

Popularno predavanje na
Ljetnoj školi mladih fizičara,
Korčula 23-29. lipnja, 2002.godine

Novi ekrani od organskih materijala

- najprije fizika, potom tehnologija -

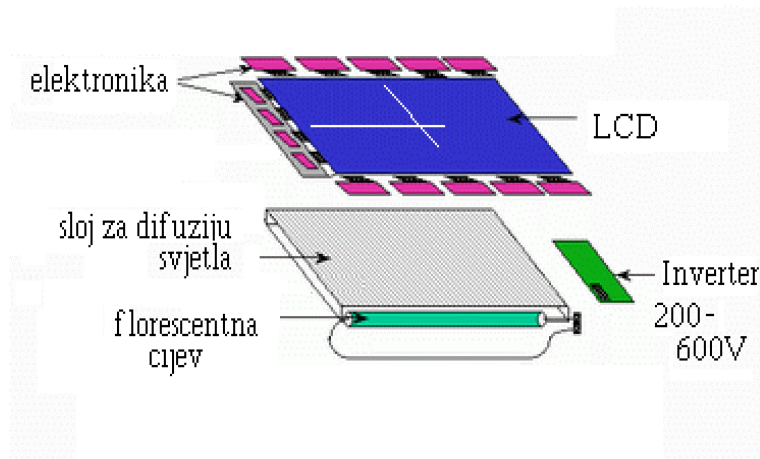
Eduard Tutiš
Institut za fiziku, Zagreb

Organski vodiči su prije dva decenija smatrani vrlo egzotičnom temom istraživanja. Danas je izgledno da će organski materijali kroz koje desetljeće zavladata u elektronici i istisnuti klasične anorganske poluvodiče i metalne žice iz upotrebe. Razlog za to je u mnogovrsnosti, niskoj cijeni i prilagodljivosti tih materijala. Ali neće samo unutrašnjost vašeg televizora ili računala biti drugačija – sam ekran bi se mogao najprije primijeniti. Sjajni ekrani velike razlučivosti, s obiljem svjetla i širokim vidnim kutom, ukupne debljine manje od milimetra, po potrebi kruti ili u obliku savitljive folije, mogli bi se pojaviti unutar godine ili dvije u trgovinama. Da li to ikoga čudi? Vjerojatno nikoga tko filmove znanstvene fantastike ozbiljno prati.

Glad za ekranima

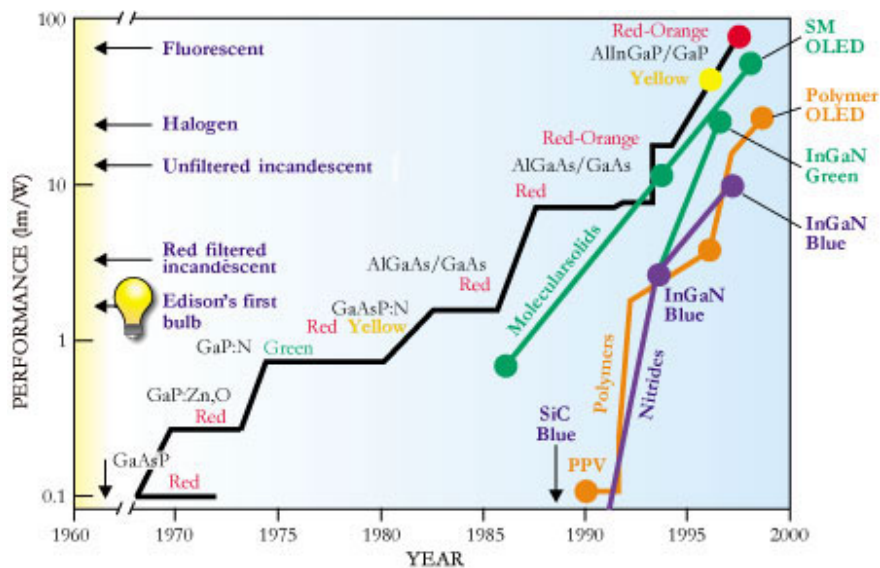
Razmjer potrebe za boljim ekranima (zaslonima) u današnje vrijeme vjerojatno je očigledan. Brzi razvoj računala i komunikacija stvorio je ogromnu potrebu preglednog prikazivanja podataka u vidu tablica i grafikona, prikaz video materijala koji se odnosi na sadržaje koji su prethodno snimljeni ili se istovremeno snimaju. Vaš slijedeći fotoaparat je vjerojatno digitalni jer posjeduje veliku razlučivost, jeftin je u upotrebi, slike se lako umnažaju i šalju. Fotografije koje se razvijaju kod fotografa će nestati u tijeku 10 godina. Stare fotografije ćemo digitalizirati. Digitalne fotografije pokazivat će se skoro isključivo s ekrana.

Ekran koje su zatekle revolucije u informatici i komunikacijama bio je relativno slabo kvalitete. Televizijski ekran, analogna naprava relativno male razlučivosti, na brzinu je poboljšan, ali je ostao težak i relativno skup. U tijeku posljednje godine dana ekrani na tekuće kristale (*liquid crystal displays*, LCD) ubrzano preuzimaju primat nad konvencionalnim ekranima na katodnu cijev (*cathode ray tube*, CRT).



