

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Anže Baš

Organske svetleče diode

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Franc Smole

Ljubljana, 2016

Zahvala

Moja zahvala gre v največji meri mentorju prof. dr. Francu Smoletu. Svetoval mi je temo te magistrske naloge, priporočal strokovno literaturo in ves čas pomagal z nasveti pri pisanju. Kadar koli se mi je pri delu ustavilo, si je vzel čas in mi pomagal z nasveti. Moja zahvala gre tudi bratu Urbanu, ki je prispeval nekaj nasvetov. Zahvaljujem se Nadji, ki se je potrudila in našla čas, da je prebrala in slovnično, ter pomensko popravila mojo nalogo. Nazadnje (toda to ne pomeni, da ni toliko pomembno) se zahvaljujem staršema, da sta mi finančno in tudi drugače pomagala tekom študija.

Vsebina

1 Zgodovina OLED	17
2 Principi in mehanizem delovanja OLED elementov	21
2.1 Osnovna struktura OLED elementa	21
2.2 Mehanizem emisije svetlobe	23
2.2.1 Zasedenost molekularnih orbital.....	23
2.2.2 Vzbujeni in trojno vzbujeni elektroni	25
2.2.3 Injekcija naboja iz elektrod.....	27
2.2.4 Shotkky-jeva termoelektronska emisija.....	27
2.2.5 Injekcija s tuneliranjem.....	28
2.2.6 Vakuumski premik nivoja.....	28
2.2.7 Obnašanje naboja pri prenosu.....	29
2.2.8 Tok prostorsko omejenega naboja	29
2.2.9 Rekombinacija in generacija vzbujenih elektronov	30
2.2.10 Dopiranje	32
2.2.11 Kvantni izkoristek.....	36
2.2.12 Izkoristek izhodnih fotonov	37
2.2.13 Življenjski čas OLED naprav	40
3 Materiali za izdelavo OLED elementov	41
3.1 Materiali za malo molekularne OLED elemente.....	41
3.2 Materiali za polimerne OLED elemente	42
3.3 Fosforescentni materiali	43
3.4 Materiali za injekcijo vrzeli.....	44
3.5 Material za transport vrzeli.....	44
3.6 Materiali za emisijsko plast.....	45

3.7 Material za transport elektronov	46
4 Primerjava med OLED in LCD zasloni	47
4.1 Prednosti OLED zaslonov v primerjavi z LCD zasloni	48
4.1.1 Cena	48
4.1.2 Teža in fleksibilnost plastičnih substratov	49
4.1.3 Večji zorni kot.....	49
4.1.4 Boljši izkoristek moči	49
4.1.5 Odzivni čas.....	50
4.1.6 Sposobnost prikazovanja črne barve.....	50
4.2 Slabosti OLED zaslonov	50
4.2.1 Življenjski čas	50
4.2.2 Barvno ravnovesje	51
4.2.3 Vodne poškodbe.....	51
4.2.4 Zmogljivost OLED zaslonov na prostem.....	52
4.2.5 Poraba moči	52
4.2.6 Svetlost.....	52
4.2.7 Velikost	52
4.2.8 Učinek zapečene slike na zaslonu.....	53
5 Proces izdelave OLED elementov	55
5.1 Postopek očiščevanja materiala	55
5.2 Postopek napajanja	56
5.2.1 Vrste virov napajanja	57
5.3 Vzorčenje z uporabo maske za senčenje	59
5.4 Vgrajevanje (enkapsulacija) OLED elementov	60
5.4.1 Defekti zaradi črnih pik in širjenja robov	60
5.4.2 Enkapsulacije zgornje in spodnje sevalnih OLED elementov ..	62
5.5 Analiza problemov OLED elementov	63
5.5.1 Meritev ionizacijskega potenciala.....	63
5.5.2 HPLC analiza	65
5.5.3 Ciklično spreminjanje električnega potenciala	66
6 Tipi OLED zaslonov	69

6.1 OLED zasloni s pasivno matriko.....	69
6.1.1 Struktura.....	69
6.1.2 Krmiljenje pikslov pasivne matrike	70
6.2 OLED zasloni z aktivno matriko.....	72
6.2.1 Potrebne komponente AMOLED zaslona	72
6.2.2 Krmilno vezje z dvema tranzistorjema in enim kondenzatorjem (2T1C)	73
6.2.3 Zmogljivost AMOLED zaslonov.....	76
7 OLED kot veliko površinska svetlobna plošča	79
7.1 Izdelava in težave	79
7.1.1 Kratek stik pri veliko površinskih OLED panelih	80
7.1.2 Neenotno sevanje svetlobe.....	83
7.1.3 Vroča točka.....	84
7.1.4 Izguba moči.....	84
7.1.5 Generiranje toplote	85
7.2 Povezava OLED razsvetljave z sončnimi celicami	86
7.3 Povezava OLED in anorganske LED razsvetljave.....	88
7.4 OLED paneli kot komunikacija z vidno svetlobo	90
8 Primerjava OLED in LED tehnologij	93
8.0.1 Uvod.....	93
8.1 Mehanizem sevanja svetlobe in materiali	94
8.1.1 LED.....	94
8.1.2 OLED.....	95
8.2 Struktura naprav	96
8.2.1 LED.....	96
8.2.2 OLED.....	97
8.3 Izkoristek LED in OLED elementov	97
8.3.1 LED.....	97
8.3.2 OLED.....	98
8.4 Krmiljenje sevale barve.....	99
8.4.1 LED.....	99
8.4.2 OLED.....	100

9 Zaključek	103
--------------------	------------

Literatura	105
-------------------	------------

Seznam uporabljenih simbolov

SEZNAM VELIČIN

S_0	Osnovno stanje
S_1	Vzbujeno stanje
W_{vac}	Vakuumski energijski nivo
W_e	Energijski nivo elektronov
P_e	Polarizacijska energija elektronov
P_h	Polarizacijska energija vrzeli
γ	faktor ravnovesja naboja
r_{st}	delež ekscitonov tvorjenih iz enojnih vzbujenih stanj
Φ_r	izkoristek upada sevanja
Φ_{out}	razmerje med generirano in pridobljeno svetlobo
e ali q	osnovni naboj
V ali U	priklopna napetost
$\hbar\omega$	povprečna energija oddanih fotonov
J ali j	gostota električnega toka
A_0	Richardsonova konstanta
W	delovna funkcija
k_B	Boltzmanova konstanta
T	temperatura
E	energija
ε_0	dielektrična konstanta

m_0	masa prostega elektrona
m^*	efektivno masno število
Φ_{Bn}	višina energijske bariere
μ	mobilnost nosilcev
d	debelina
N_c	efektivna gostota stanj pri prevodnem pasu
N_t	efektivna gostota stanj pri ujetni ravni
E_C	energijski nivo prevodnega pasu
E_t	energijski nivo ujetnega pasu
ε	dielektričnost materiala
W_f	fermijev energijski nivo
W_h	energijski nivo vrzeli
η_{not}	notranji kvantni izkoristek
ζ_S	izkoristek generacije vzbujenih elektronov
η	razmerje med generirano in pridobljeno svetlobo
θ_g	kot generirane svetlobe
θ_o	kot odbite svetlobe
θ_i	kot izhodne svetlobe
θ_c	kritični kot
$ \rho $	razmerje odbite svetlobe
δ	fazni zamik
L	svetilnost
I	električni tok
C	kapacitivnost oz. prostorninska toplotna kapacitivnost
R	upornost
k	toplotna prevodnost
n	refleksijski indeks
χ	razmerje med številom sevalnih in ostalih vzbujenih stanj

ϕ absolutna učinkovitost vzbujene molekule, da odda svetlobo

SEZNAM KRATIC

OLED Organic Light Emmiting Diode (organska svetleča dioda)

AMOLED Active Matrix OLED (organska svetleča dioda z aktivno matriko)

UV Ultra Vijolična

HOMO Highest Occupied Molecular Orbit (najvišje zasedena molekularna orbitala)

LUMO Lowest Unoccupied Molecular Orbital (najnižje nezasedena molekularna orbitala)

ITO Iridium Tin Oxide (iridij-kositrov-oksidi)

SM-OLED Small Molecule OLED (malo molekularne OLED)

PLED Polimerni LED

LEP Light-Emmiting Polymers (svetleči polimeri)

LCD Liquid Crystal Display (zaslon iz tekočih kristalov)

HPLC High-Performance Liquid Chromotography (visoko zmogljiva tekoča kromatografija)

AISC Application Specific Integrated Chip (integriran čip za specifično aplikacijo)

TFT Thin Film Transistor (tankoplastni tranzistor)

ETL Electron transport Layer (elektronski transportni sloj)

EIL Electron Injection Layer (plast za injekcijo elektronov)

HBL Hole Blocking Layer (plast za blokiranje vrzeli)

HTL Hole Transport Layer (plast za transport vrzeli)

HIL Hole Injection Layer (plast za injekcijo vrzeli)

Povzetek

V magistrski nalogi je predstavljen OLED element in njegova uporaba v sodobnih aplikacijah.

Na začetku je opisana kratka zgodovina raziskav OLED elementov in njihovega uvajanja v praktičnih aplikacijah. Nato je predstavljena osnovna in bolj kompleksna struktura OLED elementov ter njihovo delovanje. Definiran je tudi izkoristek OLED elementov in opisano, kako se da izkoristek povečati s pomočjo dopiranja. Podani so tudi najpogostejše uporabljeni materiali za posamezne sloje OLED elementov.

V nadaljevanju je predstavljena ena glavnih aplikacij OLED elementov za TV zaslone in kratka primerjava OLED zaslonov z LCD zasloni. Opisan je proces izdelave OLED TV zaslonov in tudi tipi zaslonov, ki obstajajo na tržišču.

V zaključnem delu naloge smo opisali, kako lahko OLED elemente uporabljamo kot velikopovršinske svetlobne panele, v kakšnih aplikacijah bi jih lahko uporabili in težave, ki jih srečujejo proizvajalci pri njihovi izdelavi. Narejena je tudi primerjava med organsko svetlečo diodo in anorgansko svetlečo diodo.

Ključne besede: OLED element, zaslone, svetleče diode, svetlobni paneli, izkoristek, enkapsulacija, dopiranje, defekti

Abstract

In this master thesis is presented the OLED element and its use in modern application.

