

CERCETARI PRIVIND STUDIUL UNUI CORP DE ILUMINAT BAZAT PE TEHNOLOGIA OLED

ALVADANEI Cătălin¹, CERNICA Vlad², CONSTANTINESCU Cristina¹, MARIN Claudia², NEAGU Magda¹, PAVALUCĂ Marius³

Conducător științific: Conf.dr.ing. Nicolae IONESCU, S.L. Ing. Ionuț GHIONEA

REZUMAT: Lumea diodelor organice emițătoare de lumină (OLED) reprezintă una dintre cele mai interesante domenii de cercetare științifică din domeniul dispozitivelor (optoelectronice). Eforturile puternice realizate în ultimii ani dar și cele actuale cu privire la OLED-uri au condus la o tranziție rapidă de la cercetare academică la piață, cu toate că încă există o problemă cu privire la durata scăzută de viață a acestor produse comparativ cu cele tradiționale. Cu toate acestea, materialele electroluminoscente organice dar și dispozitivele vor fi următoarea generație de emițători de lumină datorită calităților excepționale precum consum redus de energie, zone mari de afișare și flexibilitate ridicată (imposibilă pentru alte materiale emițătoare de lumină).

CUVINTE CHEIE: OLED (Organic Light Emitting Diode), PMOLED, AMOLED, iluminare, optoelectronică.

1 INTRODUCERE

În această lucrare este prezentat conceptul de diode organice emițătoare de lumină (OLED) ca o tendință modernă a dispozitivelor emițătoare de lumină, precum și structura și modul acestora de utilizare.

În prezent, tehnologia OLED este folosită atât la ecranele de televizor, monitoare de calculator, sisteme portabile mici, ceasuri, publicitate, informare sau indicare, cât și în sursele de lumină pentru a lumina spațiile interioare cât și pe cele exterioare.

OLED (prescurtare din engleză de la Organic Light-Emitting Diode) este o componentă electronică în formă de folie foarte subțire

¹Specializarea Design Industrial și Produse Inovative, Facultatea IMST;

E-mail: cristina.alexandra00@yahoo.com

²Specializarea Inginerie Avansata Asistata de Calculator, Facultatea IMST;

³Specializarea Ingineria Nanostructurilor Proceselor Neconventionale, Facultatea IMST.

luminoasă făcută dintr-un material organic semiconductor.

Comparând cu LED, tehnologia OLED este ieftină, neavând nevoie de un monocristal scump, dar eficiența și lumina produsă sunt la ora actuală încă mai scăzute, iar durata de funcționare este mai scurtă. Desigur însă că se lucrează intens la depășirea acestor dezavantaje.

În ceea ce privește luminozitatea OLED-urilor, în ultima vreme s-au făcut mari progrese, fiind acum posibil să se renunțe la iluminarea suplimentară a fundalului/suportului (backlight).

De la descoperirea lor, cu mai bine de 50 de ani în urmă, diodele organice emițătoare de lumină au fost considerate elemente cheie în special pentru utilizarea în tehnologia de afișare. Această tehnologie devine rapid o alegere viabilă pentru eficiența producerii de lumină de ultimă generație.

Spre deosebire de tehnologia LED, cea OLED folosește elemente care își generează propria lumină, nemaifiind nevoie de o extra-sursă de lumină. Un televizor cu tehnologie OLED produce culori vibrante bazându-se pe curentul electric, și nu are nevoie de curent activ pentru producerea unei

nuanțe de negru reale (true-black). Astfel, televizoarele cu această tehnologie de imagine sunt mult mai subțiri, oferă nuanțe de negru mult mai reale și consumă mult mai puțină energie.