Shema sastava ekrana na tekuće kristale u prijenosnim računalima

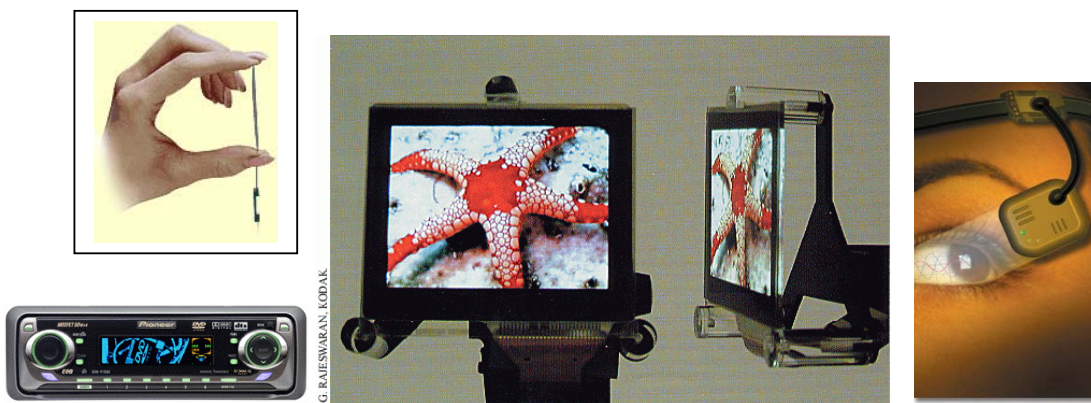
Tradicionalne mane LCD ekrana bile su loše boje, mali vidni kut, ograničeni kontrast, relativno mala količina svjetla. Ove mane su danas u određenoj mjeri otklonjene i danas je stolni LCD ekrani koje nalazimo u trgovinama ugodniji za gledanje od ekrana na katodnu cijev u istoj trgovini. Cijene takvog ekrana su na razini onih za CRT ekrane prije nekoliko godina. No, spomenute mane su dijelom ostale. I zato, dok LCD zauzima tron u svijetu ekrana, njegov skori nasljednik bira se u pozadini.



Napredak energetske efikasnosti LED dioda u proizvodnji svjetla u zadnjih nekoliko desetljeća. Većina prikaza odnosi se na anorganske LED diode, dok se one na organskoj osnovi, označene sa SM OLED (small molecules) te OLED-i na bazi polimera (Polymer OLED) počinju razvijati kasnije. (Preuzeto iz Physics Today, prosinac 2001. godine.)

Zapravo, izgleda da je nasljednik, ili bar kratka lista nasljednika, izabrana još prije godinu-dvije, kad su veliki proizvođači kao Sony, Sanyo, Phillips, Toshiba, LG i odlučili investirati u nove tvornice. Ogledne primjerke ekrana na osnovi tankih organskih slojeva (*organic light-emitting devices; organic light-emitting diodes; organic light-emitting displays: **OLED***) od prije nekoliko godina danas nasljeđuju prvi primjerci s proizvodnih traka.

Izvještaji s SID skupa *Society for Information Display* (SID) koji se krajem svibnja 2002. godine (tj. prije nekoliko tjedana) održao u Bostonu su jednoglasni: OLED ekrani će zamijeniti LCD ekrane u otprilike slijedećih pet godina. Najvažniji razlog je: ti ekrani mnogo bolje izgledaju, očaravajući svojim bojama i živošću. Uz to, oni su izvanredno tanki, uz proizvodne troškove koji bi trebali biti značajno manji od onih za LCD ekrane. Zvijezda sajma bio je Toshiba 17 palčani OLED ekran na osnovi polimera, budući da je veći i potencijalno jeftiniji za proizvodnju od OLED ekrana koji upravo izlaze na tržište.



a)

b)

c)

Organski ekrani danas: a) auto-radio s OLED ekranom Pioneer prodaje već više od godinu dana; b) tvornica Kodak/Sanyo ekrana je upravo izgrađena, a mnoge su u izgradnji; c) Tvrtka eMagin specijalizira se za OLED prikazivače koji sliku projiciraju direktno na oko i prodaje prototipove da bi potaknula njihove primjene.

Neki suparnici ili dobri susjedi

Široka paleta situacija u kojima postoji potreba za ekranima ili manjim pokazivačima omogućit će da uz dominantne tehnologije živi i niz drugih koje imaju u prednosti u nekim posebnim primjenama. U jeziku ekonomista: imamo *segmentiranje* tržišta te postojanje i pojavljivanje *niša* (jezik koji se iz ekologije prelio u ekonomiju). U velikom broju niša će živjeti proizvodi koji su zasnovani na alternativnim tehnologijama ili oni zasnovani većim dijelom na starim tehnologijama, uz daljnja poboljšanja i smanjenje cijena.

Jedan primjer su tzv. *plazma ekrani* (rade na istom principu kao i fluorescentne svjetiljke koje nalazimo po uredima) koji se već nekoliko godina prodaju kao ogromni i vrlo skupi TV prijemnici s jasnim i jakim bojama. Takvi ekrani mogli bi opstati za potrebe velikih prikaza, ako im cijena bude značajno smanjena u odnosu na sadašnju.

Ekrani koji oponašaju veliku katodnu TV cijev na mikroskopskoj skali mogli bi biti usavršeni i pojaviti se komercijalno. Radi se o tankim ekranima sačinjenim od niza ćelija u kojima se koriste iste boje za emisiju svjetla kao i u današnjim velikim TV cijevima. No umjesto užarene žice i visokog napona, kao izvor elektrona se koriste sićušni šiljci koji isijavaju elektrone pod jakim električnim poljima. No iako su električna polja velika, električni naponi su relativno niski, radi malih dimenzija naprave.

Zadnje vrijeme su značajan napredak doživjeli i izvori svjetla na osnovi anorganskih poluvodiča. Anorganski LED (*light emitting diodes*) imaju dužu povijest od OLED-a i tema su posebnog predavanja na ovoj školi, a principi rada anorganskih i organskih LED elementa imaju puno sličnosti i dosta razlika. Efikasnost, pouzdanost i cijena ovih izvora svjetla uzrokovala je njihovu komercijalnu upotrebu u nekim segmentima na mjestu klasičnih svjetiljki. Ovi izvori međutim za sada ne konkuriraju u izradi ekrana u boji velike razlučivosti (male veličine točkice).