In the beginning we describe a short history, when and how the first research in using OLED elements began and when and in which applications it first appeared. Then we presented the basic and more complex structure of the OLED element and how it works. We also defined the efficiency of the OLED element and describe how to increase this efficiency using a doping method. Given are also the most frequently used materials for each layer of the OLED element.

Further we present one of the main applications of the OLED element, that is in TV screens and a short comparison between OLED displays and LCD displays. We described the process of making OLED TV screens and what types of displays exist on the market.

In the final part of the paper we described how to use OLED elements for large area OLED lighting panels and in which applications we could use them in and the difficulties encountered by the manufacturers in their creation. Then there is a comparison made between an organic light emitting diode and an inorganic light emitting diode.

Key words: OLED element, displays, light emitting diode, light panels, efficiency, encapsulation, doping, defects

1 Zgodovina OLED

Prve raziskave elektroluminiscence v organskih materialih sta v zgodnjih 50-ih letih 20. stol. opravila André Bernanose in sodelavci na Nancy-Université v Franciji. Aplicirali so visoke izmenične napetosti na materiale, kot so akridin oranž (organska spojina, ki se uporablja kot barvilo), ki so bili bodisi položeni na ali raztopljeni v celulozi oziroma celofanskih tankih filmih. Predlagali so dva mehanizma za doseganje elektroluminiscence. Prvi je bil z direktnim vzbujanjem barvnih molekul in drugi z vzbujanjem elektronov.

V letu 1960 so Martin Pope in nekaj njegovih sodelavcev na Newyorški Univerzi razvili nove ohmske elektrodne kontakte na organskih kristalih. Opisali so potrebne energijske pogoje (delovne funkcije) za elektrodne kontakte, ki injicirajo vrzeli in elektrone. Ti kontakti so osnova za injekcijo vrzeli in elektronov pri modernih OLED elementih. Popova skupina je tudi prva, ki je opazovala elektroluminiscenco pri enosmernem toku (DC). Že leta 1963 so opazovali reakcije pod vakuumom na čistem kristalu antracena in na antracenovih kristalih, dopiranih s tetracenom. Za preizkuse na teh so uporabili majhne površinske elektrode, narejene iz srebra in aplicirali nanje napetosti 400 V. Rezultat tega postopka je bila molekularna fluorescenca, povzročena zaradi poljsko pospešenih elektronskih vzbujanj. Leta 1965 je ta skupina izdelala poročilo, da pri odsotnosti zunanjega električnega polja nastane elektroluminiscenca v antracenovih kristalih zaradi rekombinacij toplotno vzbujenih elektronov in vrzeli. Prevodnostna stopnja antracena je energijsko višja kot ekscitonska (eksciton je delec, ki je tvoren zaradi Coulombove interakcije med vzbujenim elektronom in vrzeljo) energijska stopnja. V istem letu sta W. Helfrich in W. G. Schneider iz Nacionalnega Raziskovalnega Sveta v Kanadi prvič proizvedla elektroluminiscenco s pomočjo dvojne injekcije rekombinacij v antracenovih monokristalih z uporabo elektrod za injekcijo vrzeli in elektronov. To je bil predhodnik modernih dvojno-injekcijskih naprav. Takrat so tudi Dow Chemical raziskovalci patentirali metodo za pripravo elektroluminiscenčnih celic z uporabo visokih (500–1500 V) izmeničnih (100–300 Hz) napetosti in električno izolirane milimetske tanke plasti topljenega fosforja, ki

vsebuje zemeljski antracenov prah, tetracen in grafitni prah. Njihov predlagan mehanizem vključuje elektronsko vzbujanje pri kontaktih med grafitnimi delci in antracenovih molekulah.

Roger Partridge je prvi opazil elektroluminiscenco polimerskih filmov v nacionalnem fizikalnem laboratoriju v Združenem Kraljestvu. Element je sestavljen iz tankega polimerskega (N-vinylcarbazole) filma do debeline 2,2 μm , ki se nahaja med dvema elektrodama. Rezultati projekta so bili patentirani leta 1975 in objavljeni leta 1983.

Ching W. Tang in Steven Van Slyke v Eastman Kodak so poročali o prvem diodnem elementu leta 1987. Ta element je uporabljal za takrat unikatno dvoplastno strukturo z ločenima plastema za transport vrzeli in elektronov. S tem se je rekombinacija in emisija svetlobe odvijala na sredini organske plasti. To je povzročilo zmanjšanje delovne napetosti in izboljšanje izkoristka, ki je vodila k sedanji dobi OLED raziskav in izdelavi naprav.

Raziskave o polimerski elektroluminiscenci so doživele vrhunec v letu 1990 z J. H. Burroughes-om iz Cavendishovega laboratorija v Cambridgu. Burroughes je poročal o visoko učinkovitem zeleno sevalnem polimerskem elementu, ki je uporabljal 100 nm debele filme polimera (p-phenylene vinylene).

Leto	Dogodek	Podjetje/Inštitut
1960-1975	Razvoj kristalne OLED molekule, atracen, itd.	NRC (Canada), RCA
1987	Publikacija članka o prvi OLED strukturi v Appl. Phys. Lett.	Eastman Kodak
1990	Publikacija članka o prvi polimerski OLED v reviji Nature	Cambridge Univ.
1996	Publikacija demonstracije prve aktivne matrice z OLED (AMOLED)	TDK
1998	Razvoj prve fosforescenčne OLED	Princeton Univ.
1999	Razvoj prvega pasivnega OLED izdelka	Pioneer
2001	Razvoj 0,72 inčnega zaslona, ki se nosi na glavi z AMOLED na silicija	eMagin

2001	Razvoj 13 inčnega SVGA (super videographics array) AMOLED prototipa	Sony
2001	Razvoj 2,1 inčnega 130-pikslov na inč AMOLED prototipa	Seiko Epson/CDT
2002	Razvoj 15 inčnega 1280 x 720 OLED prototipa	Eastman Kodak/Sanyo
2003	Razvoj digitalne kamere z 2,2 inčnim AMOLED zaslonom	Eastman Kodak
2003	Razvoj 24 x 12 inčnega AMOLED prototipnega zaslona	Sony
2003	Razvoj 20 inčnega fosforesčenčnega AMOLED prototipa s hrbtno površino iz amorfnega silicija	ChiMei/IDT/IBM
2007	Razvoj prvega OLED TV zaslona XEL-1	Sony
2008	Predstavitev najtanjšega OLED zaslona in prvega, ki bil fleksibilen in upogljiv	Samsung
2010	Predstavitev notesnika z velikim prozornim OLED zaslonom	Samsung
2010	Predstavitev OLED 3D televizorja s 62 cm diagonalo	Sony
2013	Predstavitev ukrivljene 4K Ultra OLED televizorja	Samsung
2015	Predstavitev največje OLED osvetlitvene matrice (2850 ploščic)	LG Chemical in Contrast Studio

Tabela 1.1: Časovnica razvoja OLED tehnologije [1]

2 Principi in mehanizem delovanja OLED elementov

2.1 Osnovna struktura OLED elementa

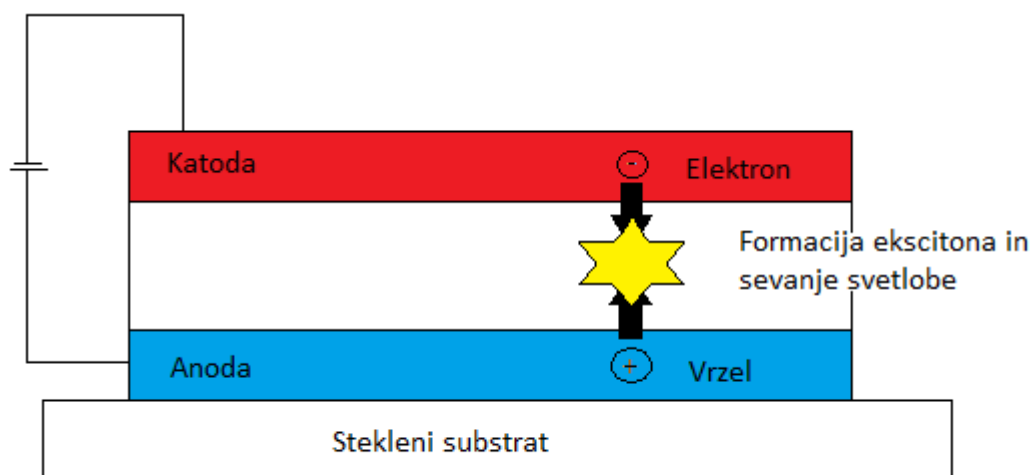
OLED elemente delimo v dve družini, to sta malomolekularni in polimerni OLED elementi. Ne glede na družino, v katero spada OLED element, je njegovo delovanje po principu enako. Osnovni princip emisije svetlobe lahko opišemo preprosto kot rekombinacijo elektrona in vrzeli, ki zaradi Coulombove interakcije skupaj tvorita visoko energijsko molekularno stanje, imenovano eksciton. Eksciton se obnaša kot ena sama molekula z visoko energijo. Ko se ekscitonu izteče življenjski čas, generira svetlobo. Obstaja tudi druga vrsta emisije, ki jo imenujemo fotoluminiscenca, ki je povzročena zaradi svetlobno inducirane molekularne vzburjenosti. Pogosto se uporabi za vzbujevanje UV svetlobe. Preprosti mehanizem sevanja svetlobe OLED prikazuje slika 2.1.

Valovna dolžina svetlobe je odvisna od energije, ki jo ima vzbujen elektron. Zaradi tega je možno nastavljanje barve sevanja svetlobe s prilagajanjem molekularne zgradbe strukture. Zaradi te lastnosti imajo OLED zasloni veliko prednost na tržišču.

