowczych (np. świetlówkach) „zimna” metoda obsadzania stanów wzbudzonych – przez zderzenia elektronów z atomami par rtęci – nie tylko pozwoliła obniżyć temperaturę źródeł światła i uzyskać większą sprawność (w żarówkach wynoszącą zaledwie kilka procent), ale przede wszystkim umożliwiła stopniowe odejście od termicznych metod generowania światła. Z kolei wykorzystanie odkrytego w 1907 roku przez H. J. Rounda zjawiska elektroluminescencji i zastosowanie rekombinacji nośników ładunku w ciałach stałych (początkowo półprzewodnikach) do obsadzania stanów wzbudzonych emitera doprowadziło do skon-

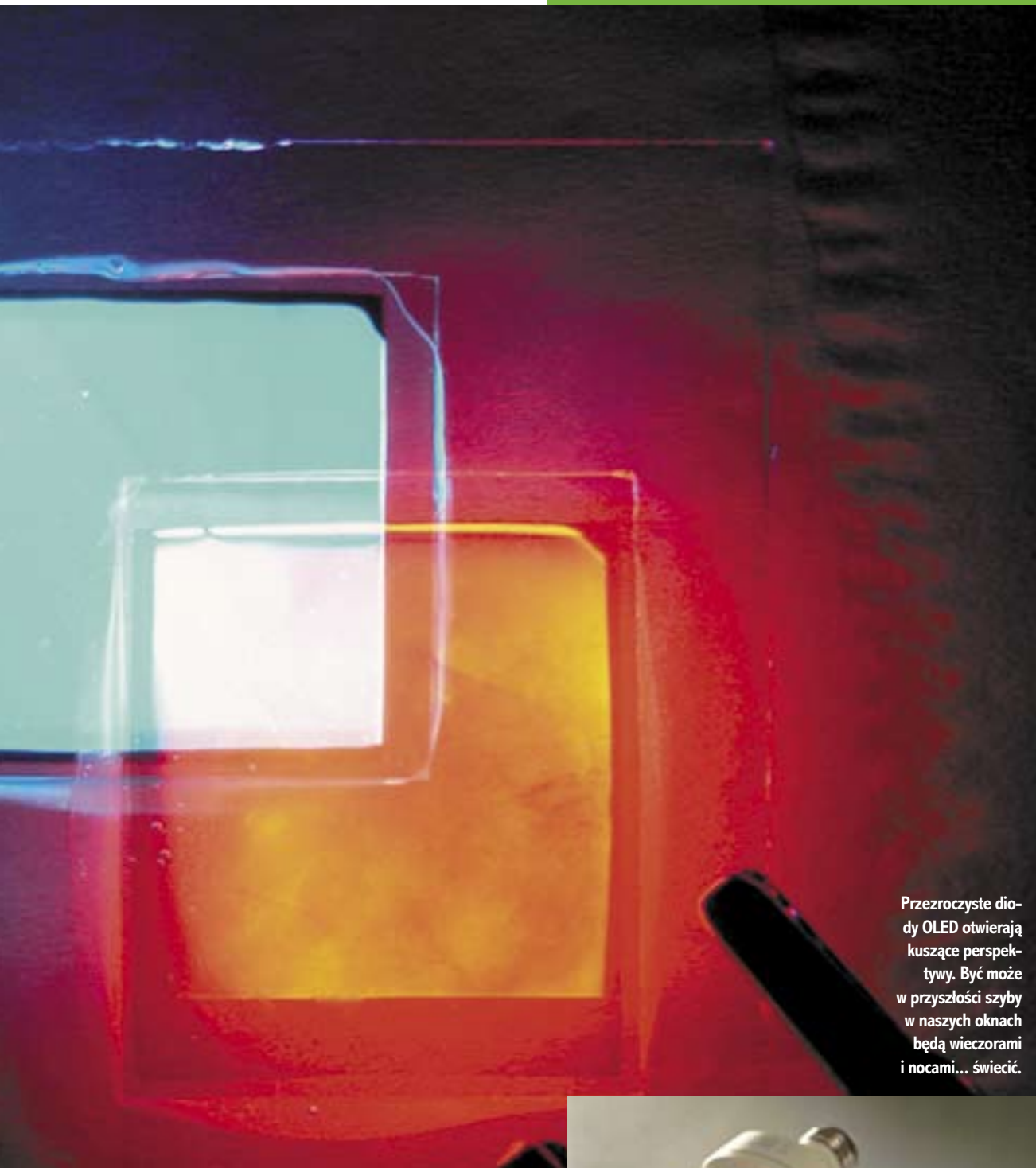
Ludzkość od zarania chciała przezwyciężyć ciemność. Mimo rozwoju cywilizacyjnego dopiero od niedawna potrafimy pokonać mrok, korzystając z czegoś innego niż ogień. Żarówka zmieniła życie milionów, a teraz miliony chcą lepszych, oszczędniejszych źródeł światła. Dzięki organicznym diodom to życzenie powinno się spełnić.

