

ELECTRONICA IMPRIMATĂ ȘI FLEXIBILĂ

Titu-Marius I. BĂJENESCU, prof.dr.ing.
Elveția

1. INTRODUCERE

Electronica imprimată (EI) a apărut ca una dintre tehnologiile-cheie nu numai pentru electronică, ci și pentru toate tipurile de mașini și echipamente controlate electric. EI este o tehnologie care fuzionează fabricarea electronică cu imprimarea grafică și de texte. Prin această combinație se pot fabrica produse electronice de înaltă calitate, care sunt subțiri, flexibile, portabile, ușoare, de dimensiuni diferite, ultra eficiente din punct de vedere al costurilor și ecologice (figura 1). Toate aceste caracteristici reflectă implicarea profundă a inginerilor în dezvoltarea tehnologiei EI.

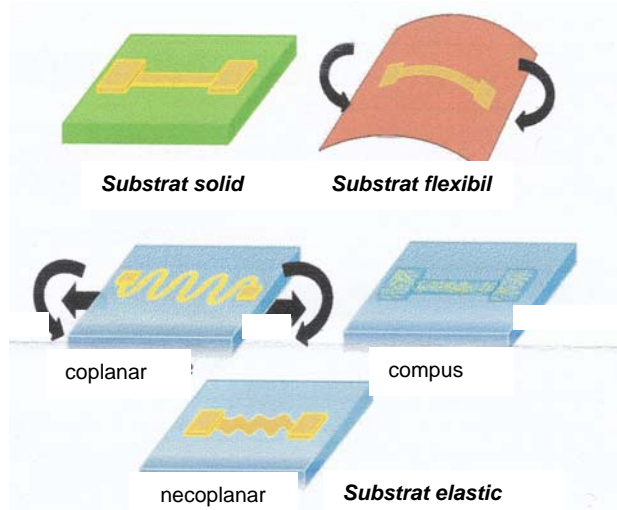


Figura 1. Substraturi solide, flexibile și elastice.

Electronica imprimată trebuie să funcționeze și să corespundă scopului pentru care a fost proiectată, să fie fiabilă și durabilă.

Cu toate acestea, această tehnologie mixtă nu este nouă; originea ei datează de dinainte de anul 1950. Pe atunci, unii specialiști au început să folosească imprimarea pentru a face cablajul pe plăci cu circuite imprimate. Figura 2 prezintă un exemplu [1].

Cercetătorii de la Nippon Telegraph and Telephone au constatat că gravura heliografică era una din metodele promițătoare de imprimare pentru precizia cu pas fin. Imprimarea n-a apărut ca soluția finală pentru cabluri; litografia filmelor de cupru lipite pe plăci cu circuite imprimate organice

ranforsate cu fibre de sticlă a condus la tehnologia standard pentru asamblarea cablajelor.

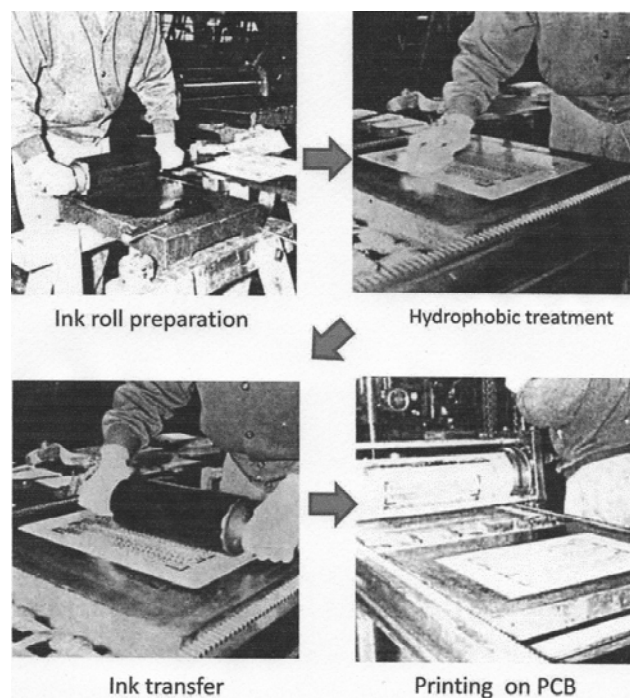


Figura 2. Offset heliografic de plăci cu circuite imprimate (PCB) la NTT [1].