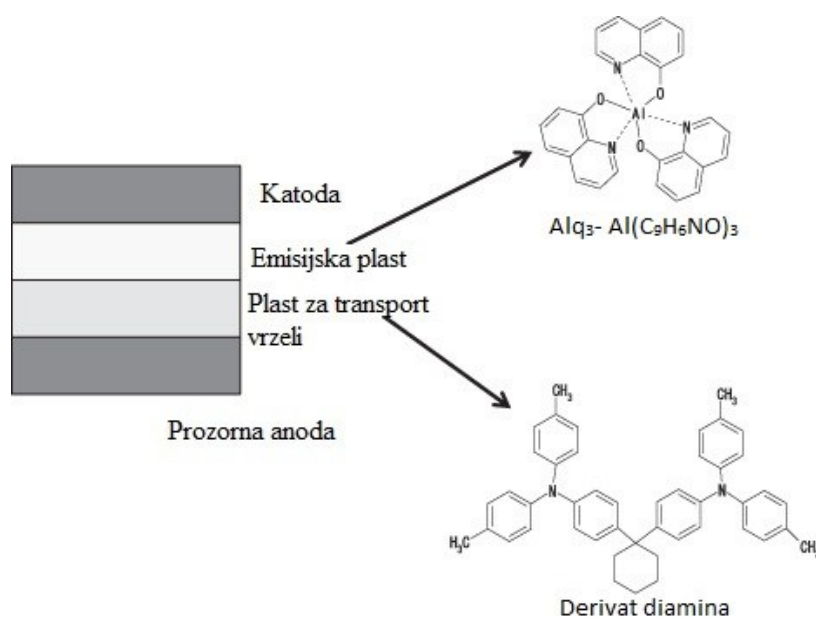
OLED emisije so bile opažene že pred prvim OLED člankom v letu 1987, vendar so ta sevanja imela premajhen izkoristek, da bi jih uporabili za prave aplikacije. Koncepti, ki so bili predstavljeni v članku Ching W. Tang in Steven Van Slyke, so veljavni še danes. Slika 2.2 predstavlja zgradbo OLED strukture, ki sta jo predstavila. Koncepti, ki sta jih predstavila so bili:

- visoka izboljšava izkoristka rekombinacij s pomočjo plastne strukture z uporabo različnih materialov (heterostruktura),
- izdelava nizkonapetostnih, visokokvalitetnih naprav s pomočjo izhlapevanja,
- primerna izbira materiala za injekcijo elektronov in vrzeli ter delovnih funkcij za katodne in anodne elektrode,
- visoko električno polje, ki se dobi s pomočjo ultra tankih filmskih formacij.

Kot smo omenili na začetku poglavja, delimo OLED v dve družini (malomolekulne in polimerske). Pri malomolekulnih napravah je majhna molekula deponirana s pomočjo tehnike z izhlapevanjem, tako da je velikost molekule majhna, vendar je število teh malih molekul lahko zelo visoko. Pri polimernih OLED elementih pa imamo strukture, ki jih sestavljajo skupaj povezane substrukture, sestavljene iz komponent, ki so primerne za raztapljanje v raztopilu in komponente primerne za emisijo svetlobe, tako da je molekula oblikovana z večjo maso.



Slika 2.1: Diagram mehanizma OLED emisije



Slika 2.2: Diagram OLED naprave, ki sta jo leta 1987 predstavila Tang in Van Slyke

2.2 Mehanizem emisije svetlobe

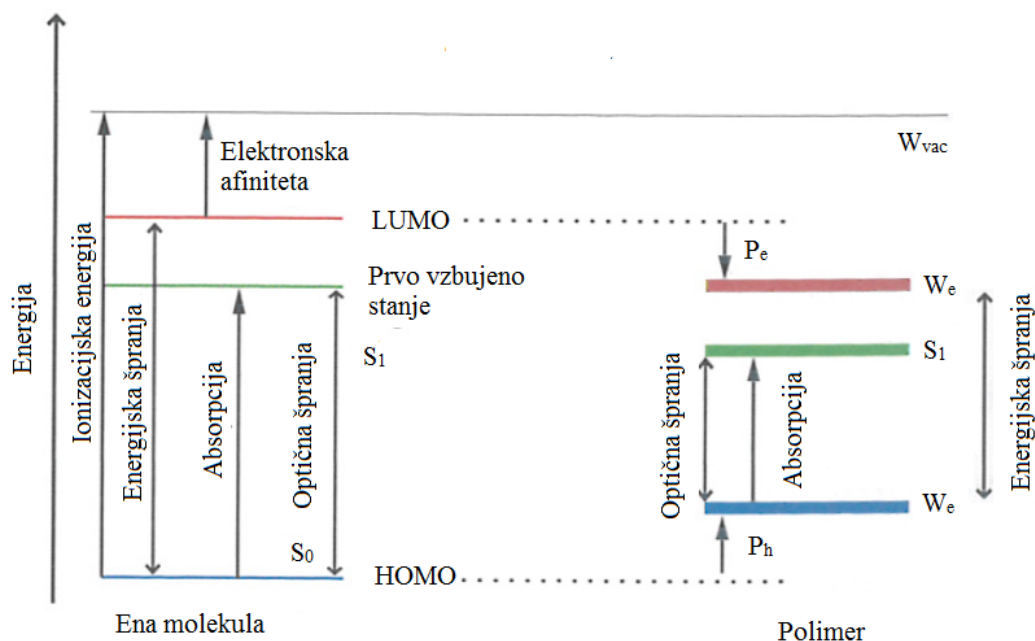
2.2.1 Zasedenost molekularnih orbital

Od vseh zasedenih orbital nas pri OLED sevanju svetlobe najbolj zanima orbitala z maksimalno elektronsko energijo, ki jo imenujemo najvišje zasedena molekularna orbitala (HOMO-highest occupied molecular orbital). Od vseh nezasedenih molekularnih orbital pa nas zanima orbitala z najnižjo elektronsko energijo, to pa imenujemo najnižje zasedena molekularna orbitala (LUMO-lowest unoccupied molecular orbital). Ti dve orbitali v veliki meri določata električne in optične lastnosti posameznih molekul in molekularnih trdnih snovi. V osnovnem stanju je HOMO orbitala popolnoma zasedena in LUMO orbitala je nezasedena. Tako imamo nasičen sistem, ki je popolnoma zaseden in vsi spini imajo svoj par. Iz tega razloga se kovalentne vezi ne morejo tvoriti in trdne snovi, ki jih sestavljajo takšne molekule, so vezane s šibkimi van der Waals-ovimi silami. Absolutne vrednosti energije HOMO in LUMO so odvisne od ionizacijske potencialne energije in elektronske afinitete. Ionizacijska potencialna energija je najmanjša energija, ki jo potrebujemo, da odstranimo en elektron iz najvišje zasedene molekularne orbitale. Elektronska afiniteta je energija, ki je potrebna, da dodamo en elektron v najnižje zasedeno elektronsko orbitalo, tako da se sistem stabilizira.

Glede na Hückel-ovo metodo molekularnih orbital, HOMO energijski nivoji pomagajo prevajanju vrzeli, LUMO energijski nivoji prevajajo elektrone in najnižja energija vzbujanja, ki jo potrebujemo za absorpcijo, je podana s prehodom iz HOMO do LUMO ravni. Vendar je ta metoda omejena, saj podaja sliko le enega elektrona in ne upošteva energij interakcij med elektroni, kot so:

- elektron, ki prehaja iz HOMO v LUMO orbitalo, kar vodi do vzbujene nevtralne molekule,
- elektron, ki je doveden iz neskončnosti v LUMO orbitalo, kar vodi do negativno nabite molekule (anion).

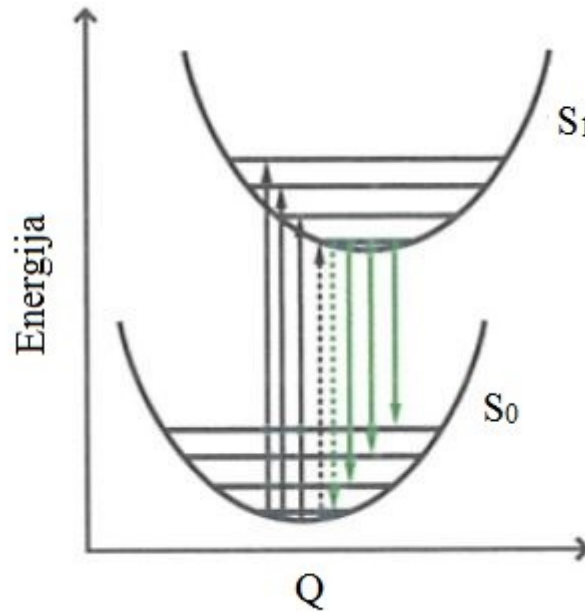
Izračuni kažejo, da je razlika med elektronsko energijsko špranjo (ta je enaka ionizacijski energiji minus elektronska afiniteta) in optično špranjo (energija prvega vzbujenega stanja S_1) enaka nekaj elektronvoltov za enojne molekule. Ta energija postane nižja v trdnem stanju. V tem primeru je ionizacijska energija nižja in elektronska afiniteta višja. Energijski nivoji obeh primerov so podani na sliki 2.3.



Slika 2.3: Energijski nivoji eno molekularnih in trdnem stanju

V trdnem stanju je optična energijska špranja od 0,5 do 1 eV nižja od elektronske energijske bariere. Temu je tako zaradi pridobljene Colombove energije, ko se v molekuli srečata prosti elektron in vrzel ter tvorita eksciton. Ti molekularni ekscitoni so drugačni kot Wannier-ovi ekscitoni, ki jih najdemo v anorganskih polprevodnikih.

Pomembna značilnost organskih polprevodnikov je premik glavnega fluorescenčnega vrha glede na prvi absorpcijski vrh. Ta efekt je bil opažen pri mnogo materialih in nastane zaradi reorganizacij znotraj molekul po vzbujanju. Temu efektu pravimo rdeči premik. Ker je HOMO orbitala vezalna in LUMO orbitala nevezalna, so ravnovesne razdalje atomov različne v osnovnem in v vzbujenem stanju. Tako vzbujanje iz osnovnega stanja S₀ v vzbujeno stanje S₁ pripelje do vzbujenega stanja, ki se hitro sprosti v termično ravnovesje v majhnem delčku svojega sevalnega življenjskega časa. Podoben temu je tudi prehod iz sproščenega vzbujenega stanja v osnovno stanje. Oba efekta sodelujeta pri rdečem premiku fluorescence glede na absorpcijo.