► JERZY KARPIUK

struowania niskonapięciowych i wysokosprawnych diod elektroluminescencyjnych (LED). Nie nadawały się one jednak do oświetlania: były monochromatyczne, nie mogły więc generować białego światła. Gdy te udało się już uzyskać, okazało się, że diody zużywają aż o 90% energii mniej od żarówek i tylko jedną czwartą tego, co świetlówki (np. lampa w postaci klastra diodowego o mocy 1,2 W świeci równie jasno jak 20-watowa żarówka).

Jeszcze kilka lat temu wydawało się więc, że białe półprzewodnikowe LED-y to prawdziwa żyła złota. Jedyną przeszkodą w ich upowszechnianiu był wysoki koszt produkcji, który powinien jednak szyb-

Kolejne generacje źródeł światła – od żarówek przez świetlówki do paneli wykonanych z diod organicznych (zdjęcie u dołu następnej strony).



Przezroczyste diody OLED otwierają kuszące perspektywy. Być może w przyszłości szyby w naszych oknach będą wieczorami i nocami... świecić.

ko maleć wraz ze wzrostem sprzedaży. Okazało się tymczasem, że nadchodzi nowa technologia, dużo bardziej obiecująca.

Organiczne światło

Przez ostatnie 50 lat przyzwyczailiśmy się kojarzyć elektronikę z materiałami nieorganicznymi, przede wszystkim z krzemem, który użyczył nawet nazwy amerykańskiemu zagłębiu elektroniczno-informacyjnemu, Dolinie Krzemowej. Jednak od dłuższego czasu z powodu ograniczeń technologicznych związanych z materiałami nieorganicznymi (m.in. problemami z dalszą miniaturyzacją) specjaliści kierują swoją



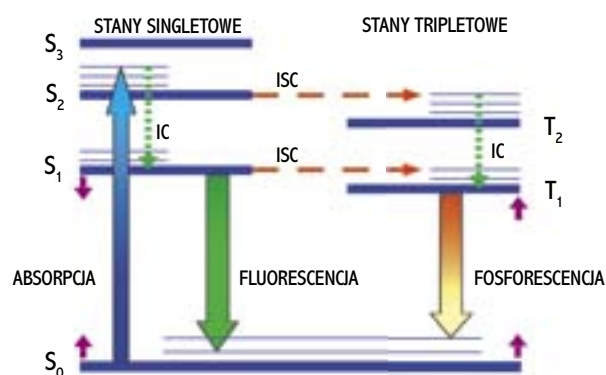
ORGANICZNY FOTON

Zanim cząsteczka organiczna wyemituje foton, musi najpierw zostać wzbudzona. Najprostszym sposobem wzbudzenia jest dostarczenie jej kwantu promieniowania o energii odpowiadającej różnicy między poziomami energetycznymi stanu podstawowego S_0 i pierwszego stanu wzbudzonego S_1 (lub któregoś z wyższych stanów wzbudzonych). W przejściu absorpcyjnym $S_0 \rightarrow S_1$ jeden z dwóch elektronów najwyższego obsadzonego w cząsteczce orbitalu molekularnego (HOMO – Highest Occupied Molecular Orbital) jest przenoszony na najniższy orbital nieobsadzony (LUMO – Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Dwa elektrony na orbitalu HOMO muszą mieć przeciwnie – antyrównoległe – skierowane własne momenty pędu, czyli spiny (fakt ten opisuje tzw. zakaz Pauliego). Sumaryczna liczba spinowa wynosi więc 0 i dlatego stan podstawowy większości cząsteczek jest określany jako tzw. stan singletowy, czyli singlet. Ponieważ przejście absorpcyjne zachowuje spin, w stanie wzbudzonym S_1 oba elektrony także mają spiny antyrównoległe.