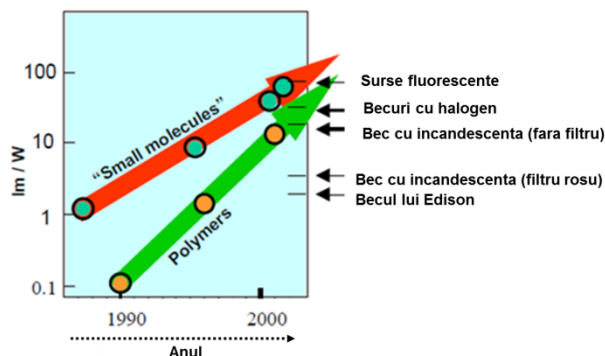


Fig. 1. Evoluția eficienței luminoase ale dispozitivelor OLED monocrome, în comparație cu sursele de lumină existente. [Kohari and Kollar 2013]

2 ISTORIC

Primele observații cu privire la electroluminescența materialelor organice, aparțin echipei conduse de A. Bernanos de la Universitatea Nancy din Franța. La începutul anilor 1950, aceștia au aplicat tensiuni electrice mari asupra unor materiale organice. Mai târziu, în 1960, M. Pope și o parte dintre colaboratorii săi de la Universitatea din New York au fost primii cercetători care au observat electroluminescența în curent direct, în vid, pe un cristal pur de antracen. Ulterior, aceștia au repetat experimentele pe cristale de antracen dopate cu tetracen, utilizând un electrod de argint la 400 de volți. Grupul de lucru condus de Pope a menționat în 1965 că în absența unui câmp electric extern, electroluminescența din cristalele de antracen este cauzată de recombinarea dintre un electron și un gol din cristal și au estimat nivelul energetic al antracenului de conducere al curentului electric ca fiind superior energiei sale de excitație (Baoxiu, Wang et al. 2011).

Electroluminescența materialelor polimerice a fost studiată de R. Partridge de la National Physical Laboratory din Marea Britanie. Dispozitivul său era format dintr-un strat de poli (n-vinil carbazol) cu o grosime de 2.2 micrometri, situat între doi electrozi.

Rezultatele proiectului au fost brevetate în 1975 și publicate ulterior în 1983 (Sprenard, Bonrad et al. 2004, Geffroy, Le Roy et al. 2006, Shinar and Shinar 2008).

Puțin mai târziu, în 1987, a fost obținută prima diodă cu o structură formată din două straturi (unul utilizat pentru transportul golurilor și unul utilizat pentru transportul electronilor), în care recombinarea și emisia de lumină aveau loc într-un strat organic. Acest dispozitiv care a redus tensiunile utilizate pentru operare, cu o îmbunătățire considerabilă a eficienței, a coincis cu începutul perioadei de cercetare și producție a dispozitivelor OLED (Tang and VanSlyke 1987, Xu and Jinfa 2000).

3 PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

OLED este o diodă care emite lumină, cu un strat electroluminescent radiant format dintr-un compus organic compus organic, care răspunde lumina ca răspuns la un curent electric. Acest strat de semiconductor organic este situat între doi electrozi (anod și catod), iar cel puțin unul dintre acești electrozi este transparent (Sweatman 2001, Shinar and Shinar 2008). Potrivit Wikipedia, semiconductorul este "un material a cărui rezistivitate este cuprinsă între cea a conductoarelor și izolatoarelor". Dacă în materialele metalice, curentul este reprezentat de un flux de electroni, în semiconductori acesta este reprezentat fie de un flux de electroni, fie de un flux de goluri din structura electronică a materialelor.

Materialele organice conduc curentul electric datorită unor reacții chimice care duc la pierderea de electroni din molecule. În funcție de numărul de electroni lipsă aceste materiale prezintă diferite valori ale conductivității electrice și de aceea sunt considerate semiconductoare organice (Sweatman 2001, Hong and Lee 2011).

La început, baza polimerică a dispozitivelor OLED era formată dintr-un singur strat organic, însă în prezent multe dintre dispozitivele OLED încorporează în structura lor un strat conductor și un strat de emisie. Cercetările recente au îmbunătățit eficiența dispozitivelor cu aproximativ 20% utilizând o metodă denumită heterojuncțiune graduală, prin care compoziția chimică a stratului

conductor este modificată gradual cu o substanță de dopare, până se ajunge la compoziția chimică a stratului de emisie.