În același timp, substratul ceramic al plăcilor cu cablaje prelucrate prin serigrafie, folosit în producția de capsule ceramice timp de o generație, este doar o prezență minoră pe piața de plăci cu cablaj imprimat. Următoarele soluții de imprimare au fost panourile de afișare. Imprimarea cu pas fin a măștilor tuburilor catodice TV, până la 0,1 mm, a fost crucială pentru fabricarea panourilor fine de afișare. În zilele noastre, ecrane plate, cum ar fi ecranele cu cristale lichide (LCD) și afișoare cu plasmă, au înlocuit tubul catodic. LCD-urile, în special, au devenit principala tehnologie standard de afișare. Astfel de ecrane plate sunt, de asemenea, asamblate cu procese de acoperire și de imprimare.

Pe de altă parte, componente pasive ceramice, cum ar fi condensatoare, rezistențe și antene, au nevoie de un proces de imprimare fină. Gravura serigrafică și ecranul de imprimare au fost utilizate pe scară largă pentru producerea de componente pasive ceramice. Astăzi miliarde de cipuri mici de componente, între care cea mai mică dimensiune este de 0,4 x 0,2 mm, sunt fabricate continuu, cu

cerneală conținând nanoparticule de Ni, pe foi verzi de ceramică. Un alt exemplu sunt celulele solare. Celulele solare bazate pe tehnologia cu Si necesită, de asemenea, ecran de imprimare și imprimare cu jet de cerneală în procesul lor de fabricație. Liniile de grilă și de bus sunt formate prin serigrafie cu paste de Ag conținând sticlă. Contactul planului din spate este format, de asemenea, din paste de Al serigrafiate. În plus, imprimarea cu jet de cerneală se aplică de obicei pentru a forma o linie de dopaj sub liniile de Ag pe planurile din față. Majoritatea produselor electronice actuale tratează plăcile cu circuite imprimate, care necesită cablaj și lipire, ca una din tehnologiile esențiale. În special la lipire, calitatea serigrafiei pastelor de lipit joacă un rol-cheie în fabricarea produselor de mici dimensiuni și de înaltă funcționalitate.

2. ISTORIA ELECTRONICII FLEXIBILE (EF)

EF are o istorie lungă. Orice material subțire este flexibil. Acum patruzeci de ani celulele solare cu siliciu monocristalin au fost "subțiate" cu scopul de a face să crească raportul lor putere / greutate, pentru a putea fi utilizate în sateliți extraterestri. Fiind subțiri, celulele sunt flexibile. Astăzi, circuitele integrate realizate pe siliciu sunt "subțiate" pentru a deveni conforme cu noua orientare, astfel încât posesorul unei cărți bancare inteligente n-o rupe atunci când se așază pe ea. Flexibil are multe sensuri și poate însemna multe calități: deformabil, format conform, elastic, ușor, incasabil, *roll-to-roll* manufacturabil, sau domeniu larg. Domeniul n-are frontiere, are limite deschise, care se deplasează cu dezvoltarea și aplicarea acestuia. Un segment nou al electronicii flexibile este în mare măsură legat de circuitele active cu tranzistoare cu film subțire (*thin-film transistor* TFT). Pentru comunitatea industrială actuală, electronică flexibilă înseamnă afișoare și senzori flexibili, textile electronice și piele electronică.

Primul TFT flexibil datează din 1968, când Brody și colegii săi au făcut un TFT de telur pe o bandă de hârtie și au propus să se folosească matrici TFT pentru adresarea afișării. În anii următori, grupul Brody a făcut TFT-uri pe o gamă largă de substraturi flexibile, inclusiv Mylar, polietilenă, și folie de ambalaj din aluminiu anodizat. TFT-urile pot fi îndoite cu o rază de 1/16" și continuă să funcționeze. Acestea pot fi tăiate în jumătate de-a lungul direcției de canal, ambele jumătăți rămânând operaționale [3, 4]. La mijlocul anilor 1980, industria afișoarelor cu cristale lichide (*active-matrix liquid crystal display* AMLCD) cu matrice