Procesy zachodzące po wzbudzeniu ilustruje tzw. diagram Jabłońskiego. Grubsze linie poziome symbolizują stany wzbudzone elektronowo, cienkie linie – stany wzbudzone oscylacyjnie. Linie przerywane oznaczają przejścia bezpromieniste w procesie zwanym konwersją wewnętrzną, gdy energia wzbudzenia zamienia się w energię ruchów oscylacyjnych jąder. Cząsteczka szybko (w czasie od 10^{-14} do 10^{-11} s) osiąga najniższy poziom oscylacyjny stanu wzbudzonego S_1 . Typowa cząsteczka organiczna przebywa w tym stanie kilka nanosekund (10^{-9} s) i może przejść do stanu podstawowego, emitując foton lub dezaktywując się bezpromieniste. Emisję fotonu ze stanu S_1 nazywamy fluorescencją.

Gdy cząsteczka przebywa w stanie S_1 , może dojść do zmiany wzajemnej orientacji spinów obu elektronów – z antyrównoległej na równoległą. Następuje wówczas tzw. przejście międzysystemowe (ISC – InterSystem Crossing) do stanu trypletowego (trypletu, T_1), w którym sumaryczna liczba spinowa wynosi 1. W typowej cząsteczce organicznej stan trypletowy jest pułapką dla wzbudzenia: ze względu na małe prawdopodobieństwo przejścia do stanu podstawowego, jego czas życia jest długi (od ms do s). Emisję fotonu ze stanu trypletowego nazywamy fosforescencją. W większości molekuł organicznych obserwuje się ją dopiero po wyeliminowaniu możliwości dezaktywacji bezpromienistej ze stanu T_1 , np. w niskich temperaturach (rzędu -200°C). Intensywna fosforescencja w temperaturze pokojowej jest możliwa dopiero wówczas, gdy w cząsteczce znajduje się jon ciężkiego metalu, np. w kompleksach metali; występuje wtedy silne sprzężenie stanów singletowych i trypletowych.

DIAGRAM JABŁOŃSKIEGO – PRZEJŚCIA ENERGETYCZNE W CZĄSTECZCE



Oznaczenia symboli: S_0 – stan podstawowy; S_1 – S_n – stany wzbudzone singletowe; T_1 – T_n – stany wzbudzone trypletowe; IC – przejście bezpromieniste; ISC – przejście międzysystemowe. Fioletowe strzałki pokazują orientację spinów elektronów. Szczegółowy opis diagramu w tekście.

CO DZIEJE SIĘ WEWNĄTRZ DIODY OLED?

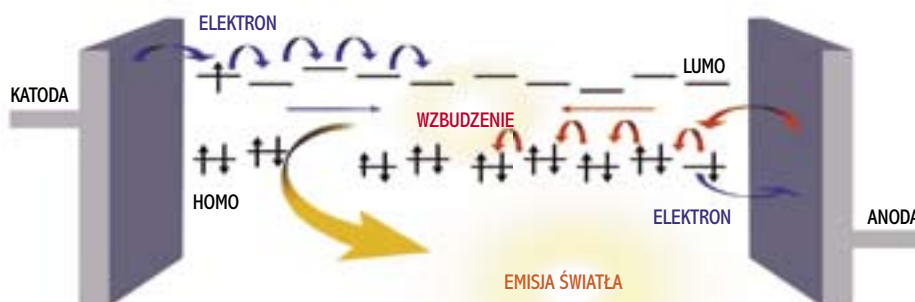
Po przyłożeniu napięcia następuje wstrzyknięcie ładunków z elektrod (wykonanych z metalu o niskiej pracy wyjścia elektronu, np. magnezu) do warstw organicznych. Materiały organiczne zwykle zachowują się jak izolatory, jednak w OLED-ach gęstość prądu jest duża – nawet 1 A/cm^2 . Wynika to z grubości warstw: napięcie 10 V w warstwie o grubości 100 nm generuje silne pole elektryczne ($\sim 10^8 \text{ V/m}$). Ponadto pole wewnątrz warstwy organicznej jest spotęgowane przez niewielką ruchliwość nośników ładunku, które rozpraszają się wolno, utrzymując ładunek przestrzenny przy granicach warstw.