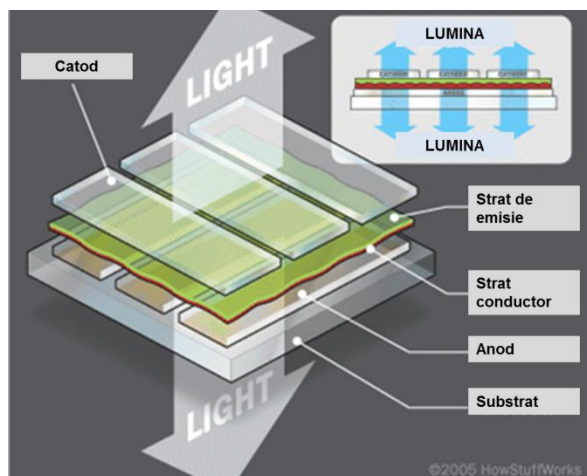


Fig. 2. Structura OLED [Stolka 2002]

În timpul funcționării, asupra dispozitivului se aplica un curent electric, astfel încât anodul să rămână pozitiv în comparație cu catodul. Un fascicul de electroni și goluri străbat dispozitivul de la către anod: fasciculul este injectat în stratul organic prin catod și retras din acesta prin anod. Forțele electrostatice formate ca urmare a acestor interacțiuni unesc electronii și golurile într-un « exciton », o stare hibridă între electron și gol, iar după dezintegrarea excitonului are loc relaxarea nivelelor de energie ale electronilor, fenomen însoțit de emisia de radiație electromagnetică a cărei frecvență aparține regiunii vizibile, deci este emisă lumină.

Anodul este ales în funcție de transparența optică, conductivitatea electrică și stabilitatea chimică. Oxidul de indiu este preferat ca material pentru anodi, deoarece este transparent pentru lumina vizibilă și permite injecția de goluri în stratul organic. Pe de altă parte, metale precum calciul și bariul sunt de cele mai multe ori alese ca și catodi deoarece permit injecția de electroni în stratul organic. Aceste metale sunt însă foarte reactive la contactul cu aerul și se degradează rapid. De aceea, pentru protecția dispozitivelor OLED catodul este acoperit cu un strat de aluminiu.

Cercetările au arătat că proprietățile anodului, și mai precis topografia interfeței anod-strat organic, au un rol deosebit de important în ceea ce privește

eficiența, performanțele și durata de viață a dispozitivelor OLED. Imperfecțiunile de la suprafața anodului scad forțele de adeziune de la interfața anodului cu stratul organic crescând rezistența electrică și permitând apariția frecventă a unor puncte întunecate, afectând totodată durata de viață a dispozitivului (Underwood 2000, Sweatman 2001, Sprengard, Bonrad et al. 2004, Geffroy, Le Roy et al. 2006, Kalyani and Dhoble 2012).

(Fig.1.). Totodată, panourile OLED pot utiliza fie o matrice-pasivă (PMOLED, Fig.3), fie o matrice-activă (AMOLED, Fig.4). Matricea-pasivă se folosește în special pentru terminalele de tip smartphone/tabletă, iar cea pasivă este utilizată în terminalele cu dimensiuni mari ce acceptă o rezoluție mult mai mare.

Matricele pasive OLED sau PMOLED utilizează o proiecție de electroni pentru a genera imagini. În ciuda consumului redus de electricitate și a imaginii de calitate, ecranele de acest fel nu au o luminozitate ridicată pentru a susține diagonale mari.