activă a demarat în Japonia, prin adoptarea mașinilor cu depunere ameliorată de vapori chimici cu plasmă de mare suprafață (*plasma enhanced chemical vapor deposition* PECVD), care fuseseră dezvoltate pentru fabricarea celulelor solare a-Si:H. Succesul a-Si:H bazat pe industria AMLCD și demonstrarea unei celule solare a-Si:H pe substrat flexibil au stimulat cercetarea pe noi substraturi, a circuitelor de tip film subțire pe bază de siliciu. În anul 1994, Constant și colab. de la Iowa State University au demonstrat circuite a-Si:H pe substraturi flexibile de poliimidă [5]. În 1996, a-Si:H TFTs au fost realizate pe folie de oțel inoxidabil flexibil [6]. În anul 1997 a fost raportat siliciu polycristalin (poli-Si) TFT realizat pe substraturi din plastic folosind recoacerea cu laser [7, 8]. De atunci, cercetarea în domeniul electronicii flexibile s-a extins rapid, iar multe grupuri de cercetare și companii au demonstrat afișoare flexibile pe oțel sau pe substrat din folie de plastic. Așa de exemplu, în 2005, Philips a demonstrat un prototip de afișare electroforetică care poate fi rulat [9] și Samsung a anunțat un panou flexibil 7" cu cristale lichide [10]. În 2006, Universal Display Corporation și Centrul de Cercetare din Palo Alto au prezentat un prototip de afișor cu ecran organic flexibil conținând OLED-uri, realizat pe folie de oțel [11].

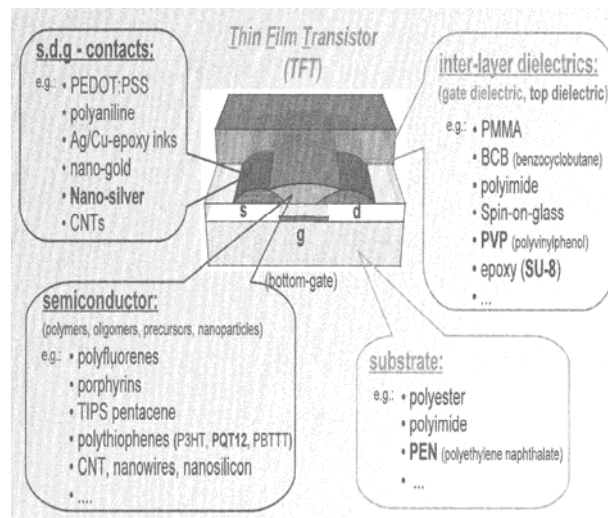


Figura 3. Părțile constitutive ale unui TFT (după Palo Alto Research Center [2]).

3. AFIȘOARE ORGANICE EMITĂTOARE DE LUMINĂ

De la descoperirea OLED-urilor, la sfârșitul anilor 1980, tehnologia s-a dezvoltat rapid și cu unghiuri de vizualizare mai largi, timp de răspuns mai rapid, tensiuni de funcționare mai mici și

consum de energie, eventual, mai redus decât AMLCDs cu iluminare din spate. Din cauza structurii lor cu film subțire, OLED-urile sunt o alegere naturală pentru afișoare flexibile. Cele două tipuri de materiale OLED sunt mici molecule cu eficiență mai mare și polimeri conjugați. OLED-uri cu molecula mică sunt de obicei preparate prin evaporare termică, iar polimer OLED prin procesarea soluției. Aceasta din urmă permite mai multe etape de fabricație potențial ieftine, cum ar fi spin de acoperire, imprimare cu jet de cerneală și pulverizare, și este ușor compatibilă cu fabricarea de la rulo la rulo. De aceea sunt în curs eforturi pentru a dezvolta precursori de soluții procesabile pentru fabricarea OLED cu molecule mici.

Electroluminescența din materiale organice a fost studiată pentru prima dată în 1960. Interesul față de electroluminescența organică a fost reînviat de descoperirea electroluminescenței în molecula mică a diodelor organice cu film subțire, realizate prin evaporare termică, făcută de Tang și VanSlyke [12].