Przez warstwę substancji organicznej płynie więc prąd. Transport ładunku polega tu na przekazywaniu elektronów między sąsiadującymi cząsteczkami. Elektrony są transportowane od katody przez orbitale LUMO, a dziury – od anody przez orbitale HOMO cząsteczek. Cząsteczkę z dodatkowym elektronem na orbitalu LUMO nazywamy anionorodnikiem, a cząsteczkę, której brakuje elektronu na orbitalu HOMO – kationorodnikiem. Anionorodnik i kationorodnik rekombinują, generując wzbudzenie. Ze względu na tzw. statystykę spinową na każde cztery akty rekombinacji ładunków powstaje średnio tylko jeden wzbudzony stan singletowy i trzy tryplety. (Na tym polega zasadnicza różnica między generowaniem stanów wzbudzonych przez rekombinację ładunków i przez absorpcję fotonu, kiedy to każdy zaabsorbowany foton prowadzi do obsadzenia singletu.)

Światło OLED-ów zazwyczaj nie pochodzi ze stanów wzbudzonych powstających bezpośrednio w rekombinacji, bowiem w ciałach stałych wzbudzenia mają charakter zdelokalizowany (zwłaszcza w polimerach) i mogą swobodnie przemieszczać się z cząsteczki pierwotnie wzbudzonej na inną, a potem na następną itd. Wędrujące wzbudzenie nazywamy ekscytonem; w zależności od jego typu mówimy o ekscytonach singletowych i trypletowych. Diody OLED świecą dzięki promienistej dezaktywacji ekscytonów w innym przestrzennie miejscu warstwy. W celu zwiększenia wydajności diody, do warstwy emisyjnej wprowadza się cząsteczki silnie świecących barwników, które przejmują energię ekscytonów i emitują własne światło.

MECHANIZM EMISJI ŚWIATŁA W DIODACH OLED

Elektrony przemieszczają się w kierunku anody, dziury w kierunku katody. Wewnątrz warstwy następuje ich rekombinacja i powstaje wzbudzenie. Może się ono przemieszczać z cząsteczki na cząsteczkę. Emisja fotonów w diodach OLED następuje właśnie dzięki takim przemieszczającym się wzbudzeniom, które w pewnym momencie prowadzą do emisji fotonów.



➤ uwagę w stronę przebogatej krainy materiałów organicznych. W odróżnieniu od elektroniki tradycyjnej, w której ze względu na kolektywny charakter zjawisk elementy aktywne nie mogą mieć rozmiarów atomowych, w elektronice organicznej można operować nawet na pojedynczych cząsteczkach. Z pomocą przychodzi tu chemia organiczna, realizująca zamówienia na materiały funkcjonalne – złożone z cząsteczek zaprojektowanych i przeznaczonych do wykonywania określonych funkcji. W rezultacie można wykonywać nie tylko nowego rodzaju układy logiczne i pamięci, lecz także – dzięki organicznym diodom luminescencyjnym (OLED – Organic Light Emitting Diodes) – nowatorskie źródła światła.

Substancje organiczne od dawna przyciągały uwagę producentów urządzeń oświetleniowych z powodu swoich doskonałych właściwości luminescencyjnych i dużej wydajności promieniowania emitowanego w widzialnym obszarze widma. Odkryte w 1967 roku lasery barwnikowe, których ośrodkiem czynnym są barwniki organiczne, nie tylko wytwarzają silne impulsy i ciągłe wiązki światła, ale umożliwiają również strojenie w szerokich zakresach długości fali emitowanego promieniowania. Co prawda lasery te jedynie przetwarzają promieniowanie krótkofalowe (absorbowane przez cząsteczki barwników) na bardziej długofalowe (emitowane), są jednak przykładem, jak znakomitym i stabilnym źródłem światła mogą być cząsteczki organiczne. Nic dziwnego, że molekuł tych próbowano użyć także w charakterze bardziej konwencjonalnych źródeł światła, wykorzystując elektroluminescencję – proces, w którym materia jest pobudzana do świecenia przez prąd lub pole elektryczne.