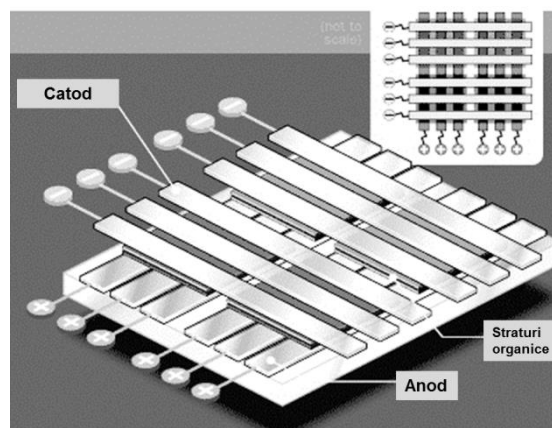
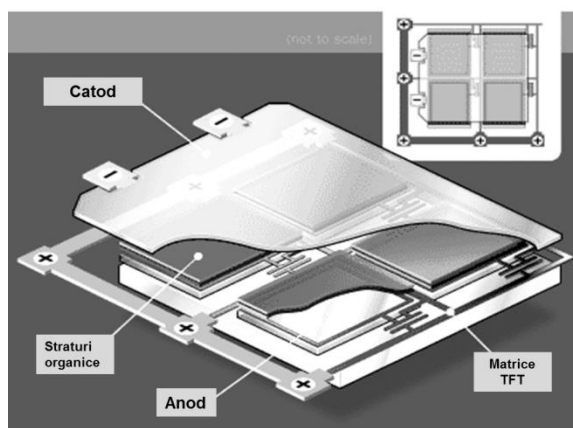


Fig.3. Schema PMOLED (OLED cu matrice pasivă) [Stolka 2002]

Matricele active OLED (AMOLED) încorporează tehnologie de la generațiile curente de monitoare precum matricea TFT și capacitorii miniaturizați. Consumul de energie este mai mare dar se pot forma ecrane cu diagonală mare și rezoluție ridicată.

Televizoarele OLED au prețuri ridicate și nu au devenit un produs de masă, în schimb telefoanele se bucură din plin de tehnologiile AMOLED (Underwood 2000).



**Figura.4. Schema AMOLED
(OLED cu matrice activă) [Stolka 2002]**

4 EVOLUȚIA DISPOZITIVELOR OLED

La apariția dispozitivelor OLED, în 1960, ecranele electronicilor (display-urile) erau dispozitive destul de simple și mici, cu un cost redus. Industria nu era suficient de ambițioasă pentru a solicita afișare grafică sau măcar liniară, de aceea se căuta un dispozitiv care putea să afișeze o singură literă sau cifră. Au fost create astfel câteva tipuri de dispozitive alfanumerice. Acestea se bazau pe filamente incandescente, în care porțiuni de filament erau utilizate pentru a afișa o singură literă sau un singur număr. Aceste dispozitive erau în realitate construite din tuburi vidate cu o viață relativ scurtă.

Pentru a trece peste limitările acestei tehnologii a fost dezvoltat un display bazat pe semiconductoare cu antracen ce emiteau lumina. Așa cum, am menționat anterior, în 1987, un grup de cercetători de la Laboratoarele Kodak au descoperit că anumite materiale organice cu masă moleculară redusă emit lumină prin recombinație atunci când sunt străbătute de un curent electric. Primul material de acest gen a fost Alq₃, bazat pe aluminiu și producea o lumină verde. Speranțele extrem de mari ale cercetătorilor cu privire la noul material se datorau faptului că acesta producea o lumină foarte puternică (Tang and VanSlyke 1987, Underwood 2000).

De-a lungul timpului, Kodak a dezvoltat materiale organice luminoase pentru alte culori, inclusiv roșu, verde, albastru și alb. Pioneer

Corporation din Japonia a fost prima companie care a introdus în producția sa noul tip de display, OLED, display-ul bazat pe diode organice emițătoare de lumină. Începând din 1998, Pioneer a produs sisteme audio pentru automobile și telefoane celulare ce utilizau display-uri bazate pe noile materiale descoperite de Kodak (Saxena, Jain et al. 2009).