Velik je potencijalni popis ekrana koji bi ovdje mogao slijediti. Dva stoljeća razvoja električne svjetiljke ostavio je mnogo rješenja iza sebe. Razne vrste svjetiljki možemo i danas vidjeti oko sebe, a svaka svjetiljka danas bi mogla poželjeti postati - ekran.

Želimo li svjetlo?

Pitanje učinkovitosti jedno je od ključnih za ekrane. Mjera efikasnosti pretvaranja električne energije u energiju vidljivog elektromagnetskog zračenja (jedinica: lm/W) prati sve svjetiljke i ekrane koji svjetlost proizvode. Naročito je efikasnost važna kod mobilnih uređaja čije napajanje ovisi o bateriji. Velik ekran, lagana baterija, dugo vrijeme između punjenja su još uvijek želje koje međusobno teško podnose. LED pokazivači prvih digitalnih satova i kalkulatora tako su brzo bili zamijenjeni LCD pokazivačima da se ovih prvih jedva i sjećamo. Naime, LCD elementi gotovo da i ne troše bateriju. (Ono što troši energiju kod LCD ekrana modernih prijenosnih računala su jaki izvori bijelog svjetla iza LCD elementa. Sloj tekućih kristala služi samo da propusti ili blokira svjetlost na putu do našeg oka. Mali dio energije troši se na samim LCD elementima u trenucima primjene prikaza na ekranu, u svrhu promjene orijentacije molekula u tekućem kristalu.)

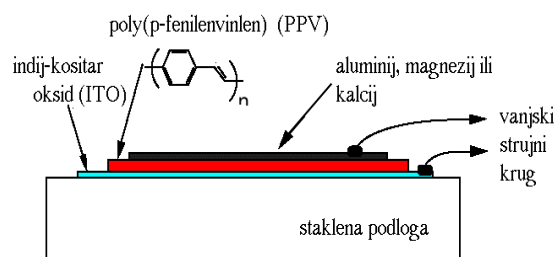
Očigledna je prednost koju za pojedine primjene imaju pokazivači koji ne troše energiju za statičan prikaz. To potiče razvoj takvih pokazivača pa njihov kontrast i površina stalno rastu, mogu se naći u boji ili monokromatski, savitljivi i tanki. Slično povijesti digitalnih satova, za očekivati je da ćemo svjetlo kod budućih digitalnih novina i elektroničkih bilježnica paliti samo povremeno. Elektronički papir i elektronička tinta mogli bi, uz svjetleće ekrane, osvojiti svoje mjesto u našim životima.

Kratki opis OLED-a

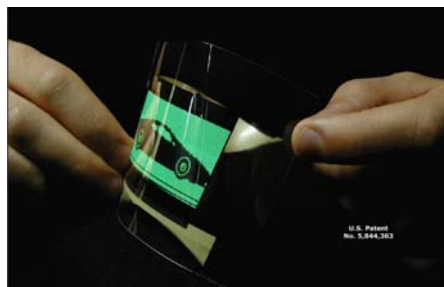
Organske svjetleće diode sastoje se od vrlo tankog organskog sloja, debljine oko 100nm, koji se nalazi između dva metalna sloja. Mehanička čvrstoća dolazi od podloge, koja je najčešće staklo, ali može biti i savitljiva prozirna folija na bazi polimera. Kad na metalne slojeve spojimo bateriju, s naponom od 3V do 10V, organski sloj proizvodi svjetlost. Boja svjetlosti ovisi o kemijskom sastavu organskog sloja. Organski sloj je sastoji od organskih molekula, što znači da atomi ugljika i vodika dominiraju u njihovom sastavu.

Ovisno o masi organskih molekula, govori se o tzv. OLED-ima na osnovi malih molekula, mase molekule je do oko 800 a.m.u. (masa atoma ugljika je oko 12 a.m.u.), odnosno o P-OLED-ima na osnovi polimera (tj. dugih lanaca koji nastaju spajanjem manjih identičnih molekula u pravilan niz). Organski slojevi OLED-a su *amorfne krutine*, tj., organske molekule u njima nasumično složene, naslanjajući se jedna na drugu.

Napon od 3V do 10V preko udaljenosti od 100nm proizvodi velika električna polja u cijelom organskom sloju. Ta su polja reda 1MV/cm, otprilike jedan red veličine veća od onih kod kojih dolazi do pojave izboja u zraku.



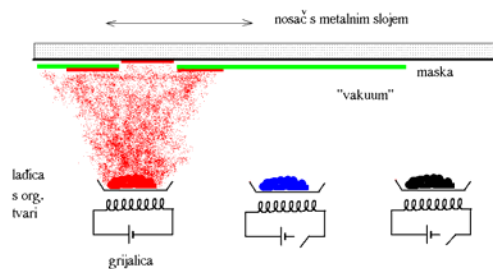
Shema jednoslojne svjetleće diode na osnovi polimera



OLED na savitljivoj podlozi (prema Universal Display Corporation).

Proizvodnja OLED-a

Proizvodnja OLED-a počinje od nosača (staklena površina ili folija na bazi polimera) na koju je nanesen indijum-kositar-oksidi (*indium-tin-oxide*, ITO) kao prozirna elektroda. Organski slojevi nanose se na više načina. Male molekule mogu se nanositi na podlogu naparavanjem u tankom sloju. Postupak se odvija u vakuumu radi štetnog utjecaja vode i kisika na svojstva kontakta i organskih slojeva.

