

# TISKANA ORGANSKA ELEKTRONIKA

## UVOD

V zadnjih štiridesetih letih so bili silicijevi, germanijevi in galijarzenidni polprevodniki, izolatorji (silicijevi oksidi in nitridi) in kovine, kot so aluminij in baker, glavni gradniki v industriji polprevodnikov [1]. Vsi ti materiali so neorganskega izvora.

V zadnjem času je bilo vloženo veliko energije v razvoj organskih materialov, ki bi jih lahko uporabili v elektronskih sistemih, t. i. *organski elektroniki* [2]. Predvsem gre za izkoriščanje zanimivih lastnosti organskih materialov (polimerov) in hibridov (organsko-anorganskih kompozitov), kot so gibkost, plastičnost, cenenost in sorazmerna enostavnost tehnologije, za pripravo drugačnih in cenejših produktov elektronske industrije.

Ime organska elektronika izvira iz dejstva, da v teh sistemih prevladujejo organski materiali. Različni polimeri in majhne izhodiščne molekule za njihovo tvorbo (monomeri in oligomeri) so na osnovi ogljika, ki je tudi osnovni gradnik živih celic. V nasprotju z organsko elektroniko temelji konvencionalna elektronika na neorganskih materialih.

Polprevodni in prevodni polimeri so nenasičeni organski kompleksi, v katerih je mogoč prenos naboja. To lastnost imajo monomeri in oligomeri s konjugiranimi vezmi, kjer se menjava enojne in dvojne (ali trojne) vezi. Kadar so take makromolekule med seboj povezane, dobi-

mo polimer in po njegovih verigah je možen prenos naboja. Za dovolj veliko prevodnost je treba take polimere dopirati, kar se zgodi v njihovem nepolimeriziranem stanju.

Visokopredvodne organske polimere so leta 1976 odkrili Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid in Hideki Shirakawa. Leta 2000 so prejeli tudi Nobelovo nagrado za kemijo, in sicer prav za razvoj oksidirane poliacetilena, dopiranega z jodom. Kmalu nato je sledil razcvet v razvoju novih polimerov in kaže, da nekateri izmed njih v posebnih razmerah lahko dosežejo celo lastnosti superprevodnikov. Profesor Alan J. Heeger je v svojem govoru ob podelitvi Nobelove nagrade prevodne polimere imenoval »četrt generacija polimernih materialov« [3].

Poliaceten (PA) je ena od oblik biološkega pigmenta melanina. V verigi PA se menjavata enojna in dvojna vez, kar je najenostavnejši potreben pogoj za elektroprevodnost. Veliko prevodnih polimerov ima verigo iz benzenovih obročev; vsak od njih je 6-atomni cikel enojnih in dvojnih vezi. Med najpogosteje raziskovanimi je polianilin (PANI), med najbolj priljubljenimi za uporabo pa sta poliparafenilen vinilen (PPV) in polietilen dioxitofen (PEDOT). Področje polprevodnih in prevodnih polimerov se zelo hitro razvija in ponuja obilo priložnosti za temeljne in aplikativne raziskave na interdisciplinarnem področju, kjer se prepletata kemija in fizika.

Mehanizem prevodnosti omejenih materialov vključuje resonančno stabilizacijo in delokalizacijo elektronov vzdolž celotne polimerne verige, obstoj mobilnostne reže (pomeni področja, kjer je mobilnost nemogoča), možnost tuneliranja (pomeni prehod nosilca naboja skozi potencialno oviro) in fononsko gnane preskoke (pomeni preskok naboja iz ene potencialne jame v drugo – čez oviro) [3], [4]. Te lastnosti se kontrolirajo z dopiranjem in nadzorovanim nanašanjem plasti, v nekaterih primerih tudi v monomolekularnem sloju. Različni načini dopiranja vodijo v različne aplikacije. Kemijsko in elektrokemijsko dopiranje daje strukture s stalno prevodnostjo, ki jo snov obdrži, vse dokler naboji niso kemijsko odstranjeni ali kompenzirani. Taki materiali so uporabni za transparentne elektrode, antistatične prevleke, prevodna vlakna, elektrokemijske baterije, pametna okna, elektronski papir in podobno. Dopiranje je lahko povzročeno tudi s svetlobo. Taka snov je prevodna, vse dokler se naboj ne sprost, kar je zanimivo za fotonapetostne celice. Dopiranje polimera je možno tudi s pomočjo zunanje električne napetosti, kar se lahko uporablja v svetlečih se diodah (LED) in tranzistorjih.