Slika 2.4: Potencialne energije v osnovnem in vzbujenem stanju

Slika 2.4 prikazuje črte potencialnih energij za osnovno S_0 in vzbujeno stanje S_1 glede na koordinato Q , ki odraža znotraj molekularne atomske dolžine. Iz slike je dobro razvidno, da so absorpcijske valovne dolžine (črne puščice) v glavnem daljše kot emisijske valovne dolžine (zelene puščice), kar povzroča rdeči premik.

2.2.2 Vzbujeni in trojno vzbujeni elektroni

Da imamo lahko OLED element z visokim izkoristkom generiranja svetlobe, morata elektron in vrzel tvoriti enojno vzbujeno stanje in eksciton, ki se tvori, se mora ponovno združiti tako, da seva svetlobo, energijske izgube med procesom pa morajo biti čim nižje. Skupni zunanji močnostni izkoristek OLED elementa je podan z enačbo:

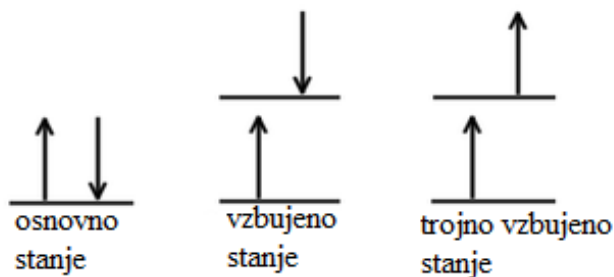
$$\eta_P = \gamma r_{st} \Phi_r \Phi_{out} \frac{\hbar\omega}{eV} \quad (2.1)$$

V enačbi (2.1) je γ faktor ravnovesja naboja, ki je enak razmerju med številom generiranih ekscitonov in številu elektronov, ki tečejo skozi vezje, r_{st} je del ekscitonov, ki so tvorjeni kot enojna vzbujena stanja, Φ_r je izkoristek upada sevanja, Φ_{out} je razmerje med generirano in pridobljeno svetlobo, $\hbar\omega$ je povprečna energija oddanih fotonov, e je osnovni naboj in V priključna napetost.

Pred vzbujanjem ima elektron v molekuli v osnovnem stanju oba spina (zgornji in spodnji). Ko se tak elektron vzbudi na višje energijsko stanje, se lahko tvori vzbujeno stanje ali vzbujeno trojno stanje. Elektron v vseh treh stanjih prikazuje slika 2.5. V vzbujenem molekularnem elektronskem stanju so vsi elektronski spini v parih. To pomeni, da je spin vzbujenega elektrona v paru s spinom elektrona v osnovnem stanju. V trojnem vzbujenem stanju vzbujen elektron ni več v paru z elektronom v osnovnem stanju, to pomeni, da sta vzporedna (enak spin). Emisijo svetlobe, ki je rezultat prenosa energije iz enojnega stanja v ozemljeno stanje, imenujemo fluorescenčna emisija svetlobe. Ker so prehodi iz vzbujenega stanja v osnovno stanje kvantno mehanično dovoljeni, so ti zelo hitri (1–10 ns) in učinkoviti. Emisijo svetlobe, ki pa je posledica prenosa energije iz trojnega stanja v osnovno stanje, pa imenujemo fosforescenčna emisija svetlobe.

Dva elektrona, dodeljena isti orbitali, tvorita elektronski par z različnimi spini. To imenujemo Paulijevo izključitveno načelo, ki pravi, da dva identična fermiona (delca s pol celimi spini) ne morata zasedati ista kvantna stanja hkrati. Glede na to načelo, se mora smer spina obrniti, ko gre elektron iz trojnega stanja v osnovno stanje. Običajno ta sprememba potrebuje relativno dolgo časovno obdobje (100 μ s–10 s). To pomeni, da je življenjski čas vzbujenega elektrona v trojnem stanju daljši od tistega od enojne emisije. Trojno vzbujeno stanje ima tudi nižjo energijo, kot enojno vzbujeno stanje (zaradi Paulijevega načela, se dva elektrona z enakim spinom ne moreta približati in s tem imamo manjšo energijo). Ker imamo nižjo energijo, s tem dobimo tudi višje valovne dolžine, s katerimi lahko sevamo nevidno svetlobo.

Materiali, ki jih uporabljamo za trojno sevanje svetlobe, imajo običajno komplicirano kovinsko strukturo, ki vsebuje težke kovine, kot so iridij ali platina. Ti omogočajo prenos energije iz enojnega v trojno vzbujeno stanje in iz trojnega v enojno vzbujeno stanje, ki je običajno prepovedano (medsistemsko križanje). Enojno in trojno vzbujeni elektroni so formirani kot rezultat visoko učinkovite spin-orbitalne sklopitve, ki je povzročena zaradi težko kovinskega centra zgradbe kovinske strukture.



Slika 2.5: Elektronska konfiguracija v ozemljenem in vzbujenem stanju [2]

2.2.3 Injekcija naboja iz elektrod

Kot je bilo že omenjeno, OLED naprava za sevanje svetlobe potrebuje rekombinacijo elektronov in vrzeli. Običajni materiali, ki jih uporabljamo za OLED, pa imajo zelo visoko upornost pri nizkih električnih poljih in zato lahko te materiale štejemo kot izolatorje. V letu 1987 je bila raziskava Tang in Van Slyke tako uspešna, ker sta uporabila tanke filme in s tem sta lahko ustvarila velika električna polja. Izbrala sta tudi strukture in materiale, ki so bili primerni za injekcijo nabojev. Sodobne OLED naprave uporabljajo ta isti koncept. S pomočjo visokega električnega polja so elektroni injicirani iz katode v najnižje zasedeno molekularno orbitalo (LUMO) elektronske transportne plasti. Vrzeli pa so injicirane iz anode v najvišje zasedeno molekularno orbitalo (HOMO) vrzeline transportne plasti.

Injekcijo nabojev v transportno plast lahko dosežemo s pomočjo treh principov: Schottky-jevo termoelektronsko emisijo, s tuneliranjem in modelom premika nivoja zaradi vakuumu.

2.2.4 Shotkky-jeva termoelektronska emisija

Da elektron prečka potencialno bariero in pride iz elektrodine površine, potrebuje dovolj veliko energijo. Če kovino ali polprevodnik segrevamo, dobijo elektroni čim višjo energijo in če je ta dovolj visoka, lahko elektroni zapustijo površino elektrode. Ta pojav se imenuje termoelektronska emisija ali Richardsonov efekt.

$$J = A_0 T^2 e^{-\frac{W}{k_B T}} \quad (2.2)$$

Enačba (2.2) predstavlja Richardson-Duchmanovo enačbo za gostoto emisijskega električnega toka. V enačbi je A_0 Richardsonova konstanta, W pa je delovna funkcija. Če pri elektrodi ustvarimo visoko električno polje, se potencialna bariera zniža. Efektu znižanja rečemo Schottky-jev efekt (2.3).

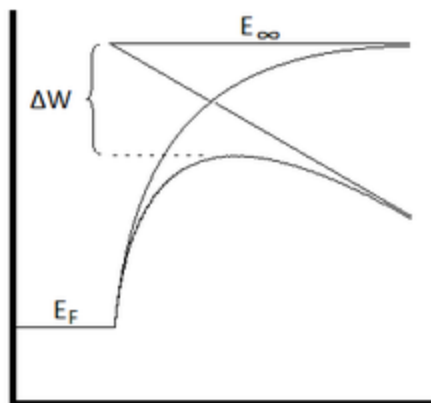
$$\Delta W = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

E v enačbi (2.3) predstavlja jakost električnega polja. Če to enačbo upoštevamo v enačbi (2.2) za gostoto toka, dobimo:

$$J = A_0 T^2 e^{-\frac{(W-\Delta W)}{k_B T}} \quad (2.4)$$

Znižanje potencialne bariere zaradi električnega polja prikazuje slika 2.6.

Pri pravih OLED napravah se pogosto izmerjena energijska bariera ne ujema s teoretično. To pa zaradi tega, ker te enačbe ne upoštevajo deformacije in nečistoče znotraj zgradbe.



Slika 2.6: Znižanje potencialne bariere

2.2.5 Injekcija s tuneliranjem

Drugo injekcijo naboja dosežemo s pomočjo tuneliranja. Injekcija s tuneliranjem je emisija elektronov s pomočjo električnega polja. Temu kvantnemu procesu rečemo tudi Fowler-Nordheim tuneliranje. Gostoto električnega toka, ki ga dobimo s tuneliranjem, ponazarja enačba (2.5). V tej enačbi je m_0 masa prostega elektrona, m^* efektivno masno število in Φ_{Bn} višina bariere.

$$J = \frac{q^3 V^2 m_0}{8\pi \Phi_{Bn} m^*} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} \Phi_{Bn}^{1.5}}{3HqV}\right) \quad (2.5)$$

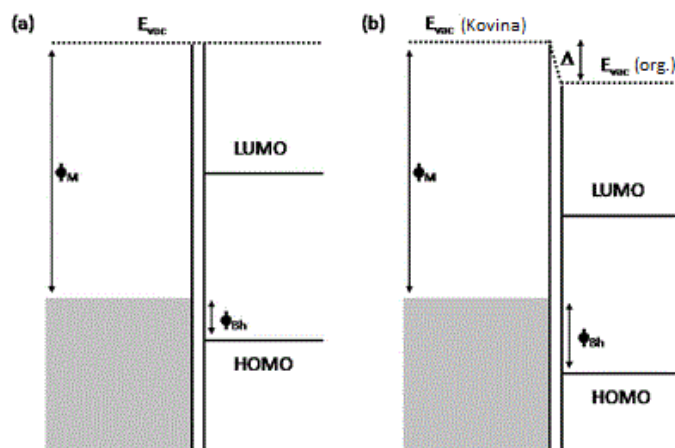
V enačbi vidimo, da temperatura nima nobenega vpliva na gostoto električnega toka, kot je to v primeru Schottky-jevega efekta v enačbi (2.4).

2.2.6 Vakuumski premik nivoja

Ta model se uporablja v primerih, ko imamo injekcijo naboja iz aluminijeve elektrode skozi litij-fluoridnega sklopitvenega sloja v organski material. Al/LiF katode se zelo pogosto uporabljajo kot injekcijske plasti OLED naprav.