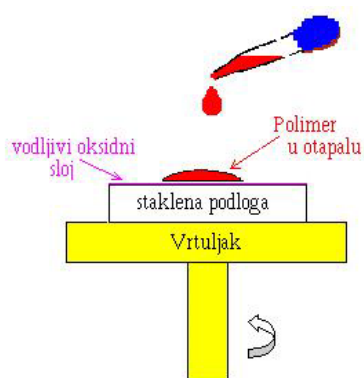


Stupanj vakuuma	Tlak [tor]	Vrijeme nastanka monosloja [s]
Atmosferski tlak	760	10^{-9}
Niski	1	10^{-6}
Srednji	10^{-3}	10^{-3}
Visoki	10^{-6}	1
Ultra visoki	10^{-10}	10^4

Nanošenje slojeva malih organskih molekula naparivanjem.. Iako se ovaj postupak relativno lako organizira u laboratoriju, postavljene vakuumirane linije za proizvodnju velikih ekrana je skuplji dio gradnje proizvodne linije.

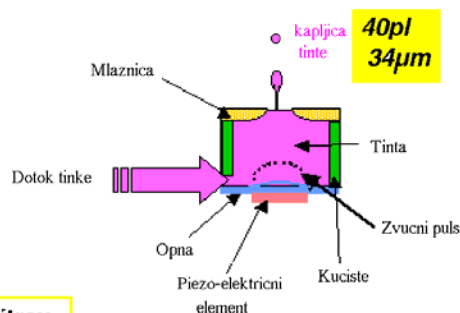
Prije naparivanja potrebno je osigurati vakuum, budući da vodena para i kisik mogu vrlo brzo promijeniti svojstva graničnih površina.

Za polimere isti postupak nije provediv radi velikih molekula koje ne možemo prevesti u paru grijanjem. No ipak, ovi materijali se mogu nanijeti u tankom sloju tako da se razrijede u otapalu, a zatim nanesu u maloj količini na površinu koja rotira. Radi rotacije dolazi do razmazivanja otopine u tankom sloju. Otapalo kasnije ishlapi. Ova metoda dobra je i jednostavna za pripremu velikih slojeva uniformnog sastava (iste boje svjetla), ali nije (uvijek) pogodna za višebojne ekrane s malim točkicama. Zbog toga je usavršena tehnika polaganja otopine u malim količinama na željene pozicije pomoću preciznog *ink-jet* pisača.



Razmazivanje otopine vrtnjom podloge je najjednostavniji način proizvodnje OLED-a na bazi polimera.

Pljuckalica tinte -- rjesenje za polimere



**Litrex
i CDT**

Za proizvodnju OLED ekrana na bazi polimera potrebno je više vrsta otopina rasporediti po površini u malim točkicama. Precizni pisač može riješiti problem. (Cambridge Display Technology)

Uloga fizičara u nastanku OLED-a

Postanak OLED-a na osnovi malih molekula potječe od otkrića Tanga i van Slykea, sredinom osamdesetih godina (*Applied Physics Letters*, 1987). Oni su otkrili pojavu elektroluminescencije (nastanak svjetla pri vođenju struje) u amorfnom materijalu sagrađenih od organskih molekula s kratkog imena Alq₃. Tang i van Slyke tada su radili u Kodakovim laboratorijima, a slične molekule ispitivale su se i još se i danas ispituju i koriste u fotokopirnim strojevima.

Elektroluminescencija u polimerima otkrivena je početkom devedesetih godina, na University of Cambridge, u laboratoriju pod vodstvom Richarda Frienda. U to doba su se već preko jednog desetljeća intenzivno istraživala električna svojstva polimera, novih "sintetskih vodiča".

Prijedlozi za korištenje organskih materijala za konstrukciju izvora svjetlosti razmatrani su potom u velikom broju u fizikalnih laboratorija i publicirali su se u nizu časopisa poput *Journal of Applied Physics* ili *Organic electroluminescence*. Pri tome su metode koje fizičari koriste za istraživanje u velikoj mjeri posljedica specifičnih svojstava samih OLED-a. Pristupi koji se kroje po mjeri objekta su karakteristični za fiziku.

Paralelno su nastavljena i fundamentalna istraživanja, eksperimentalna i teorijska, na procesima vođenja struje u polimerima, amorfnim organskim materijalima i kristalima. Osim vođenja struje ovi materijali imaju ponekad i posebna magnetska svojstva, a neki od njih hlađenjem postaju supravodiči. Ova istraživanja nemaju primarnu namjeru u primjeni, već u razumijevanju.

U trenutku kad su OLED ekrani već ušli u proizvodnju, uloga fizičara za industriju postaje sekundarna. Trenutni prioriteti u industriji OLED-a su problemi u čijem rješavanju fizičari sudjeluju, ali ne u dominantnoj ulozi. Nasuprot tome, istraživanja elektronskih procesa u organskim materijalima i na njihovim granicama s drugim materijalima ostaje skoro potpuno u domeni fizike bez obzira na mjesto odvijanja istraživanja. Budućnost organskih tranzistora i elektronike bez metala sada još živi u fizikalnim laboratorijima.

Potreba suradnje fizičara i kemičara u ovom području je očigledna. Usprkos tome, i tu se fokusi zanimanja za kemičara i fizičara dosta razlikuju. Kemičara više zanima kao napraviti molekulu koja ne postoji, a fizičara manje zanima postupak kojim je molekula proizvedena.

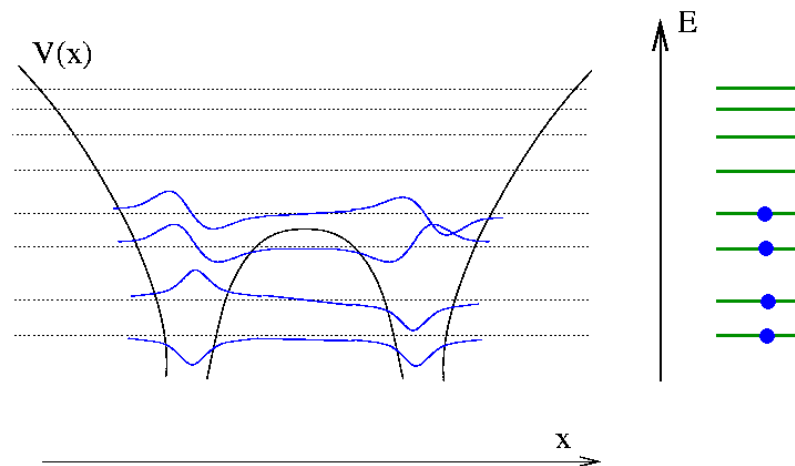
Elektroni i svjetlost, kratak i razvodnjen kurs

Elektroni se u atomima kreću oko jezgara koje su od njih više tisuća puta teže (masivnije), i suprotno električki nabijene. Električno privlačenje jezgre i elektrona osnova je za vezano stanje elektrona i jezgre, tj. nužno za postojanje atoma. Veličina područje gibanja elektrona oko jezgre određuje veličinu atoma, dok sama atomska jezgra ima zanemariv volumen.