Prevodni polimeri so lažji, fleksibilnejši in cenejši kot neorganski prevodniki. Te ugodne lastnosti jim odpirajo veliko novih možnosti alternativne uporabe [5], [6], [7], [8]. Omogočajo

oblikovanje novih aplikacij, ki so bile do sedaj pri konvencionalni uporabi bakra ali silicija nemogoče.

Od prevodnih polimerov se pričakuje, da bodo igrali pomembno vlogo v razvoju računalnikov na bazi polimerov (na ravni molekul in atomov). Sodobne raziskave kažejo, da je upravljanje posameznih makromolekul možno, kar lahko že v bližnji prihodnosti vodi do delujočih nanostruktur.

Na splošno imajo organski prevodni polimeri večjo upornost in je zato njihova električna prevodnost manjša od prevodnosti kovin. Trenutno se take raziskave izvajajo na različnih možnostih dopiranja organskih polprevodnikov, kot je poliaceten (enostavni melamin) z majhnim deležem prevodnih kovin, ki bi povišale prevodnost. Posebna pozornost je namenjena tudi raziskavam, kako povečati urejenost prevodnih polimerov. Kot kaže, je to ena od ključnih lastnosti polimerov, zaradi katere so lastnosti prevodnih polimerov še vedno precej drugačne od lastnosti kovin [9].

Kakor koli že, za veliko aplikacij bodo neorganski prevodniki še lep čas nezamenljivi.

## ORGANIZACIJE NA PODROČJU TISKANE ORGANSKE ELEKTRONIKE

Vizija OE-A združenja (*Organic Electronic Association*) je zgraditi most med znanostjo,

tehnologijo in aplikacijami na področju razvoja novih tehnologij pri izdelavi organske elektronike. OE-A vzpostavlja unikatno platformo za nacionalno in internacionalno sodelovanje med proizvajalci in raziskovalnimi institucijami na področju organske elektronike.

Ustanovljena je bila leta 2004 in v kratkem času je vzpostavila sodelovanje več kot 80 članov, od Avstrije, Belgije, Finske, Francije, Nemčije, Izraela, Nizozemske, Švedske, Švice, Tajske, Anglije in Združenih držav Amerike.

Članice prihajajo iz različnih področij, kot so:

- ⊕ dobavitelji materialov in komponent,
- ⊕ dobavitelji opreme in orodij,
- ⊕ proizvodni in sistemski povezovalci,
- ⊕ sistemski povezovalci in distributerji,
- ⊕ končni uporabniki,
- ⊕ raziskovalne institucije.

Organska elektronika je trenutno še v zgodnji fazi razvoja, a se tehnologiji pripisuje velik potencial in zelo dobra tržna napoved [10].

## PRILOŽNOSTI RAZVOJA ORGANSKE ELEKTRONIKE

Tiskana elektronika je izraz, ki pomeni razmeroma novo tehnologijo, ki določa tiskanje elektronike na običajne tiskovne materiale, kot so papir, plastika, tekstil, z uporabo običajnih tehnologij tiska, kot so sitotisk, fleksotisk, globoki tisk in ofsetni tisk.

Namesto običajnih tiskarskih barv se uporabljajo barve z ustreznimi električnimi lastnostmi (prevodniki, polprevodniki, dielektriki).

Kombinacija posebnih vrst nizkocenovnih polimernih materialov in uporaba tehnologij tiska visoke hitrosti omogočajo produkcijo tanke, lahke, fleksibilne elektronike z nizkimi proizvodnimi stroški. To so npr. integrirana vezja, senzorji, displeji, spominske naprave, baterije.