Zgradbe kovina-organska snov ali metalohalid (metal halide)-organska snov ne moremo dobro razložiti s pomočjo Schottky-jevega modela injekcije, ker moramo

upoštevati tudi vakuumski premik nivoja, ki ga povzroči dvoslojna zgradba (Al/LiF). Ta premik ravni je lahko tudi večji kot 1 eV in takšen premik je težko zanemariti. Slika 2.7 prikazuje višino bariere z vakuumskim premikom nivoja in brez premika nivoja.



Slika 2.7: Premik ravni zaradi vakuuma

Glede na povedano litij-fluorid bistveno izboljša injektorje elektronov iz aluminija v organski material. Iz tega razloga je to eden izmed najbolj uporabljenih materialov za katodne elektrode.

2.2.7 Obnašanje naboja pri prenosu

Ko pride naboj v elektrodo in če so vse najvišje zasedene molekularne orbitale (HOMO) že zasedene, ne morejo sprejeti več naboja. Takrat bo naboj prenesen na najnižje zasedeno elektronsko orbitalo (LUMO), v primeru elektrona iz katode. Ko so elektroni preneseni v LUMO orbitale, tvorijo električni tok. Ta prenos naboja iz HOMO v LUMO orbitale spominja na prenos naboja iz prevodnega v valenčni pas pri polprevodnikih. Po drugi strani, ko je vrzel injicirana iz anodne elektrode, se prenese v HOMO orbitalo. Vrzeli so prenesene s pomočjo električnega polja in s tem tvorijo električni tok. Mobilnost v OLED napravah je v razponu od 10^{-3} do približno 10^{-6} cm^2/Vs in ker π - π interakcije niso znatne v amorfih filmih, se domneva da je naboj prenesen s pomočjo skokovitega prevajanja (hopping conduction), ki sledi pravilu toka prostorsko omejenega naboja (space charge limited current).

2.2.8 Tok prostorsko omejenega naboja

Gostota naboja v organskih snoveh je običajno nizka. Ko količina injiciranega naboja preseže količino notranjega naboja, se sistem iz omskega stanja spremeni v tako imenovanega »Tok prostorsko omejenega naboja« (Space charge limited current).

Omejitev toka, ki je posledica prostorskega naboja, nastane takrat, ko tok, ki potuje skozi vakuum med katodo in anodo, ne more preseči neke vrednosti, ker obstaja prostorski naboj v tem območju, ki povzroči spremembo električnega polja blizu katode. Ta prostorski naboj povzroči polarizacijo dielektrika, ki se pojavi v prisotnosti nosilcev naboja, ki se lahko selijo na dolgih dolžinah skozi dielektrik. Vendar zato lahko nosilci naboja postanejo ujeti ali pa se ne morejo razelektriti na elektrodi. Ko injiciramo naboj v organsko plast in če se ni polarizacija umirila, nastane blizu elektrode polariziran sloj. Ta sloj imenujemo plast prostorskega naboja. Ker je pretok naboja omejen zaradi te plasti, imenujemo to tok prostorsko omejenega naboja. Enačbo za gostoto električnega toka z upoštevanjem ujetja naboja podaja enačba (2.6).

$$J = \frac{9}{8} \frac{\epsilon \mu V^2}{d^3} \cdot \Theta \quad (2.6)$$

$$\Theta = \frac{N_c}{N_t} \exp\left(\frac{E_t - E_c}{k_b T}\right)$$

V tej enačbi je N_c efektivna gostota stanj pri prevodnem pasu E_c in N_t je gostota stanj v ujetni ravni (trapping state). Enačba (2.6) je imenovana Mott-Gurney-ev zakon in je razširitev Child-ovega zakona. Ta enačba upošteva še trke, do katerih prihaja pri prevajanju v trdih materialih.

2.2.9 Rekombinacija in generacija vzbujenih elektronov

Injicirani elektroni in vrzeli so preneseni skozi OLED napravo. Ko elektron sreča vrzel, se rekombinirata in tvorita vzbujen elektron. Ko vzbujenemu elektronu poteče življenjski čas, generira foton, čigar valovna dolžina je odvisna od energijske špranje. Z večanjem verjetnosti rekombinacij, lahko generiramo večje število fotonov. Če nam uspe zaježiti elektrone in vrzeli s HOMO/LUMO pasovno energijsko razliko, s pomočjo zgradbe OLED naprave z več plastmi različnih materialov, lahko kontroliramo pozicijo rekombinacij. Z ujetimi elektroni in vrzelmi lahko verjetnost rekombinacij povečamo in s tem povečamo tudi izkoristek OLED naprave.

Tako delujejo vse najnovejše OLED naprave. Poleg tega uporabljajo še dodatne izboljšave pri zgradbi naprav. Tipično zgradbo moderne OLED strukture prikazuje slika 2.8.

Spodaj so podani tipični sloji modernih OLED naprav in njihove osnovne funkcije:

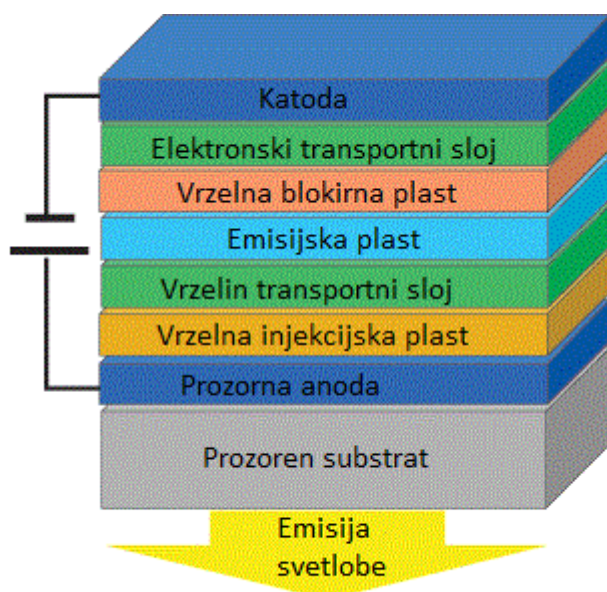
- elektronska transportna plast, ki je zadolžena za injekcijo elektronov iz katodne elektrode in za prenos elektronov,
- vrzelna injekcijska plast za injekcijo elektronov iz anode,
- vrzelna transportna plast, naloga te plasti je transport vrzeli iz vrzelne injekcijske plasti v emisijsko plast,
- emisijska plast, zadolžena za transport vrzeli in elektronov, ter njuno rekombinacijo, ki generira svetlobno emisijo,
- elektronska injekcijska plast, ki je zadolžena za injekcijo elektronov iz katode,
- plast za blokiranje vrzeli, ta plast blokira transport vrzeli.

Zadnji dve plasti (elektronska injekcijska plast in plast za blokiranje vrzeli) se uporabljata tudi za kontroliranje pozicije rekombinacij (tvorjenje vzbujenih elektronov) z blokiranjem transporta vrzeli.

Pomemben je tudi pravilen izbor elektrod, saj če uporabimo prave materiale, lahko zmanjšamo delovne funkcije in s tem izboljšamo izkoristek injekcije. Kot primer, za vrzelno transportno plast se pogosto uporablja NPB (polimer), ki ima HOMO raven $-5,5$ eV in za anode se uporablja iridij-kositrov-oksidi (iridium tin oxide ITO), ki ima delovno funkcijo približno $-4,7$ eV. Z modifikacijo raztopine (solution) lahko delovno funkcijo ITO spremenimo na okoli $-5,0$ eV, kar izboljša izkoristek injekcije vrzeli.

Na katodni strani se za elektronsko transportno plast pogosto uporablja Alq₃, ta ima LUMO raven približno $-3,3$ eV. Za katodo se uporablja MgAg zlitina z delovno funkcijo $-3,8$ eV. Če uporabimo kot material za katodo aluminij z delovno funkcijo $-4,3$ eV, lahko delovno funkcijo izboljšamo, s tem, da postavimo plast LiF med Al in Alq₃ s pomočjo vakuumskega premika ravni (ta je opisan v poglavju 2.2.6).

Glede na povedano je potrebno pri načrtovanju OLED naprave upoštevati relacije med delovnimi funkcijami materialov, ter HOMO in LUMO ravni vsakega sloja. Od 80-ih let se je načrtovanje OLED naprav bistveno izboljšalo, zaradi uporabe zgoraj opisanih slojev.



Slika 2.8: Struktura moderne OLED naprave

2.2.10 Dopiranje

Če dodamo majhno količino emisijskega materiala, lahko izboljšamo izkoristek emisij ali pa s tem spremenimo sevno svetlobo. Temu procesu rečemo dopiranje in materiali, ki se za to uporabljajo, se imenujejo dopanti. Ta postopek je posebej uporaben pri materialih, pri katerih se donos emisij zmanjšuje pri velikih gostotah. Podajmo primer dopiranja: v originalnem stanju je Alq_3 zelen fluorescenčen emisijski material, vendar če mu dodamo majhno količino rubrena (polimer), se barva sevanja spremeni v rumeno oranžno. Do tega pride zaradi prenosa energije iz Alq_3 vzbujenega elektrona do rubrenovega vzbujenega elektrona. Z dodatkom rdečega fluorescenčnega dopanta DCJTB (4-(dicyanomethylene)-2-tert-tert-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran)), se pojavijo še nadaljnji prenosi energije in pride do sevanja rdeče svetlobe. S tem je možno spreminjati sevalno svetlobo s pretvorbo emisijskega spektra v daljšo valovno dolžino.

Obstajajo tudi organska barvila, ki imajo kvantni izkoristek fotoluminiscence blizu ena v plinastem stanju ali raztopini, vendar je ta kvantni izkoristek dosti manjši v trdnem stanju. Kvantni izkoristek v trdnem stanju je tudi občutljiv na nečistoče, saj lahko ekscitoni difundirajo v nizke energije in pasti, ki nastanejo zaradi defektov. Iz teh razlogov je kvantni izkoristek nizek v trdnem stanju. Kvantni izkoristek lahko izboljšamo, če organsko snov malo (~ 1 mol%) dopiramo s fluorescentnim barvilom v prevodnem gostiteljskem materialu in tako tvorimo emisijsko plast. Koncentracija mora biti nizka, s tem zagotovimo, da se dopanti ločijo med seboj.