Un remarcabil display color de 5,5 inci construit de Sanyo a fost prezentat în mai 2000. Alte materiale organice au fost studiate și proprietățile de emisie a luminii au atras importanțe fonduri de cercetare. Astfel, Light Emitting Polymer, LEP (un polimer organic) a fost descoperit în 1989 de laboratoarele de la Universitatea Cambridge. Materialul putea fi utilizat pentru a forma o diodă, iar atunci când trecea un curent electric de voltaj redus emitea lumina în mod similar cu o diodă obișnuită. Philips Electronics Corporation a fost prima firmă care a utilizat licența CDT (Cambridge Display Technology) și a adus-o pe piață. Tehnologia OLED este utilizată în prezent în multiple aplicații comerciale precum ecranele (display-urile) telefoanelor mobile, ale dispozitivelor media portabile, în radiourile auto sau în camerele digitale. Aplicarea tehnologiei OLED în dispozitivele portabile este de interes deoarece un semnal luminos precum cel emis de un dispozitiv OLED îmbunătățește vizibilitatea în lumină solară, cu un consum energetic redus (Rahman, Manut et al. 2014).

Phillips Lighting a dezvoltat dispozitive OLED sub denumirea "Lightblade", iar Novaled AG din Germania a lansat în septembrie 2011 o linie de lămpi de birou bazate pe această tehnologie ("Victory"). De asemenea, o serie de ecrane OLED au fost utilizate în ceasuri fabricate de Fossil sau Diesel. În 2014, Miysubishi Chemical Corporation a dezvoltat o tehnologie OLED cu o durată de viață de 30.000 de ore, de doua ori mai mare decât a dispozitivelor convenționale.

5 AVANTAJELE TEHNOLOGIEI OLED

La momentul actual nu se poate spune dacă această tehnologie este cea mai bună de pe piață însă aduce o serie de avantaje.

Printre acestea, se numără tipul de lumină produsă, extrem de asemănătoare cu lumina naturală.

Cel mai puternic avantaj al tehnologiilor OLED este că display-ul emite lumină, cantitatea de curent este extrem de redusă și nu necesită o iluminare frontală sau din spate. Un display pe cristale lichide tradițional folosește 5% din putere pentru afișare și 95% pentru iluminarea acesteia. În cazul OLED, iluminarea nu este necesară. Pentru un notebook aceasta se traduce în mărirea de 3 ori a duratei de viață a bateriei.

De asemenea un alt avantaj al panourilor de iluminare OLED constă în ușurința de reglare a intensității luminii, realizarea unei lumini difuze sau chiar de a concentra sursă de lumină de un anumit punct sau pe o anumită zonă.

Display-urile OLED au și avantajul de a afișa o scenă ce poate fi vizualizată din orice unghi. De asemenea, ele pot fi puse pe materiale diverse. Unele dintre cele mai spectaculoase aplicații ale acestei tehnologii o reprezintă ecranele transparente, cele flexibile și chiar folosirea suportului textil sau de hârtie. Display-urile LCD de astăzi au întârzieri de 4-20 milisecunde iar timpul de răspuns al noului display OLED de la Sony este de 0,01 milisecunde, fiind de câteva sute de ori mai rapid. Tehnologia OLED dă posibilitatea de a crea display-uri flexibile ce pot fi introduse chiar și într-un pix. Chiar și calitățile pe care le au în prezent LED-urile justifică sumele investite până acum în dezvoltarea tehnologiei: un LED poate ilumina până la 50.000 de ore, adică de 50 de ori mai mult decât un bec de 60 de wați, sau 6 ani dacă ar lumina continuu.

Deja folosită în prezent la smartphone-uri și tablete, tehnologia OLED s-ar putea extinde în domeniul din cele mai diverse, odată cu dezvoltarea ei. Spre exemplu, la fabricarea de lămpi de iluminare pentru birou, la construcția de indicatoare tip foite luminoase și flexibile, la realizarea afisajului de bord al autoturismelor, în diferite aplicații industriale și medicale, în broadcasting, sau chiar la confecționarea unor materiale textile care ar putea revoluționa lumea modei.