Wynalazek sprzed półwiecza

Elektroluminescencję substancji organicznych zaobserwował w roku 1953 zespół A. Bernanose'a z uniwersytetu w Nicei. Pojawiała się ona po przyłożeniu wysokiego, zmiennego napięcia do cienkich, krystalicznych warstw oranżu akrydynowego i kwina Kryny. Dziesięć lat



ŚWIETLANE PERSPEKTYWY

Zanim OLED-y staną się powszechnie używanym źródłem światła, trzeba zwiększyć efektywność masowo produkowanych urządzeń, trwałość eksploatacyjną (do co najmniej 10 tys. godzin) i skuteczność świetlną (powyżej 50 lm/W). Ponadto potrzebne są źródła światła białego o różnych temperaturach barwy i wysokowydajne procesy produkcji OLED-ów. Te właśnie cele zamierza osiągnąć realizowany w UE zintegrowany projekt badawczo-rozwojowy OLLA, w którym współdziała ponad 20 czołowych europejskich firm i ośrodków naukowych zajmujących się organiczną elektroniką oraz materiałami i urządzeniami oświetleniowymi. Konsorcjum składa się z 24 partnerów z nauki i przemysłu z ośmiu krajów europejskich i obejmuje głównych europejskich producentów oświetlenia (m.in. Philips, Osram, Siemens i Novaled). Ze strony polskiej w projekcie uczestniczy Instytut Chemii Fizycznej PAN w Warszawie. Projekt OLLA jest jednym z największych na świecie projektów typu joint research związanych z opracowywaniem białych diod OLED, obok takich jak Next-Generation-Lighting Initiative w USA czy Lighting 21 w Japonii. Połączenie wysiłków jest konieczne, bo do wytwarzania diod organicznych potrzeba zaawansowanych urządzeń, m.in. linii do nanoszenia cienkich warstw molekularnych w wysokiej próżni – a takimi dysponują tylko wielkie firmy.

później opracowano diodę OLED, w której cienkie (10-20 μm) kryształy antracenu świeciły po przyłożeniu do ich powierzchni napięcia stałego 400 V. Patent na organiczne urządzenie elektroluminescencyjne zasilane napięciem zmiennym przyznano w roku 1965 dwóm badaczom z firmy The Dow Chemical Company. Dwa lata później zaobserwowano elektroluminescencję z polimeru organicznego.

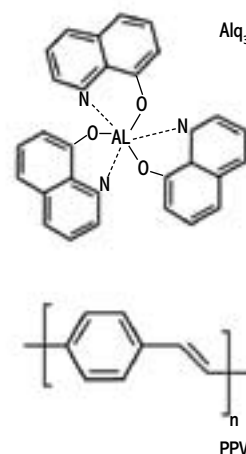
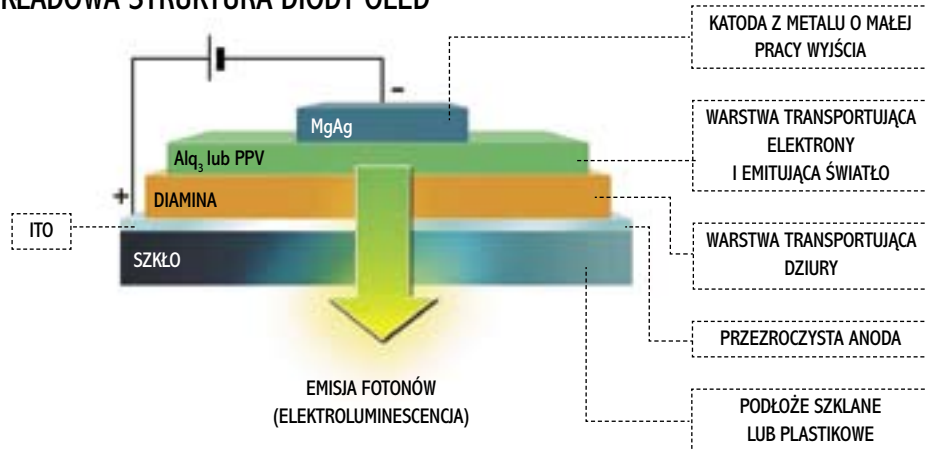
Pierwsze OLED-y miały niską wydajność konwersji energii elektrycznej na światło, ponieważ wstrzykiwanie ładunków do kryształów organicznych wymagało stosunkowo wysokich napięć. Trzeba pamiętać, że zarówno kryształy, jak i amorficzne substancje organiczne nie mają swobodnych ładunków elektrycznych. Aby mogły przewodzić prąd elektryczny i (elektro)luminescować, trzeba do nich wstrzykiwać elektrony lub odprowadzać je na zewnątrz, wytwarzając dziury (ładunki dodatnie). Ważnym osiągnięciem było uzyskanie w 1977 roku w kryształach antracenu silnej elektroluminescencji o zewnętrznej wydajności kwantowej na poziomie 4-6% (przez zewnętrzną wydajność kwantową rozumie się liczbę fotonów emitowanych z powierzchni urządzenia w przeliczeniu na liczbę wstrzykniętych elektronów lub dziur).