Ekscitoni v takšnih dopiranih sistemih se lahko tvorijo direktno na prevodni gostiteljski molekuli s kombinacijo prostega elektrona in vrzeli. Kasneje lahko vzbujena gostiteljska molekula prenese svoje vzbujanje na dopant s pomočjo Försterovega mehanizma v bližinah, ki so manjše od 10 nm. V tem primeru je Försterov prenos nesevalen proces med enojno vzbujenimi stanji, ki vključuje prenos vzbujenja iz gostiteljeve molekule na dopantovo molekulo. Da lahko pride do tega, je potrebno, da je energijsko stanje gostiteljevega materiala kompatibilno oz. v resonanci z nevzbujeno HOMO-LUMO špranjo dopantne molekule. To postane razvidno, ko se gostiteljev fluorescentni spekter prekriva s absorpcijskim spektrom dopanta. V primeru trojnega vzbujanja pa je potreben t. i. dexter elektronski prenos, pri katerem se izmenjata dva elektrona med gostiteljem in dopantom. V tem primeru je potrebno direktno prekrivanje med valovno funkcijo dopanta in gostiteljem in je omejeno na manj kot nanometer. Druga možnost formacije ekscitona je ujetje vrzeli na dopantu pred rekombinacijo z elektronom na gostitelju.

Prednost dopiranja s fluorescentnimi molekulami je tudi ta, da je padec kvantnega izkoristka pri veliki svetlosti manj izrazit pri dopiranih emisijskih plasteh, kot pri nedopiranih. Če je v plasti koncentracija prostih ekscitonov velika, lahko dva ekcitona trčita, kar bi povzročilo njihovo uničenje. Z ujetjem ekscitonov na dopantu lahko bistveno zmanjšamo število prostih ekscitonov in s tem njihovo možnost uničenja.

Za pridobitev visoke energijske učinkovitosti in majhne gonilne napetosti moramo imeti učinkovito injekcijo naboja in nizke ohmske izgube v transportnem sloju. Pri običajnih anorganskih LED so ti pogoji izpolnjeni s pomočjo močno n^- in p^+ dopiranimi transportnimi sloji za elektrone in vrzeli. S pomočjo dopiranja dobimo učinkovito injekcijo naboja s tuneliranjem in ravne energijske pase. S tem tudi dosežemo, da je delovna napetost takšnih LED blizu termodinamične limite, ki je enaka energiji fotonov (podana v eV) deljeno z osnovnim nabojem.

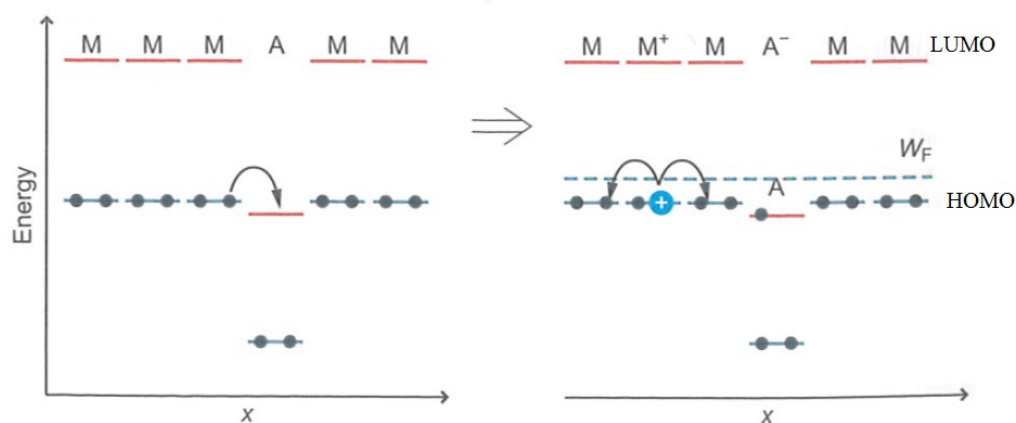
Ker običajne OLED elemente sestavljajo nedopirane plasti, potrebujemo visoka notranja električna polja, da premagamo kontaktne bariere in tudi pripeljemo nosilce naboja v emisijsko plast. V teh primerih delovna napetost pri veliki svetlosti zelo preseže termodinamično limito. Veliko raziskav se dela na tem, da bi se pri OLED elementih izognili zgoraj navedenim problemom. Ena metoda za izboljšanje injekcije vrzeli je, da vstavimo ojačevalno plast med anodo in transportno plast za vrzeli. Za izboljšanje injekcije elektronov, se uporabljajo kovinske katode z nizko delovno funkcijo ali pa se vstavi tanko plast za znižanje bariere med katodo in elektronsko transportno plastjo. Če s temi metodami optimiziramo kontakte, problem toka prostorsko omejenega naboja v nedopiranih transportnih plasteh še vedno ostane. Ko

pride naboj v material, ki nima naboja v ravnovesju, bo ta material postal lokalno nabit in naboji bodo s pomočjo Coulombeve sile odbiti, kar pomeni, da prostorski naboj omejuje nadaljnjo injekcijo naboja. Tokovna gostota v nedopiranih transportnih slojih je podana z enačbo:

$$j = \frac{9}{8} \epsilon \mu \frac{V^2}{d^3} \quad (2.7)$$

V zgornji enačbi je ϵ dielektričnost materiala, μ mobilnost nosilcev, d debelina materiala in V priklopna napetost. Iz enačbe (2.7) je razvidno, da je za večjo tokovno gostoto, ki nam omogoča večjo svetlost pri določeni priklopni napetosti, potrebno minimizirati debelino nedopiranih plasti v OLED elementu in zagotoviti, da je transport v dopiranih plasteh ohmski z zanemarljivim padcem napetosti.

Slika 2.9 prikazuje koncept dopiranja na primeru p tipa organskega polprevodnika. Iz slike je razvidno, ko dodamo akceptorsko molekulo (označeno z A) v gostiteljevo molekulo (označeno z M) je LUMO raven akceptorja blizu HOMO ravni gostitelja. Ker je prenos naboja iz M na A energijsko ugoden, dobimo negativno nabit akceptor A^- in pozitivno nabito gostiteljsko molekulo M^+ , ta je vrzel, ki se lahko relativno prosto giblje skozi plast. V dopiranih materialih injekcija naboja in prenos naboja ne povzročata tvorjenje prostorskega naboja.

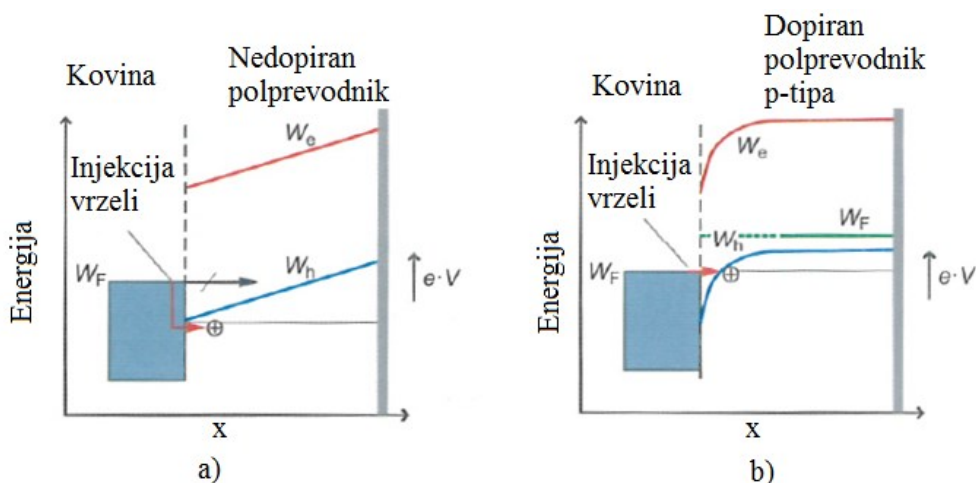


Slika 2.9: Prenos naboja iz gostitelja na akceptorski dopant

Kot primer p dopiranega materiala za transport vrzeli lahko navedemo 4,4',4"-tris(3-methylphenylphenylamino)triphenylamine (m-MTDATA) dopiran z F_4 -TCNQ. V tem primeru je elektronska afiniteta F_4 -TCNQ zelo blizu ionizacijski energiji m-MTDATA, zaradi česar dobimo popolni transport naboja. Dopiranje materiala dosežemo s skupnim izparevanjem dopanta in gostiteljskega materiala. V tem primeru razmerje dopiranja 1:50 povzroči prevodnost okoli $5 \cdot 10^{-7}$ S/cm pri sobni temperaturi.

Padec napetosti skozi 50 nm debel transportni sloj za vrzeli, narejen iz dopirane m-MTDATA molekule, znaša le 0,1 V.

Dopirani transportni sloji nam tudi omogočajo učinkovito injekcijo naboja iz kontaktov čez visoko energijsko bariero. Pri kontaktu anorganskega polprevodnika p-tipa in kovine z nizko delovno funkcijo se tvori spoj, kjer je energijski naklon previsok, da bi omogočal injekcijo naboja v polprevodnik. Debelina osiromašenega območja med obema materialoma je sorazmerna z $N_A^{-1/2}$, kar pomeni, da z veliko količino dopiranja lahko to osiromašeno območje toliko zožimo, da omogočimo tuneliranje nabojev skozi bariero. Navedeno velja za anorganske polprevodnike, vendar je bilo pokazano s foto-elektronsko spektroskopijo, da ta princip velja tudi pri organskih polprevodnikih. Slika 2.10 prikazuje injekcijo naboja in energijske nivoje pri nedopiranem in dopiranem organskem polprevodniku.