Noua tehnologie pare a fi foarte promițătoare și marile companii producătoare de aparatură electronică sunt dispuse să investească în dezvoltarea ei, considerand-o tehnologia viitorului.

Se estimează că în 2-3 ani, fabricanții de electronice de consum vor trece deja la producția de masă de televizoare OLED.

Progresele considerabile ale științei și tehnologiei electroluminescenței organice au fost aplicate pentru fabricarea de ecrane plate. Dacă viteza progresului se menține constantă în următorii 10 ani, electroluminescența organică poate avea un impact simțitor nu doar asupra ecranelor ci și asupra iluminării în general. În particular, o serie de dispozitive care să emită lumină albă cu ajutorul tehnologiilor OLED pot deveni concurenți serioși ai dispozitivelor convenționale, atât în ceea ce privește performanța cât și costurile.

Ecranele bazate pe electroluminescență organică, aplicate pe substrat rigid sau flexibil sunt destinate cuceririi pieței de ecrane plate și este posibil să domine această piață în următorii ani. O serie de ecrane OLED, cu matrice activă sau pasivă, cu dimensiuni mici și costuri reduse, au pătruns deja în producția de masă și prezintă numeroase avantaje:

- Dispozitivul este foarte subțire (mai puțin de 300 nanometri grosime)
- Masă redusă
- Eficiență crescută a puterii luminoase
- Timp de răspuns scurt, necesar pentru vizionarea optimă a animațiilor sau cadrelor în mișcare
- Unghi de vedere larg, fără pierdere de imagine sau luminozitate (peste 170 grade)
- Auto-emitaătoare, ceea ce elimină nevoia unei surse-suport de iluminare
- Afișaj colorat care acoperă toate nuanțele spectrului vizibil
- Flexibilitate

Pe lângă toate acestea, dispozitivele OLED dispune de o stabilitate temporală, ceea ce le face potrivite pentru multiple aplicații, în special în domeniul echipamentelor portabile.

6 DEZAVANTAJELE TEHNOLOGIEI OLED

Potențialul acestei tehnologii este uriaș, dar mai există câteva probleme care trebuie rezolvate. Limitările duratei de viață din cauza oxidării,

caracteristicile variabile în funcție de temperatura, variațiile de nivel de negru, rezoluția reprezintă numai câteva dintre cele mai importante obstacole în lansarea în producție a acestui tip de dispozitiv. Dacă unii cercetători estimau ca în anul 2009 piața dispozitivelor bazate pe tehnologia Oled va ajunge la 3 miliarde dolari, scepticii afirmau că aceste tipuri de display-uri nu vor fi folosite niciodată pe scara largă în principal din cauza duratei de viața mici (Kohari and Kollar 2013).

Pentru ca un televizor să conțină doar tehnologie OLED, durata de viață a ecranului trebuie să fie de cel puțin 10 ori mai mare decât este în prezent. Printre dezavantajele materialelor OLED se numără rezistența redusă la contactul cu apa, durata mai scurtă de funcționare și costurile de fabricație încă ridicate.

7 ILUMINATUL CU AJUTORUL TEHNOLOGIEI OLED

Produse de iluminat OLED pot fi utilizate, în special, în locurile în care spațiul este limitat dar în care necesitatea observării detaliilor este cel mai important factor, produse precum lămpile de birou, corpuri cu diferite forme, stații de iluminat sau chiar iluminat integrat în corpurile de mobilier, acest lucru este realizabil datorită faptului că aceste placute nu produc și degajă căldură (Dodabalapur 1997, Islam, Rabbani et al. 2013).

Astfel, iluminatul cu ajutorul tehnologie OLED ar trebui utilizată pentru spațiile în care sistemele de iluminat, din componența acestora, nu reușesc să furnizeze lumină clară și uniformă. În prezent diferite firme împreună cu desing-eri încearcă să aducă pe piața corpuri de iluminat cu forme deosebite, ce folosește tehnologie OLED, cu scopul de a integra cât mai ușor și cât mai repede această tehnologie în uzul de zi cu zi.