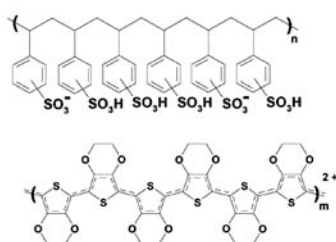
Aplikacije, kot so RFID-značke, samostojne diagnostične naprave, gibke senzorične celice, gibki displeji ali enostavne igre, so le nekaj primerov možne uporabe.

Izdelki, kot so enostavne igre in elektronske knjige, so vstopile na trg že v letu 2006. Naprave, kot so mobilni telefoni z »rolo« displeji, fleksibilne sončne celice ali radiofrekvenčne značke prihajajo na trg letos (2008), [5], [6].

## Materiali

Organska elektronika je zasnovana na električno aktivnih materialih, ki so lahko uporabljeni kot prevodniki, polprevodniki, dielektriki, luminiscenti, elektrokromatični ali elektroforetični materiali. Izbrani morajo biti pazljivo zaradi samih razmer tiska in kompatibilnosti s predhodno tiskanimi plastmi, kar vse močno vpliva na končno delovanje naprave.

Slika 1 spodaj prikazuje kemijsko strukturo organskega prevodnika (PEDOT:PSS, polimerna mešanica dveh ionomerov: polietilen dioksi tiofena s polistiren sulfonatom), ki se večinoma uporablja za tisk elektrod. Če je





**Tehnologija nanašanja na Si rezine**

Procesiranje v velikih količinah. Visoka resolucija se lahko doseže z vakuumskim nanašanjem in/ali nanašanjem na vrteče se podlage, katerim sledi optična litografija in jedkanje. Proizvodni stroški so zelo visoki.

**Hibridne tehnologije**

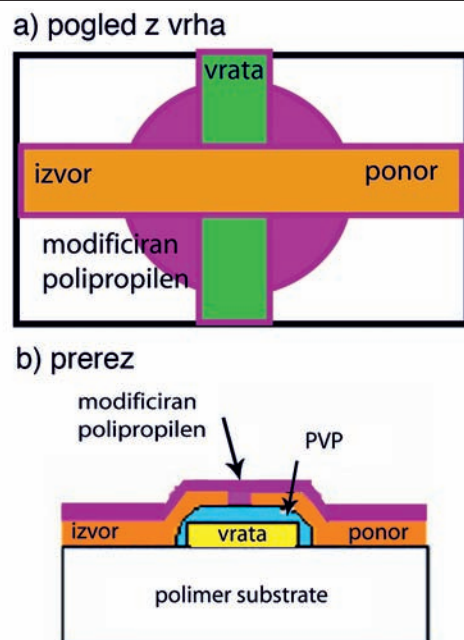
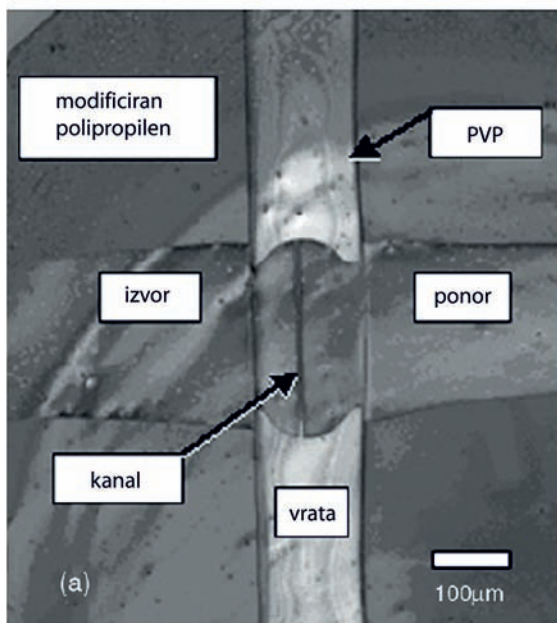
Med hibridne tehnologije se uvrščajo optična »litografija«, sitotisk ali tehnologija tiskanih vezij PCB (printed circuit board), ki uporabljajo fleksibilne, prožne materiale (npr. polimerni filmi ali papir). Nanašanje materialov poteka na vrteče se podlage, s strgalom ali z vakuumskim nanašanjem na večje površine. Kapljični tisk in lasersko zapisovanje oz. vzorčenje lahko tudi uvrščamo med hibridne tehnologije prihodnosti. Stroški proizvodnje pri uporabi hibridnih tehnologij so nižji od tehnologije nanašanja na Si rezine.