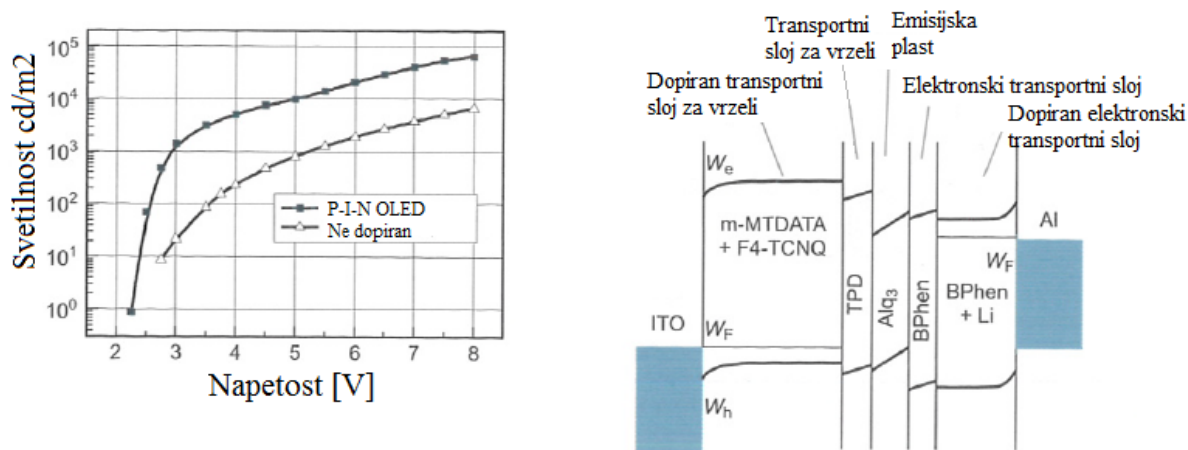


Slika 2.10: Injekcija vrzeli v nedopiranem (a) in dopiranem (b) organskem polprevodniku pri vhodni napetosti V

Glede na to, da mora biti emisijska plast pri OLED elementih nedopirana, ker dopanti povzročijo nesevalne rekombinacije ekscitonov, OLED elementom koristi p-i-n struktura. Tanki nedopirani sloji za blokiranje ekscitonov so postavljeni med emisijsko plast in dopirano plast za transport naboja, s čimer dobimo visok izkoristek. Debeline (d) na nedopiranih plasteh mora biti čim manjša, saj je tok prostorsko omejenega naboja premo sorazmeren z d^{-3} .

Na sliki 2.11 je prikazan graf svetilnosti v odvisnosti od napajalne napetosti in iz njega lahko vidimo, da dosežemo veliko svetilnost pri nizkih napetostih. Pri napetosti 2,5 V dosežemo svetilnost 100 cd/m², napetost 2,5 V pa je zelo blizu

termodinamične limite za zeleno emisijo. Na desni strani te slike pa lahko vidimo p-i-n strukturo OLED elementa, pri kateri je skupna debelina nedopirane plasti le 35 nm.



Slika 2.11: Graf svetilnosti glede na napetost in energijski diagram p-i-n OLED strukture

Za konec tega poglavja bomo v tabeli 2.1 dodali še podatek o zabeleženih izkoristkih fosforescentnih p-i-n OLED elementov.

OLED Barva/emisijska molekula	Izkoristek toka	Izkoristek svetilnosti
Rdeča/TER31	30,1 cd/A	21,6 lm/W
Zelena/Ir(ppy) ₃	50,9 cd/A	39,7 lm/W
Modra/FIrpic	53,0 cd/A	49,0 lm/W

Tabela 2.1: Izkoristek različnih fosforescentnih OLED elementov

2.2.11 Kvantni izkoristek

Da ovrednotimo, kako učinkovito OLED naprava oddaja svetlobo, se pogosto izračunata notranji kvantni izkoristek in zunanji kvantni izkoristek. Notranji kvantni izkoristek η_{not} je izražen z enačbo (2.8) in nam pove, koliko je generirane svetlobe.

$$\eta_{\text{not}} = \gamma \zeta_s q \quad (2.8)$$

V tej enačbi je γ ravnovesje (balance) elektronov in vrzeli (ravnovesje nosilcev), ζ_s je izkoristek generacije vzbujenih elektronov (za enojno vzbujene elektrone, je to izkoristek generacije enojno vzbujenih elektronov, pri trojni emisiji pa je to suma

izkoristka enojno in trojno generiranih vzbujenih elektronov) in q je fluorescenčni kvantni izkoristek za enojno vzbujene elektrone (izkoristek generacije fluorescenčne svetlobe iz vzbujenega elektrona), ter fosforescenčni kvantni izkoristek za trojno vzbujene elektrone.

Ker se velika količina generirane svetlobe odbije, prenese in absorbira v napravi in substratu, je to treba v dejanskih primerih, ko računamo izkoristek upoštevati. Ko se načrtuje OLED zaslon, moramo upoštevati razmerje med generirano svetlobo in pridobljeno svetlobo, da lahko pravilno kalibriramo svetlost. Če izrazimo izkoristek razmerja pridobljene svetlobe proti generirani svetlobi (outcoupling) z η_o , lahko enačbo za zunanji kvantni izkoristek zapišemo kot:

$$\eta_{zun} \simeq \eta_o \gamma \zeta_s q \quad (2.9)$$

Kot primer podajmo zunanji kvantni izkoristek fluorescenčnega sevanja: maksimalna vrednost ravnovesja nosilcev je 100%, izkoristek generacije enojno vzbujenih elektronov je 25%, maksimalna vrednost fluorescenčnega kvantnega izkoristka je 100% in izkoristek razmerja pridobljene svetlobe proti generirani svetlobi je 20%. Če vse te vrednosti zmnožimo, dobimo izkoristek okoli 5%. V dejanskih primerih so opazili zunanje kvantne izkoristke višje od te vrednosti. Glede na nekatere izračune naj bi bila limita zunanjega kvantnega izkoristka zaradi fosforescenčnega mehanizma okoli 20%.

2.2.12 Izkoristek izhodnih fotonov

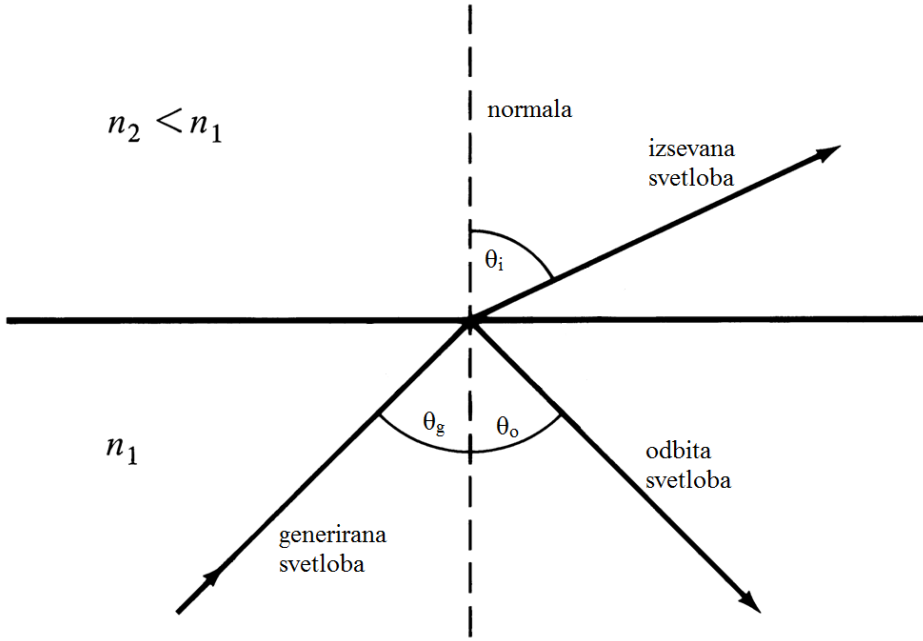
Ko generirana svetloba potuje skozi OLED strukturo, del te svetlobe doseže naše oko, dober del svetlobe se izgubi v notranjih plasteh ali v substratu. Razmerje pridobljene svetlobe in generirane svetlobe bomo imenovali izhodni izkoristek fotonov. Pri načrtovanju OLED naprav je pomembno, da ta izkoristek povečamo kolikor se da.

Izkoristek izračunamo s pomočjo optike, in sicer Snell-ovega zakona in kritičnega kota. Kot generirane svetlobe bomo označili kot θ_g , kot odbite svetlobe bo označen z θ_o in kot izhodne svetlobe bo označen z θ_i . Po Snell-ovem zakonu lahko zapišemo naslednjo enačbo:

$$\frac{\sin \theta_g}{\sin \theta_i} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

Snell-ov zakon prikazuje slika 2.12. Če je kot generirane svetlobe prevelik (večji od kritičnega kota), pride do totalnega odboja svetlobe. Kritičen kot zapišemo z enačbo (2.11).

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.11)$$



Slika 2.12: Snell-ov zakon

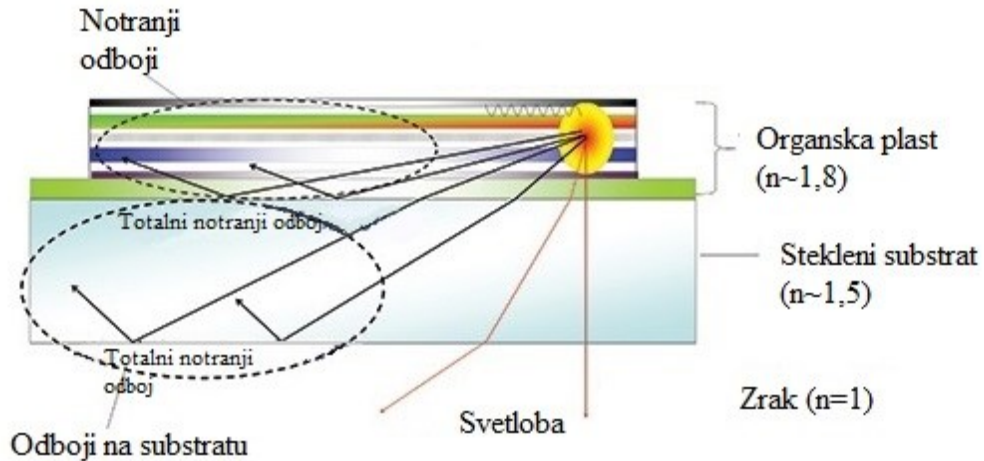
Končno enačbo za izkoristek izhodnih fotonov lahko zapišemo z dvema enačbama. Prva enačba je za točkasti vir svetlobe in se glasi:

$$\eta_o = \frac{2\pi I_o \int_0^{\theta_B} \sin\theta d\theta}{2\pi I_o \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_{zrak}}{n_{OLED}}\right)^2} \quad (2.12)$$

V obeh enačbah je I_o svetlobna intenziteta. Druga enačba je za vir svetlobe iz difuzijske površine. Ta enačba se glasi:

$$\eta_o = \frac{2\pi I_o \int_0^{\theta_B} \cos\theta \sin\theta d\theta}{2\pi I_o \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta} = \left(\frac{n_{zrak}}{n_{OLED}}\right)^2 \quad (2.13)$$

Sedaj podajmo še en primer: če ima zrak refleksijski indeks enak 1, Alq₃ OLED struktura ima refleksijski indeks enak 1,75, je izkoristek pridobitve svetlobe kar nizek in sicer 17,9%, če uporabimo točkovni vir svetlobe in 32,6% ob uporabi difuzijske površine. Izgubo svetlobe zaradi odbojev svetlobe prikazuje slika 2.13.