Companiile care se ocupă în iluminatul OLED cred că tehnologia este capabilă de mult mai multe lucruri decât simpla iluminare a spațiilor dorite/necesare. Astfel că diferite firme au venit cu idei inedite pe care au aplicat tehnologia OLED (Xu and Jinfa 2000, Geffroy, Le Roy et al. 2006):

- Realizarea unui perete cu ajutorul plăcuțelor oled, partea interesantă vine în momentul în care

te apropii de acest perete, acest perete are capacitatea de a îți recunoaște fața și astfel placuțele oled ce formează conturul feței, opresc iluminat și preiau funcția de reflexie precum o oglindă, în timp ce celelalte panouri oferă o lumină ambientă necesară luminării feței dar nu jenării ochilor.

- A fost realizat un tavan iluminat cu un număr de peste 30 plăcuțe OLED ce furnizează lumina, avantajul constă în faptul ca panourile pot lumina concomitent sau nu, pot regla placuțele, individual, spre zona în care dorești să luminezi, sau chiar să schimbi culoarea luminii cu una favorită.
- Poate exista posibilitatea de a fi aplicată pe o suprafață precum un geam. Acest lucru are avantajul ca poți selecta ca pe timpul zilei să pot vedea pe fereastră sau nu, schimbând opacitatea placuțelor oled, iar pe timpul nopții să îți poți lumina încăperea tot din zona ferestrei. S-a mai verificat faptul că aceste plăcuțe au capacitatea de a absorbi razele solare precum un panou fotovoltaic, însa, încă se fac cercetări pe această temă.

8 CONCLUZII

Materialele organice au devenit un interes major al specialiștilor în optoelectronică datorită multiplelor lor avantaje, comparativ cu materialele anorganice. Materialele organice pot fi prelucrate pentru fabricarea unor dispozitive precum circuite, ecrane sau dispozitive de identificare prin radiofrecvență, pe substraturi din plastic, utilizând tehnici moderne de printare. În orice caz, cel mai atrăgător avantaj este posibilitatea încorporării funcționalității în design (Stolka 2002, Pode 2001). Versatilitatea materialelor organice sintetice, precum și spectrul larg de componente disponibile pentru comercializare oferă o flexibilitate aparent infinită în modificarea structurilor moleculare, deci și a proprietăților macroscopice (Žmija and Małachowski 2009).

Până în prezent, solidele organice precum pentacenul și rubenul au depășit performanțele siliciului amorf din tranzistorii sub formă de filme subțiri (TFT, eng. thin film transistors) și de aceea sunt utilizate de diodele organice emițătoare de

lumină (OLED). Un dispozitiv OLED este bazat pe filme subțiri și este ușor de fabricat. Aceste caracteristici, precum și gradul redus de distorsionare a imaginii îl recomandă pentru utilizarea în ecrane flexibile.

Ecranele disponibile la momentul actual utilizează una dintre tehnologiile: CRT (Cathode Ray Tube), PDP (Plasma Display Panel), ELD (Electro Luminescent Display), LCD (Liquid Crystal Display) și OLED (Organic Light Emitting Diode), însă piața de desfacere a acestor produse solicită în permanență dispozitive inovatoare care să fie portabile, atrăgătoare și ecologice. Producătorii de ecrane trebuie să își dezvolte tehnologiile pentru a construi dispozitive mai ușoare și mai subțiri, care să consume puțină energie și în același timp să îmbunătățească calitatea imaginii. (Žmija and Małachowski 2009, Małachowski and Žmija 2010)

În prezent, o serie de cercetători din domeniul vizează îmbunătățirea ecranelor flexibile cu cristale lichide a ecranelor flexibile electroforetice, precum și a tehnologiilor OLED cu strat de emisie. Ecranele flexibile electroforetice sunt considerate cele mai dorite tehnologii de tip ecran flexibil datorită procesului de fabricație simplu și a consumului energetic extrem de redus. Pe de altă parte un ecran de tip AMOLED promite o calitate superioară a imaginii – în ceea ce privește luminozitatea, culoarea, contrastul, unghiul de vedere și timpul de răspuns – comparativ cu tehnologiile cu matrice activă bazate pe cristale lichide. Cu toate acestea ecranele de tip AMOLED mai au câteva obstacole de depășit până la producția de masă și oferă perspective foarte optimiste pentru ecranele rigide.