**Tiskana elektronika v enem prehodu**

Pomeni nepretrgano, avtomatsko masovno proizvodnjo organske elektronike z uporabo konvencionalnih tehnologij, ki omogočajo visoke hitrosti tiska (fleksotisk, globoki tisk, ofsetni tisk, sitotisk), uporabo fleksibilnih substratov in najnižje proizvodne stroške.

**APLIKACIJE**

Organska elektronika je platformska tehnologija, ki je zasnovana na organskih prevodnih in polprevodnih materialih. Odpira nove možnosti uporabe in izdelkov, kot so:



Slika 5. Mikroskopski posnetek organskega tranzistorja (*organic field emission transistor OFET*), narejenega z ink-jet tehnologijo, a) pogled z vrha, b) prerez [12]; (polimer substrate >> polimerna podlaga).

- ⊕ organske fotonapetostne celice (OPV) za mobilno in stacionarno uporabo,
- ⊕ organske spominske enote za potrošniške izdelke,
- ⊕ tiskani RFID, uporaben za zaščito in logistiko,
- ⊕ fleksibilne baterije za polnjenje mobilnih naprav,
- ⊕ organske TFT-podloge za displeje,
- ⊕ organski senzorji kot samostojne naprave.

Naštete aplikacije že vključujejo veliko organskih naprav, ki se lahko z medsebojnim povezovanjem združijo v različne »pametne« objekte.

Prvi izdelki organske elektronike so prišli na trg v letih 2005/06. To so npr. pasivne ID-kartice (slika 6), ki so lahko masovno tiskane na papirju in so uporabljene za kartice in igre.

Papirnate kartice vsebujejo tiskan podatkovni spomin, ki je proizveden iz elektronsko aktivnega polimera. Podatki so lahko berljivi z novorazvitim čitalcem, ki deluje v bližnjem polju. Fleksibilne, prožne litijeve polimerne baterije, proizvedene z masov-



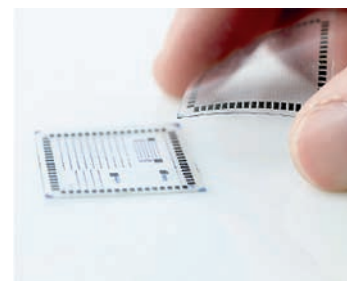
Slika 6. Interaktivne elektronske papirne kartice.



Slika 7. "Rolo" elektroforetični displeji za e-knjige in mobilne telefone.



Slika 8. RFID značka za zaščito tržne znamke.



Slika 9. Tiskan spomin (organic memory devices).

nimi tehnologijami tiska, so na trgu že nekaj let. Lahko se uporabljajo za »pametne« kartice ali druge mobilne potrošniške izdelke. Tiskani kontaktni senzorji in prvi tiskani polprevodni fotodetektorji za industrijsko, medicinsko in zaščitno uporabo so tudi že na trgu.

Dodatni produkti, kot so prožni displeji z organsko TFT-podlogo (npr. za mobilne telefone), slika 7, tiskana RFID-značka, slika 8, organske fotonapetostne

celice in organske spominske enote, so že ali bodo poskusno na trgu predvidoma letos. Pričakuje se, da bo v naslednjih dveh do petih letih omogočena masovna proizvodnja omenjenih naprav.

**Tadeja MUCK**  
**Marica STAREŠINIČ**  
 Univerza v Ljubljani  
**Marta KLANJŠEK GUNDE**  
 Kemijski inštitut