Emisiunea de lumină vizibilă ale LED-urilor polimer organice (PLEDs) a fost raportată de Burroughs și colab. în 1990, și a atras atenția, în continuare. PLED a fost depus prin acoperire centrifugă cu un polimer precursor al unei soluții procesabile, care a fost convertit cu un polimer conjugat prin încălzire la 250°C. Un an mai târziu, în 1991, Braun și Heeger au raportat utilizarea unui polimer conjugat solubil care elimină nevoia de procesare la temperaturi înalte. La scurt timp după aceea, un ecran flexibil OLED pe PET a fost demonstrat de Gustafsson et al. Ei au folosit o soluție procesabilă MEH-PPV ca material activ și polimerul conductor PANI drept contact, injectând gaura. În anul 1997, a-Si:H TFTs au fost integrate pe folie de oțel cu un OLED orientat deasupra [13]. Multe grupuri de cercetare au demonstrat ulterior OLED-uri cu matrice activă pe substraturi din plastic sau din oțel flexibil. O secțiune tipică transversală a unui OLED realizat pe un substrat din plastic transparent având deasupra o matrice activă emițătoare de pixeli este prezentată în figura 4.

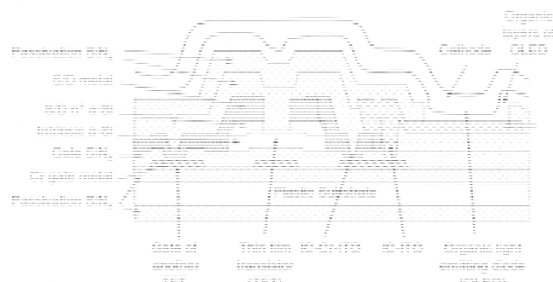


Figura 4. Secțiune schematică printr-un a-Si:H TFT și un OLED pe substrat de plastic transparent.

Electronii și găurile injectate sub polarizare directă se combină pentru a realiza polaron-excitonii. Această dezintegrare radiativă prin recombinarea electron-gaură produce electroluminescență. Stiva OLED conține straturi de injecție de sarcină și de transport care servesc pentru a menține excitonii departe de recombinarea neradiativă la nivelul contactelor. Straturile de injecție și de transport sunt realizate din materiale organice, de exemplu PEDOT / sulfonat de polistiren sau PANI. Arhitecturile OLED alternative includ OLED-uri emițătoare inversate, care au catodul în contact cu substratul, și OLED-urile transparente ai căror anodi și catodi sunt transparente. Cea mai mare provocare pentru a face afișoare flexibile OLED este cererea pentru rate extrem de mici de pătrundere a umidității și a oxigenului pentru a asigura OLED-urilor o durată de viață lungă acceptabilă. Oxidarea la interfața organice-catod poate inhiba injecția de sarcină și are ca rezultat pete negre.

4. FABRICAȚIE PE FOI PRIN PROCESAREA LOTULUI

Dispozitivele și circuitele electronice și panourile de afișare sunt realizate prin prelucrarea pe loturi. Folia de substraturi flexibile, se taie în foi și ele vor servi drept înlocuitor pentru plăcile de sticlă rigide sau plachetele de siliciu:

- pe un suport rigid, cu fața în sus și în vrac;
- pe un suport rigid, cu fața în sus sau în jos și legat la suport pe durata prelucrării;
- într-un cadru de tensionare, cu fața în sus sau în jos;
- într-un cadru, cu fața în jos și în vrac;
- conectat electrostatic la un suport rigid;
- atașat magnetic la un suport rigid.

Substraturile rigide sunt cele mai potrivite pentru picioare libere și montarea liberă. Flexibilitatea substratului este dată de rigiditatea flexiunii sale $D = Et^3/12(1-\nu^2)$, unde E este modulul lui Young, t este grosimea substratului, iar ν este raportul său Poisson. a-Si:H TFTs au fost realizate pe substraturi polimerice menținute liber într-un cadru [14]. Substratul a fost aplatizat și conectat temporar cu apă la placa de sticlă pentru fotolitografie.

Cu toate acestea, menținerea liberă a substratului este o tehnică limitată la laborator, deoarece filmele dispozitivelor se pot fisura, ori eșantionul se poate curba începând de la deformarea între filmele depuse și substrat.

Deoarece curbura variabilă corespunde dimensiunilor variabile ale eșantionului aplatizat, orice variație a curburii induse de stres între etapele