➤ Przy produkcji nowych źródeł światła OLED firma Novaled wykorzystwała aż 160 patentów. Niektóre z takich diod mogą świecić nawet 100 tys. godzin.



Fot. M. Szwarczak (2x); Siemens, Novaled

PRZYKŁADOWA STRUKTURA DIODY OLED



Badania w latach 70. i 80. XX wieku przesunęły uwagę naukowców z kryształów na cienkie warstwy organiczne, które mogą lepiej przewodzić prąd, i pozwoliły skoncentrować się na dwóch zagadnieniach o kluczowym znaczeniu: wstrzykiwaniu nośników ładunku do warstwy organicznej i wytwarzaniu jednorodnych, cienkich warstw. Wtedy też do budowy OLED-ów zaproponowano organiczne struktury wielowarstwowe, co umożliwiło znaczne zmniejszenie napięcia zasilania.

Przełomowe znaczenie miały opublikowane w 1987 roku przez C. Tanga i S. VanSlyke'a z firmy Eastman

Kodak wyniki prac nad dwuwarstwową diodą organiczną, której konstrukcja stanowi wzorec dla obecnie produkowanych diod OLED. Na płytce szklanej, pokrytą pełniącą funkcję anody warstwą przewodzącego (i przezroczystego!) tlenku cynowo-indowego (ITO – Indium-Tin-Oxide) naniesiono warstwę (około 75 nm) diamiiny aromatycznej. Zadaniem diamiiny było transportowanie dziur do umieszczonej na niej warstwy materiału luminescującego (około 60 nm). Materiałem tym był fluorujący związek metaloorganiczny (kompleks glinu z hydroksychinoliną, tris-(8-hydroksychinolino)glin – w skrócie Alq_3), będący jednocześnie medium przenoszącym elektrony. Do warstwy Alq_3 przylegała elektroda ze stopu magnezu i srebra (MgAg). Dioda Tanga i VanSlyke'a emitowała zielone promieniowanie już przy napięciu 2,5 V, przetwarzając elektrony na światło z wydajnością blisko 1% (skuteczność świetlna 1,5 lm/W) i mogła

IRYD – PIERWIASTEK Z PRZYSZŁOŚCIĄ

Rozwój OLED-ów zmieni rynek surowców potrzebnych do ich produkcji. Z substancjami organicznymi nie powinno być kłopotów, gorzej będzie z komponentami nieorganicznymi. Powłoki z tlenku cynowo-indowego są powszechnie stosowane jako anody przewodzące w diodach OLED i wyświetlaczach ciekłokrystalicznych. Rosnące zapotrzebowanie na płaskie wyświetlacze (zarówno OLED, jak i LCD) spowodowało gwałtowny wzrost cen irydu z 70 dolarów za kilogram pod koniec 2002 roku do niemal 1000 obecnie. Nietrudno zgadnąć, że rozwój oświetleniowych OLED-ów spowoduje duży wzrost zużycia tego rzadkiego metalu i dlatego już dziś trwają prace nad polimerowymi substytutami ITO. Trudniej będzie zastąpić iryd, używany w charakterze emitera trypletowego. Rzut oka na rynki metali wskazuje, że nie są one jeszcze świadome nadchodzącego wzrostu zapotrzebowania na ten bardzo rzadki metal. Roczna światowa produkcja irydu wynosi obecnie kilka ton (wydobycie złota – ponad tysiąc ton), a cena sięga 400 dolarów za uncję. Mimo że występuje znacznie rzadziej, metal ten jest tańszy o 40% od złota. Być może dlatego, że iryd na razie stosuje się głównie do utwardzania końcówek długopisów i piór wiecznych. Co się jednak stanie, gdy iryd zaświeci w milionach diod OLED?



Iryd jest niedocenionym pierwiastkiem. Na co dzień spotykamy go w końcówkach długopisów i piór. Czy wkrótce zobaczymy go w naszych lampkach?

pracować około 100 godzin. Jej luminancja (jaskrawość) przekraczała 1000 cd/m², była więc większa niż typowego ekranu telewizora (500 cd/m²).