Zašto elektron koji je nabijen i koji se giba u atomu ne stvara oko sebe promjenljivo električno i magnetsko polje, kako to čine naboji u gibanju u makrosvijetu? Radi čega takav elektron ne odašilje stalno elektromagnetsko zračenje? Zašto ne gubi energiju i na kraju (umoran) ne padne na jezgru? Zbog čega elektron jednog atoma ne ulazi u prostor elektrona drugog atoma, kad je taj prostor tako slabo ispunjen?

Ta i njima srodna pitanja zadavala su glavobolju fizičarima na početku dvadesetog stoljeća (ostali su imali drugih glavobolja). Na početku ovog stoljeća takva pitanja ne muče fizičare (bar većinu). Kvantna fizika donijela je relativno malo postulata o funkcioniranju prirode s kojima su ta pitanja dovedena u red. Doveden je u red opis materije na mikroskopskom nivou, atoma, molekula, cijela kemija, opis metala i organskih vodiča, poluvodiča, supravodljivosti i magnetizma. Ukratko, svega onoga što je osnova današnjeg mikroskopskog razumijevanja materije, razumijevanja koje je snažno pokrenulo tehnologiju polovicom prošlog stoljeća i još danas je ubrzava.

U jednostavnoj analogiji, elektron se u privlačnom potencijalu jezgre ponaša poput vala u kadi s vodom: Dozvoljeni su samo neki stojni valovi, čija valna duljina i frekvencija ovisi o dimenzijama kade i dubini vode u njoj. (Slične analogije mogu se napraviti i sa žicom razapetoj na violini, opni na bubnju ili zvučnim valovima u prostoriji i tako dalje. No, koliko god od pomoći, doseg ovih analogija je relativno kratak i za preciznije razmišljanje potrebno se je okrenuti se kćeri svih analogija – matematici. Matematički opis kvantne mehanike je daleko precizniji i kraći od analogija s makrosvijetom.)



U privlačnom potencijalu jezgara (lijevo) elektroni se ponašaju kao stojni valovi. Svaki elektron je u jednom, posebnom od stanju stojnog vala. Izgleda i raspored valova je to složeniji što je veći broj jezgara u pitanju. Svakom stanju odgovara drugačija vrijednost energije (posebno naznačeno na desnoj strani slike). Valovi se to složenije oblika što je jezgara više, a potencijal složeniji.

Stojni valovi su (tzv. *kvantna*) stanja koja elektron može imati u atomu bez da mu se energija mijenja. Svako stanje odlikuje se nekom vrijednošću energije elektrona. Dva elektrona ne mogu biti u istom kvantnom stanju (tzv. *Paulijev princip*). Promjene stanja

moguće su samo u međudjelovanju s okolinom u kojem se ta energija predaje okolni ili od nje uzima. Naime, elektron može skakati iz jednoj energetskeg stanja u dugo i ne može imati energije između. Razliku u energiji može dati drugom tijelu (elektronu, atomu, molekuli) ili proizvesti – foton.

Foton je čestica koja također ima valnu prirodu, njen val je elektromagnetski val: svjetlost, radio val, TV signal, i tako dalje. Foton plave svjetlosti ima nešto veću energiju od fotona zelene svjetlosti, a ovaj pak veću od fotona crvene svjetlosti (no priča o bojama nije tako jednostavna: na primjer, ne postoji foton smeđe svjetlosti). Upalimo li žarulju, prema nama prostruji ogroman broj fotona, njih oko 10^{20} u sekundi.

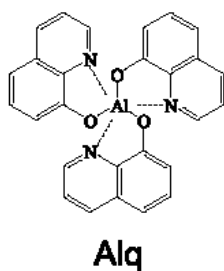
Dokazivanje postojanja fotona, paketa (ili kvanta) energije karakterističnog za elektromagnetski val, povijesno stoji na početku kvantne mehanike i vezano je na eksperiment u kojem se služimo svjetlošću da povećamo energiju elektrona u metalu (eksperiment fotoemisije na metalu). U molekuli, elektron može iskoristiti foton (aprobirati ga), ako energija fotona odgovara razlici energetskeg nivoa elektrona u molekuli. To se, na primjer, događa u našim očima, ili u fotočeliji. Obrnuti proces u kojem foton nastaje a elektron prelazi iz stanja više u stanje niže energije nalazimo u svjetiljkama, OLED-ima, laserima. Razmak između energetskeg nivoa elektrona u molekulama standardno mjerimo određujući valnu duljinu fotona koji se apsorbira ili emitira.

Organska kemija po fizičaru

Jedna od najočitijih uspjeha kvante fizike je objašnjenje periodnog sustava elementa, koji je Mendeljejev sastavio s mukom i nadahnućem, na osnovi sakupljenog iskustva. Slaganje elementa u grupe elemenata sličnih kemijskeg svojstva, posljedica je simetrija valne jednadžbe za elektron u atomu i Paulijevog principa. Zadnji popunjeni energetskeg nivoi elektrona u atomima iz iste grupe slično su složeni. To je prilično dosadno. Kemijskeg svojstva atoma nisu pretjerano bogat svijet.