de aliniere este sinonimă cu nealiniere în suprapunerea măștilor [15]. Lipirea temporară substratului laminat pe un suport rigid pentru prelucrare poate îmbunătăți stabilitatea dimensională a substratului. Lipirea poate fi dorită în mod special în cazul în care materialele anorganice ale dispozitivului sunt depuse pe substraturi polimere conforme, din cauza constrângerii mari pe care această combinație o poate genera. Adezivul trebuie să asigure suficientă rezistență la forfecare între substrat și suport, să reziste substanțelor chimice ale procesului, să degazeze puțin și să elibereze puțini contaminanți. La sfârșitul prelucrării trebuie să poată fi îndepărtat, fără să deterioreze componentele electronice. Adezivii termoplastici asigură rezistența necesară împotriva solvenților și pot fi detașați prin încălzire. Ei impun o limită maximă a temperaturii procesului, care este în mod necesar mai mică decât cea mai mare temperatură de lucru a substratului. Această cerință face ca fereastra de proces să fie îngustă și, prin urmare, ea poate degrada performanțele dispozitivului. Deoarece forța mecanică necesară pentru dezlipire poate cauza deteriorarea dispozitivelor și poate reduce randamentul, vor fi necesare echipamente speciale pentru dezlipit în cazul fabricației. Circuitele flexibile sunt o tehnologie în creștere, în zona de interconectivitate electrică și par să ofere o performanță îmbunătățită cererilor multor produse din secolul douăzeci și unu. Caracterul compact al circuitelor flexibile și densitatea mare de conexiuni electrice pe care o pot realiza oferă considerabile economii de greutate, spațiu și costuri, în comparație cu plăcile rigide cu circuite imprimate (PCB-uri), plus sârme de conexiuni și cablaje. Tehnologia oferă potențialul de a reduce costurile totale de interconexiuni electrice cu până la 70%, reducerea de cablu și utilizarea de cabluri cu până la 75%. Trebuie remarcat faptul că circuitele imprimate flexibile au înlocuit cablajele construite "hard" în multe aplicații.

5. CIRCUITE FLEXIBILE – O DEFINIȚIE

Există, în continuare, confuzie când vrem să definim ce este un circuit flexibil. Când spunem "un circuit flexibil", imaginea – în mintea celor mai mulți – va fi aceea a unui circuit imprimat curbat, constând, de obicei, dintr-un film flexibil, având în interior un model de conductoare de cupru.

Deși imaginea nu este prea departe de adevăr, pentru a înțelege mai bine circuitele flexibile, este important să stabilim, de la bun început, o definiție

de lucru. IPC (fostul *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*), dat fiind rolul lui de a pune la punct standarde și orientări pentru industria electronică, a stabilit o astfel de definiție.

6. CIRCUIT IMPRIMAT FLEXIBIL

Un aranjament cu model de circuite imprimate și componente care utilizează un material de bază flexibil, cu sau fără capac flexibil.

Definiția aceasta, deși strict exactă, face puțină dreptate complexității tehnologiei, dar are rolul de a transmite o parte din potențialul dat de variațiile disponibile în materiale de bază, materiale conductoare, și finisări de protecție.

7. CIRCUITE FLEXIBILE CU MAI MULTE STRATURI

Circuite flexibile care au trei sau mai multe straturi de conductoare sunt denumite flexibile cu mai multe straturi. Aceste circuite sunt complexe la construcție și au costuri ridicate, dar ele satisfac cererile producătorilor, consumatorilor și designerilor pentru densități de circuit din ce în ce mai mari.

8. CONFIGURAREA MATERIALULUI

Într-un circuit flexibil tipic, se folosesc patru clase distincte de materiale:

- material de bază (film dielectric / substrat flexibil)
- conductoare (folie sau acoperire conductoare)
- adeziv (opțional)
- strat de acoperire (film sau smalt).



Figura 5. Configurarea materialelor într-un circuit flexibil tipic

Alte materiale folosite includ numeroase finisaje de suprafață și acoperiri anti-aburire, rigidizări integrale sau substraturi suport, toate concepute

pentru a oferi proprietăți suplimentare și proprietăți de performanță ansamblului circuitului sau pentru a mări ușurința de fabricație. Un circuit simplu tipic este reprezentat în figura 5.

9. SUBSTRATURI FLEXIBILE

Există două opțiuni pentru substraturi flexibile: sticla polimerică și cea subțire. Având în vedere că substratul flexibil reprezintă componenta fundamentală de plecare pentru afișoare, substraturile flexibile se confruntă cu cele mai mari provocări în ceea ce privește compatibilitatea cu toate celelalte straturi de afișare necesare care trebuie să fie integrate pe ele. Una dintre cele mai mari provocări pentru substraturi polimerice este temperatura de proces necesară pentru straturi de afișare ulterioare. Este foarte puțin probabil ca afișoarele flexibile, în viitorul apropiat, să fie complet organice; mai degrabă ele vor fi hibride cu straturi și componente anorganice și organice. Cu toate acestea, temperaturile proceselor pentru mai multe straturi anorganice au scăzut și stabilitatea termică a substanțelor polimerice s-a îmbunătățit foarte mult.