Z powodu problemów z długookresową stabilnością warstw organicznych naukowcy zainteresowali się tzw. skoniugowanymi polimerami organicznymi. Zapewniają one transport ładunków elektrycznych i mają dużą wydajność kwantowej luminescencji. W roku 1990 grupa kierowana przez R. Frienda z Uniwersytetu w Cambridge opracowała polimerową diodę luminescencyjną (PLED lub P-OLED – Polymer Organic Light Emitting Diode), w której światło było emitowane z warstwy półprzewodzącego poli(p-fenylene-winylen) – PPV. Z polimeru tego można wykonywać jednorodne cienkie warstwy o wysokiej jakości strukturalnej, które po przyłożeniu napięcia rzędu 15 V emitują intensywne, żółtozielone światło. Wydajność pierwszej diody z PPV nie była wprawdzie imponująca (0,05%), ale badacze brytyjscy wskazali, jak ją poprawić. Ich sugestie okazały się trafne i dziś wiele firm produkuje PLED-y na podstawie opatentowanej przez nich technologii.

Prace naukowców z Kodaka i Cambridge zapoczątkowały dwa kierunki rozwoju OLED-ów: w jednym emitarami są małe cząsteczki organiczne (np. Alq₃), w drugim wykorzystuje się elektroluminescencję z łańcuchów polimerowych. Produkcja OLED-ów małowymiarowych wymaga nanoszenia poszczególnych warstw w próżni, co podnosi koszty. Diody te wytwarza się zazwyczaj na podłożu szklanym, nie są więc one elastyczne. Technologia produkcji diod polimerowych (opracowana przez założoną przez naukowców brytyjskich firmę Cambridge Display Technologies – CDT) nie wymaga próżni, a warstwy materiałów organicznych nanosi się w niej z roztworów na podłożu przez tzw. nakładanie obrotowe (spin coating) i metodami druku atramentowego. Ostatnio opracowano także OLED-y hybrydowe, w których warstwa emisyjna składa się z nieprzewodzących polimerów dotowanych cząsteczkami pełniącymi funkcję emitatorów i nośników ładunku.

100% sprawności

Edison w poszukiwaniu najlepszego włókna do żarówki przebałał ponad 1600 materiałów. W przypadku OLED-ów naukowcy poszukują substancji, dzięki którym diody stałyby się wydajniejsze i bardziej wszechstronne. Okazuje się bowiem, że jeśli z cząsteczek warstwy emisyjnej używa się tylko fluorescencję (ramka na stronie 24), to – bez uwzględniania późniejszych procesów – maksymalna

TELEWIZOR W RULONIE

Czas OLED-ów oświetleniowych dopiero nadchodzi, natomiast wyświetlacze OLED już kilka lat temu dojrzały do komercjalizacji i pozwalają konstruować np. telewizory wielkości karty kredytowej. Miniaturowe OLED-y coraz częściej stosuje się w wyświetlaczach cyfrowych kamer i aparatów fotograficznych, telefonów komórkowych i odtwarzaczy MP3, dzięki czemu uzyskuje się lepszą jakość i rozdzielczość obrazów, które teraz można oglądać nawet z boku, patrząc na wyświetlacz pod dużym kątem. Prawdziwej rewolucji można spodziewać się w monitorach komputerowych i telewizorach. Samsung Electronics zaprezentował w maju 2005 roku 40-calowy telewizor z matrycą aktywną wykonaną z OLED-ów. Już dziś możemy wyobrazić sobie zwijane w rulon ekrany telewizyjne, plakaty reklamowe zmieniające się na życzenie klienta lub gazety w postaci aktualizowanych na bieżąco paneli OLED, które po przeczytaniu będzie można po prostu złożyć. W raporcie z maja 2006 roku amerykańska firma NanoMarkets prognozuje, że rynek OLED-ów i elastycznych wyświetlaczy przekroczy 10 mld dolarów w 2011 roku i sięgnie niemal 15 mld dwa lata później.



Jeden z najbardziej spektakularnych przykładów zastosowań diod OLED. Widoczny powyżej telewizor o przekątnej 40 cali opracowała firma Samsung.



W odtwarzaczu MP3 EGGE zamontowano kolorowy ekran OLED-owy o przekątnej jednego cala.