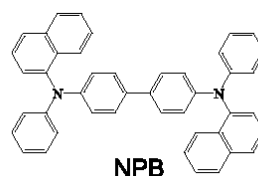
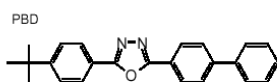
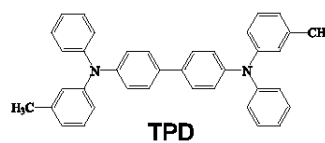
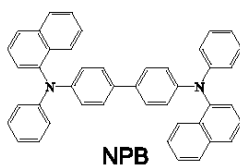
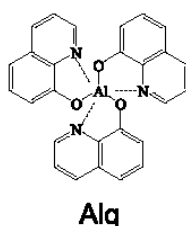
Međutim, kao što se sa znamenkama od 0 do 9 može napisati mnogo dvoznamenkastih i troznamenkastih brojeva, tako se i s nekoliko atoma može napraviti velik broj različitih molekula. Ako se ograničimo na mali broj atoma, ali atome uzimamo uglavnom preko cijele periodne tablice (iako, neke kombinacije ne daju stabilne tvorevine), "dobivamo" anorgansku kemiju.

Organska kemija bi više ličila na duge nizove nula i jedinica, kakve nalazimo u memoriji računala i na tvrdom disku, na CD-u s muzikom ili na DVD-u na kojem je snimljen film. Organske molekule su one koje se uglavnom sastoje od atoma ugljika i vodika uz tek pokoji atom dušika, kisika ili neki drugi. Unatoč tom ograničenju, s oko dva milijuna molekula, organske molekule čine oko devedeset posto do sada sintetiziranih spojeva. Ako su, i dobri, i loši, i sadašnji, i budući igrani filmovi zapisani s 0 i 1, zar je čudno da smo mi sami zapisani sa C i H?

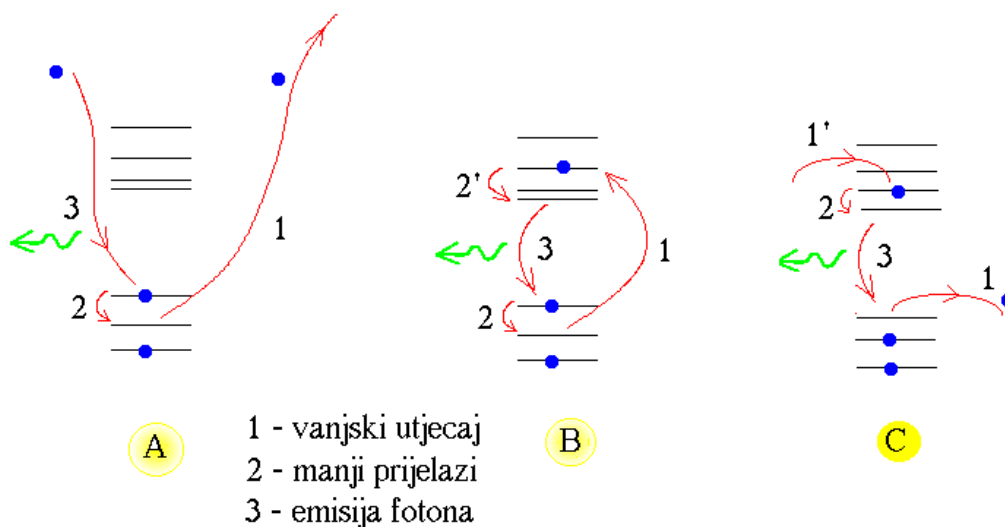


*Organska kemija gradi čudne
instrumente s elektronskim
energetskim nivoima kao tonovima.*

Kako stoji s energetskim nivoima organskih molekula koje trebamo za konstrukciju OLED-a i emisiju svjetla? Prispodobimo li kvantne elektronske nivoe muzičkim tonovima instrumenta, atomi izgledaju kao muzički triangli, dok velike organske molekule izgledaju kao glasoviri, orgulje ili simfonijski orkestri. Trebate li neku vrlo posebnu harmoniju, gdje ćete je tražiti?



*Neke male organske molekule koje se
koriste u izradi OLED-a.*

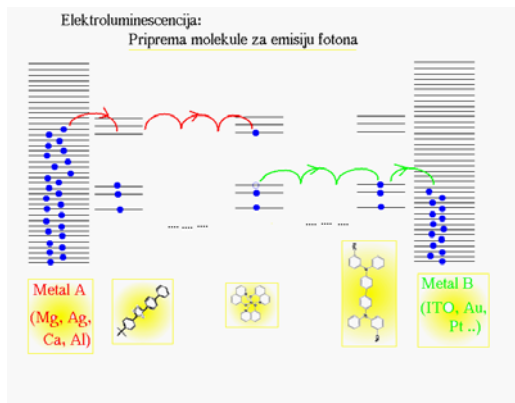


Pripremanje molekule za emisiju fotona. A i B nalazimo na primjer u florescentnim svjetiljkama. C je dominantan proces pri elektroluminiscenciji u OLED-ima.

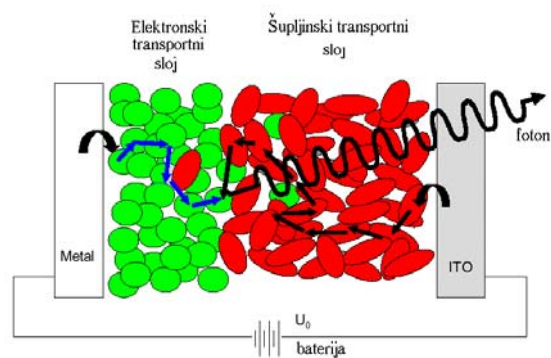
Kod krutih, LED izvora svjetlosti priključena baterija omogućava nam da, pomoću električnog polja, elektron na nižem nivou odvedemo sa molekule na njene susjedne molekule. Nakon toga, do iste molekule dovedemo drugi elektron (iz drugog smjera) koji je na višoj energiji. Padom tog elektrona iz u niži energetski nivo dobivamo *foton* (!).