9 BIBLIOGRAFIE

- [1] Baoxiu, M., H. Wang, Z. Gao, X. Wang, R. C. Runfeng and W. H. Wei (2011). "Development of devices and materials for small molecular organic light-emitting diodes and hurdles for applications." *Prog Chem* 23: 136-152.
- [2] Dodabalapur, A. (1997). "Organic light emitting diodes." *Solid State Communications* 102(2): 259-267.
- [3] Geffroy, B., P. Le Roy and C. Prat (2006). "Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies." *Polymer International* 55(6): 572-582.
- [4] Hong, K. and J.-L. Lee (2011). "Review paper: Recent developments in light extraction technologies of organic light emitting diodes." *Electronic Materials Letters* 7(2): 77-91.
- [5] Islam, A., M. Rabbani, M. H. Bappy, M. A. R. Miah and N. Sakib (2013). *A review on fabrication process of organic light emitting diodes*. Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference on, IEEE.
- [6] Jaleel, S. – *OLED-The modern trend in light-emitting devices*, ER.V College of Engineering, Bangalore
- [7] Kalyani, N. T. and S. Dhoble (2012). "Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5): 2696-2723.
- [8] Kohari, Z. și Kollar, E. (2013), *Nonlinear electro-thermal modeling and field-simulation of OLEDs for lighting applications II: Luminosity and failure analysis*, Department of Electron Devices, Budapest University of Technology and Economics, Hungary.
- [9] Małachowski, M. and J. Žmija (2010). "Organic field-effect transistors." *Opto-Electronics Review* 18(2): 121-136.
- [10] Pode, R. (2011). "OLED Lighting Technology"
- [11] Rahman, N. H. A., A. Manut and M. Rusop (2014). "Review on Electroluminescence Behaviour of Organic Light Emitting Diode." *Advanced Materials Research* 832: 455-459.
- [12] Saxena, K., V. Jain and D. S. Mehta (2009). *A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices*. *Optical Materials* 32(1): 221-233.
- [13] Shinar, J. and R. Shinar (2008). "Organic light-emitting devices (OLEDs) and OLED-based chemical and biological sensors: an overview." *Journal of Physics D: Applied Physics* 41(13): 133001.
- [14] Sprengard, R., K. Bonrad, T. K. Daeubler, T. Frank, V. Hagemann, I. Köhler, J. Pommerehne, C. R. Ottermann, F. Voges and B. Vingerling (2004). *OLED devices for signage applications: a review of recent advances and*

remaining challenges. Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting, International Society for Optics

- [15] Stolka, M. (2002), *Organic light emitting diodes for general illumination*, Department of Energy – Office of Building Technology, State and Community Programs, OIDA.and Photonics.
- [16] Sweatman, D. (2001). *Organic devices: a review.* Microelectronic Engineering Research Conference.
- [17] Tang, C. W. and S. VanSlyke (1987). "*Organic electroluminescent diodes.*" Applied physics letters 51(12): 913-915.
- [18] Underwood, I. (2000). "*A review of microdisplay technologies.*" SID@ EID.
- [19] Xu, C. and G. P. T. Jinfu (2000). "*The review and development of organic thin film electroluminescence [J].*" OPTICAL INSTRUMENTS 2: 009.
- [20] Žmija, J. and M. Małachowski (2009). "*Organic Light Emitting Diodes operation and application in displays.*" Archives of Materials Science and Engineering 40(1): 5-12.