OLED-y coraz częściej spotykamy w popularnych urządzeniach, np. w telefonach komórkowych i w cyfrowych aparatach fotograficznych. Powyżej: aparat EasyShare LS633 firmy Kodak, obok telefon SGH-P310 firmy Samsung.



W porównaniu z klasycznymi źródłami światła, panele z diod OLED mogą mieć duże rozmiary. Na zdjęciu: prototyp opracowany przez firmę GE ma formę kwadratu o boku 60 cm.

Jeszcze do niedawna źródła wykorzystujące diody LED wydawały się najlepszym rozwiązaniem problemów z oświetleniem. Czy jednak wytrzymają konkurencję z diodami OLED? Na zdjęciu: źródło światła LED XLamp 7090 firmy Cree.

teoretyczna wewnętrzna wydajność kwantowa diody z tzw. emiterem singletowym wynosi zaledwie 25%. Jest to ograniczenie wynikające z praw fizyki.

Dalsze zwiększanie wydajności OLED-ów jest możliwe tylko pod warunkiem przekształcenia energii pozostałych stanów wzbudzonych (tzw. trypletowych) na użyteczne kwanty światła. Udało się to w 1998 roku badaczom z Uniwersytetu Princeton i Uniwersytetu Południowej Kalifornii, kierowanym przez S. Forresta i M. Thompsona. Wykorzystali oni zjawisko przeniesienia energii wzbudzenia między cząsteczkami i zastosowali fosforyzujące kompleksy ciężkich metali (pierwotnie pochodnej porfiry z platyną), które przejmowały energię ekscytonów trypletowych (wzburzeń przemieszczających się z cząsteczki na cząsteczkę) i zamieniały ją na światło. W takich fosforescencyjnych diodach organicznych (PHOLED – Phosphorescent Organic Light Emitting Diode) stało się możliwe wykorzystanie wszystkich ekscytonów powstających w rekombinacji ładunków. Tym samym osiągnięto 100-procentową wewnętrzną wydajność kwantową! Odkrycie to przesunęło granicę skuteczności świetlnej OLED-ów z 20 lm/W, czyli takiej, jaką mają najwydajniejsze żarówki, do 80 lm/W, czyli poziomu typowego dla świetlówek, i sprawiło, że diody organiczne stały się poważnymi kandydatkami na źródła światła do ce-



łów oświetleniowych. Jednocześnie gwałtownie wzrosło zainteresowanie emiterami trypletowymi. W rezultacie na przełomie wieków w laboratoriach zabyły kompleksy irydu.

Okazało się, że dzięki temu rzadkiemu metalowi daje się uzyskać efektywne, wielowarstwowe OLED-y, emitujące z poszczególnych warstw światło niebieskie, zielone i czerwone, które po odpowiednim wymieszaniu pozwalają otrzymać światło białe. Dziś liczba kompleksów irydu opatentowanych z uwagi na zastosowanie jako emiter w OLED-ach idzie już w setki, a diodowe źródła światła białego (WOLED – White Light Organic Light Emitting Diode) biją rekordy skuteczności świetlnej. W lipcu 2006 roku Konica Minolta zademonstrowała emitującą białe światło diodę o skuteczności świetlnej 64 lm/W (co odpowiada świetlówece), luminancji 1000 cd/m² i oczekiwanej trwałości eksploatacyjnej 10 tys. godzin. Konica Minolta planuje uruchomić produkcję tej diody w roku 2007 i do roku 2011 uzyskać ze sprzedaży 175 mln dolarów.

Jakie korzyści z rozpowszechnienia nowych źródeł światła będzie miał zwykły człowiek? Przede wszystkim zaoszczędzi wydatków na energię. OLED-y wyróżnia ponadto dowolność kształtu i możliwość wykonywania z nich świecących płaszczyzn o dużej powierzchni. Zaletami są giętkość i niewrażliwość na naprężenia mechaniczne (w przypadku użycia podłoży polimerowych), a także ogromne możliwości doboru barwy emitowanego promieniowania. Być może już niedługo z naszych pokoi znikną żyrandole i lampy. Nie będą potrzebne, gdyż świecić będzie po prostu cały sufit, ściana, a nawet – przezroczyste w ciągu dnia – okno.

DR INŻ. JERZY KARPIUK jest pracownikiem naukowym Instytutu Chemii Fizycznej PAN w Warszawie.