Shema funkcioniranja OLED-a.

Na slijedećoj slici skiciran je princip rada organske diode s emisijom svjetla. Metalni slojevi ne stranama spojeni su na bateriju. Napravljeni su od različitih materijala u kojima su najgornji popunjeni nivoi na različitim energijama. Energetski nivo zadnjeg popunjenog nivoa, tzv. *Fermijev nivo*, različit je različite metale. Metal s višim Fermijevim dovodi u organski sloj elektrone s višom energijom, a metal s nižom Fermijevom energijom odvodi elektrone.



Shema pripreme molekule za proizvodnju fotona u OLED-u u prikazu energetske nivoe



U realnom prostoru, elektron skakuće u neuređenoj krutini sastavljenoj od molekula. Za skakanje elektrona u donjem energetskom nivou govorimo kao o gibanje "šupljine"

Specijalan, nesimetričan postav metalnih elektroda u odnosu na energetske nivoe molekule ima za posljedicu da je elektroni lakše prolaze kroz ovu strukturu u jednom nego u drugom smjeru. To *diodno svojstvo*, daje jedno slovo (*D*) u imenu OLED-a (ono koje nas najmanje zanima – *O*, *L* i *E* su slova koja će nas više zanimati).

Gornji opis pomalo slični opis na vodopada s vodenicom. Elektroluminescentni materijal, i elektronski skok u kojem nastaje foton, u tom opisu ima ulogu vodenice. Elektroni koji prijeđu organski sloj bez da stvore foton promašili su vodenicu i utrošili energiju na za nas nekoristan način. Natjerati elektron na vodenicu glavni je cilj dizajna dobrog izvora svjetla. Pogledajmo što to znači u OLED-ima.

*** dobre elektrode

Kontakte metala i organskog materijala treba učiniti dovoljno propusnim za elektrone, da bi mogli postići dobar protok elektrona i dobiti dovoljno intenzivnu svjetlost (velik broj fotona u jedinici vremena) i na malim naponima baterije. Povećanje napona iznad 3 ili 4 V, u cilju povećanja struje, dovodi u pravilu do gubitka dijela energije u toplinu (zašto i kako?). Kvaliteta elektrode odabire se dobrim izborom metala za danu organsku molekulu, te pripremom površine prije naparavanja.

*** i usuglašene elektrode.

Da bi elektron mogao napraviti skok s višeg energetskog nivoa u niži nivo, potrebno je prethodno osloboditi donji nivo. Brzinu dotoka elektrona u više energetske nivoe s katode

treba usuglasiti s brzinom pražnjenja donjih nivoa. U suprotnom će elektron prijeći organski sloj i doći do druge elektrode bez skoka. (Pitanje: a što se događa ako se donji nivoi brže prazne nego gornji pune?).

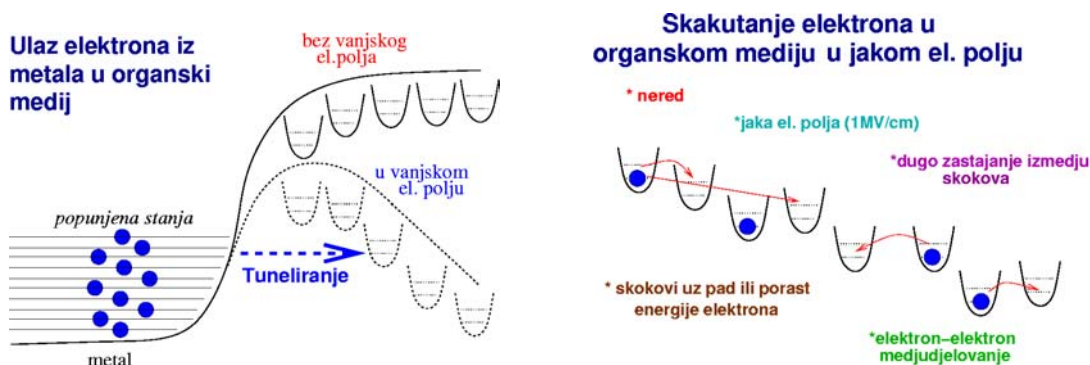
Ova uvjet nije lako postići. Međutim, moguće je postići da se elektrode same međusobno usuglašavaju ako se umjesto jednog stavi više različitih organskih slojeva. Na slijedeći način:

*** blokiranje u elektroluminescentnom sloju

Blokiranjem elektrona u višim energetskim nivou u elektroluminescentnom (EL) sloju povećava se efikasnost pretvaranja električne energije u svjetlost. Tada blokirani elektron ne može napustiti EL sloj, a da ne dočeka da se isprazni niži energetski nivo u EL materijalu. Preskok između nivoa tad se nužno događa u EL materijalu. Time su i elektrode automatski usuglašene (kako to?).

Modeliranje OLED-a

Modeliranje realne višeslojne OLED strukture podrazumijeva matematički opis procesa koji određuju njeno ponašanje. Opis se temelji na mikroskopskom modeliranju procesa i razumijevanju eksperimenata koji se fokusiraju na pojedine dijelove OLED-a. Ti dijelovi su molekule same, granica metala i organske supstance, granice različitih organskih materijala, gibanje elektrona pod utjecajem jakog električnog polja, nastanak fotona..