Aceasta reprezintă un exemplu în cazul în care tehnologiile converg într-un mod optim pentru a activa afișoare flexibile. Cealaltă soluție pentru substraturi flexibile este bazată pe materiale organice. Sticla are proprietăți de barieră finală, este rezistentă la temperatura procesului de afișare și la substanțe chimice, dar îi lipsește flexibilitatea și este ușor de manipulat în substraturile polimerice. Pentru a îmbunătăți stabilitatea mecanică a flexibilității și procesării, se depune pe sticlă un strat polimeric. Soluția hibridă permite să se valorifice atributele pozitive ale sticlei și-i permite să fie mai flexibilă și să aibă un proces de manipulare convenabil.

Avantaje: (1) modele portabile și modulare; (2) impact grafic maxim; (3) extrudare mai puțin vizibilă; (4) opțiuni de retro-iluminare LED; (5) componente numerotate pentru o instalare ușoară; (6) reconfigurable (10 ft. la 20 ft./305 la 610 cm); (7) garanție pe viață pentru manoperă

10. CONCLUZII

Dezvoltarea recentă a multor componente și tehnologii de sprijin pentru aplicații flexibile care au în vedere afișoare plate, cum ar fi substraturi, straturi conductoare, straturi barieră, materiale electro-optice, tehnologii de tranzistoare cu filme subțiri și procese de fabricare, accelerează pătrunderea pe piață a conceptului de afișare cu ecran plat flexibil.

Bibliografie

1. **Suganuma K.** Introduction to Printed Electronics, Springer, New York, 2014.
2. **Jürgen Daniel et al.** Flexible and printed electronics for displays and image sensors. Palo Alto Research Center, 2008, <https://www.parc.com/content/attachments/flexible-printed-electronics-suncheon.pdf>
3. **Brody T. P.** The thin-film transistor – a late flowering boom. IEEE Trans. Electron. Devices ED-31(1984), 1614-1628
4. **Brody T. P.** The birth and early childhood of active matrix – a personal memoir. J. Soc. Inf. Disp. 4(3), 1996, 113-127.
5. **Fraunhofer EMFT.** Reliability tests on flexible printed foils and laminates, http://www.project-cosmic.eu/docs/autumn_school2012/Erwin%20Yacoub-George_Presentation%20Reliability%20tests%20on%20flexible%20printed%20circuit%20foils%20and%20laminates.pdf
6. **Theiss S. D., Wagner S.** Amorphous silicon thin-film transistors on steel foil substrates. IEEE Electron Devices Lett. 18(1996), 578-580.
7. **Yang N. D., Harkin G., Bunn R. M., McCulloch D. J., Wilks R. W., Knapp A. G.** Novel fingerprint scanning arrays using polysilicon TFT's on glass and polymer substrates. IEEE Electron Devices Lett. 18(1997), 19-20.
8. **Smith P. M., Carey P. G., Sigmon T. W.** Excimer laser crystallization and doping of silicon films on plastic substrates. Appl. Phys. Lett. 70(1997), 342-344.
9. <http://research.philips.com/newscenter/archive/2005/050902-rolldisp.html>
10. <http://www.samsung.com/PressCenter/PressRelease/PressRelease.asp?seq=20051128.0000217879>
11. <http://www.universaldisplay.com/press/press-2006-2-7.htm>
12. **Tang C. W., VanSlyke S. A.** Organic Electroluminescent Diodes. *Appl. Phys. Lett.* 51(1987).
13. **Wu C. C. et al.** Integration of organic LEDs and amorphous Si TFTs onto flexible and lightweight metal foil substrates. IEEE Electron Device Lett., 18(1997), 609-612.
14. **Gleskova H. et al.** a-Si:H TFTs made on polyimide foil by PE-CVD at 250°C,” Proc. Mater. Res. Soc., 508, 73-78.
15. **Cheng I. C. et al.** Stress control for overlay registration in a-Si:H TFTs on flexible organic-polymer-foil substrates. J. Soc. Inf. Disp. 13(7), 563-568.

Recomandat spre publicare: 16.11.2016.