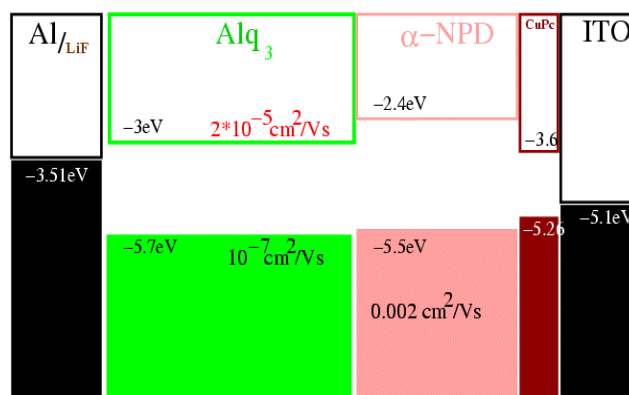


Sheme nekih mikroskopskih procesa koje je potrebno opisati jednačbama kod modeliranja OLED-a.

Ako dobiveni sustav jednadžbi kodiramo računalu i pravilno podesimo vrijednosti koje opisuju realni OLED možemo napraviti simulacije ponašanja diode u vremenu i steći uvid o tome što se točno u diodi događa.

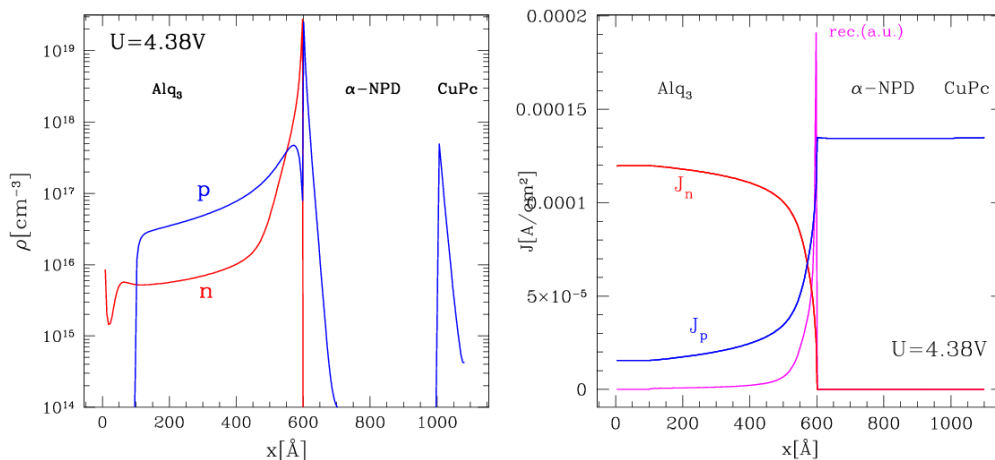
Prilikom svog boravka na Federalnom institutu za tehnologiju u Lausanni (EPFL) u Švicarskoj, prije nekoliko godina, počeo sam rad na jednom takvom modelu. Danas je to je vjerojatno najbolji model za numeričke simulacije višeslojnih OLED-a, iako daleko od toga da bude savršen. Zadnjih godina smo spomenuti model primjenjivali na nizu situacija, povećavali mu numeričku stabilnost i ugodnost uporabe.

Slike u prilogu ilustriraju primjer rezultata simulacije za relativno jednostavnu troslojnu strukturu diode koja isijava jaku zelenu svjetlost.



Shema energetske strukture nove organske diode s podacima koji se unose u numerički model. Imena materijala u svakom sloju su dana na vrhu.

Za svaki sloj poznati su podaci o energijama najvišeg popunjenog i najnižeg praznog nivoa u molekuli (jedinice eV, $1\text{eV}=1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}$) te mobilnost elektrona u tim stannjima pri preskakanju s jedne molekule na drugu (jedinice cm^2/Vs).



Numeričke simulacije u modelima OLED-a omogućuju nam da, na osnovu makroskopskih mjerenja (na primjer, ovisnosti struje i količine svjetla o primijenjenom naponu) predvidimo raspodjelu elektrona i nastanka fotona po molekulama. Na gornjim grafovima horizontalna os mjeri udaljenost od katode u jedinicama 10^{10}m .

Lijeva slika: crvena krivulja (n) opisuje koncentraciju molekula koje imaju novo iznad procijepa popunjen, a plava (p) koncentraciju molekula koje imaju elektronski novo ispod procijepa prazan.

Desna slika: Krivulje daju struja elektrona u stanjima iznad procijepa (n, crveno) i u stanjima donjim ispod procijepa (p, plavo)
Ljubičasta krivulja (rec) govori nam o raspodjeli nastanka fotona.

Zaključak

Organske svjetleće diode su u nešto više od jednog desetljeća prešle put od prvih otkrića u laboratoriju do proizvodnje ekrana u tvornicama. Takav brz razvoj omogućen je razumijevanjem materijala na mikroskopskom nivou te sve moćnijim eksperimentalnim metodama kojima fizičari raspolažu. Umjesto dugotrajnih nagađanja i isprobavanja, metode koje promatraju procese na nivou jednog ili nekolicine atoma često su u stanju razabrati uzroke problema i otvoriti put napretku. Istovremeno, modeliranje procesa na raznim prostornim skalama i numeričke simulacije tih procesa olakšavaju i ubrzavaju dovođenje u vezu raznorodnih eksperimentalnih činjenica. Udružen s bogatim izvorom materijala koji nudi organska kemija, ovakav pristup dovodi nas na prag doba organske elektronike.

Organski ekrani će se i dalje usavršavati u slijedećim godinama, no njihova budućnost ne izgleda upitna. U usavršavanju će sudjelovati kemičari, fizičari, matematičari, ekonomisti, i mnoge druge struke. No elektronski mehanizmi u uređenim i

amornim organskim materijalima i dalje će biti preokupacija pretežno i skoro isključivo - fizičara. U smislu primjene, rezultati mogu biti bolji i jeftiniji supravodiči, magneti, tranzistori, računala bez silicija. I bude li to pisalo u motivima istraživanja, budite oprezni. Jer motiv će biti možda skriven i teško shvatljiv: jednostavno – *razumjeti*.