Slika 2.13: Shema izgube svetlobe zaradi odbojev (začasna slika)

Mikami s kolegi je zapisal enačbo s katero lahko ocenimo pridobljeno energijo iz OLED sistema.

$$E = \frac{(1-|\rho_0|^2)\{1-|\rho_0|^2+2|\rho_0|\exp(i(2\delta_1-\varphi_1))\}}{1+|\rho_0||\rho_1|-\sqrt{|\rho_0||\rho_1|}\exp(i(2\delta_0-\varphi_0-\varphi_1))} \quad (2.16)$$

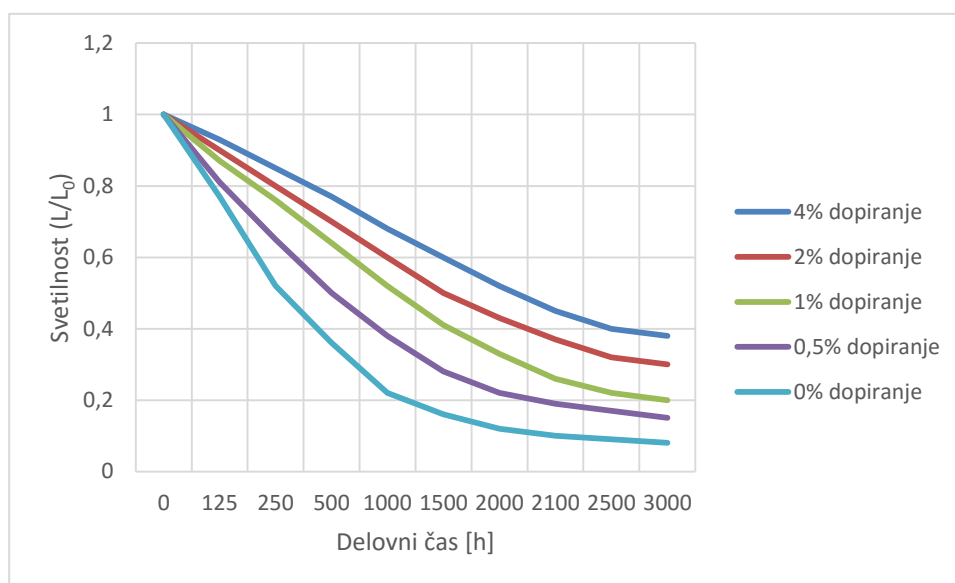
V tej enačbi je E pridobljena energija, ϕ_0 je fazni zamik, zaradi odboja na sprednji površini, ϕ_1 pa je fazni zamik zaradi odboja na zadnji površini, $|\rho_0|^2$ je razmerje odbite svetlobe sprednje mejne plasti, $|\rho_1|^2$ je razmerje odbite svetlobe zadnje mejne površine, δ_0 je fazni zamik zaradi debeline emisijske plasti in δ_1 je fazni zamik, ki nastane med emisijsko plastjo in zadnjimi plastmi.

V OLED napravah lahko dosežemo visoke izkoristke in čisto barvo s pomočjo resonančnega efekta. Če pravilno nastavimo zgornje parametre, zagotovimo kar se da enako fazo svetlobe, ki se jo da spremeniti z odboji v večplastni strukturi. Ta resonančni efekt se da najbolje izkoristiti v zgornji emisijski plasti z uporabo tanke pol prozorne kovinske plasti za zgornjo elektrodo. Problem resonančnega efekta je to, da povzroči znatne spremembe karakteristik zaradi različnih debelin plasti. Za spodnjo svetlobno emisijo (svetloba prihaja iz spodnjega dela strukture), lahko tudi uporabimo resonančni efekt, če uporabimo polprozorno elektrodo ali Bragg-ov reflektor.

Obstajajo še drugi pristopi k izboljšanju pridobivanja svetlobe, kot so nizi mikro leč, mikro piramidne strukture, difrakcijska struktura in fotonski nizi.

2.2.13 Življenjski čas OLED naprav

Življenjski čas oziroma spremembe svetilnosti OLED naprav, pri konstantnem delovnem toku prikazuje slika 2.14. Prikazan graf je za OLED napravo, ki uporablja kot emisijski sloj s perilenom dopiran BA1q sloj. Proizvajalci so pri specifikacijah OLED najbolj pogosto podajali podatek T_{50} . Ta podatek nam pove, koliko časa je minilo v urah, da je svetilnost OLED naprave padla na 50% začetne svetilnosti. Vendar se je življenjski čas OLED naprav iz leta v leto višal in 50% degradacija svetilnosti je redko sprejemljiva, proizvajalci sedaj podajo podatek o T_{70} . Pogosto je podan tudi podatek o T_{95} in T_{97} , ki pokaže, kako verjetno bo zaslon povzročil tako imenovani »slikovni burn-in«. Tri do pet odstotna sprememba v svetilnosti je tudi zelo blizu meji zaznavanja človeškega očesa.



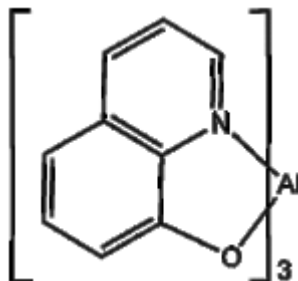
Slika 2.14: Upadanje svetilnosti skozi čas

3 Materiali za izdelavo OLED elementov

3.1 Materiali za malomolekularne OLED elemente

Prve učinkovite malomolekularne OLED elemente je razvil Dr. Ching W. Tang pri Eastman Kodaku. Izraz OLED se običajno nanaša prav na malomolekularne OLED, uporablja pa se tudi izraz SM-OLED (small molecule OLED).

Molekule, ki se tipično uporabljajo za OLED vključujejo organsko kovinske kelate [7] (organsko kovinska spojina vsebuje kovinski atom, ki je vezan na organsko spojino), fluorescentna in fosforescentna barvila in konjugirani dendrimeri (dendrimer je sintetični polimer z razvejano drevesno strukturo). Med organsko kovinske kelate štejemo tudi Alq_3 , ki se pogosto uporablja pri malomolekularnih OLED elementih.



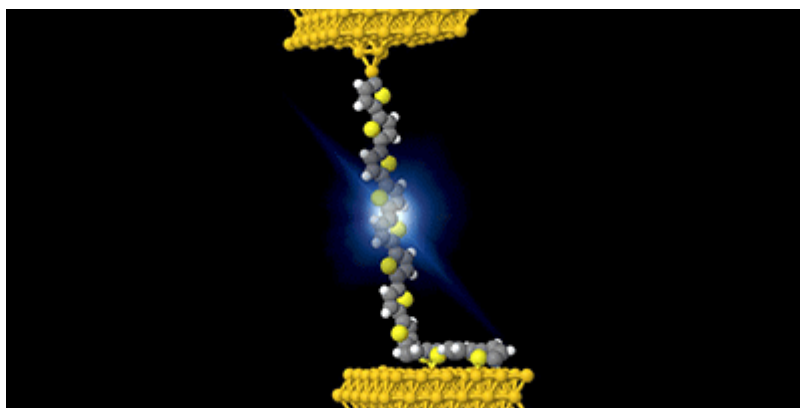
Slika 3.1: Kemična struktura Alq_3

Veliko materialov se uporablja zaradi njihovih lastnosti transporta nabojev. Med te materiale štejemo $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{N}$ in njegove derivate, ki se uporabljajo kot transportni sloj za vrzeli. Fluorescentna barvila se uporabljajo, da dobimo emisijo svetlobe pri različnih valovnih dolžinah. Alq_3 se je uporabljal kot oddajnik zelene svetlobe, kot transportni sloj za elektrone in kot gostitelj za rumena in rdeča barvila.

Malomolekularne OLED elemente in zaslone običajno izdelujejo s pomočjo termičnega izhlapevanja pod vakuumom. Zaradi tega je proces izdelave dražji in omejen le na izdelavo naprav z veliko površino. Ima pa vakuumsko nanašanje prednost pred napravami, ki temeljijo na polimerih v tem, da omogočajo tvorbo dobro

nadzorovanih homogenih filmov in konstrukcijo zelo kompliciranih večplastnih struktur. Ta fleksibilnost v izdelavi slojev, ki omogoča izdelavo ločene plasti za transport naboja in plasti za blokiranje naboja, je glavni razlog, zakaj so malo molekularni OLED elementi tako učinkoviti.

Raziskuje se tudi, kako bi bilo mogoče pridobiti luminiscenco na eni sami molekuli polimera, kar predstavlja najmanjši možni OLED element [8]. Gaël Reece na Univerzi v Strasbourgu in njegovi kolegi so uporabili z zlatom prevlečeno mikroskopsko konico, da so se lahko povezali na posamezno molekulo polimera, to prikazuje slika 3.2.



Slika 3.2: OLED element na osnovi ene same polimerne molekule

Ko so na konico priklopili napetost, so izmerili električni tok, ki je tekkel iz konice in substrata skozi polimer. Ta tok je bil v območju nA. Če je bila priklopna napetost dovolj velika, se energijski spekter sevanja svetlobe ni spremenil. To delo bo pripomoglo k izdelavi komponent molekularnih velikosti, ki združujejo elektronske in optične lastnosti.

3.2 Materiali za polimerne OLED elemente

Polimerne LED zapišemo tudi krajše PLED, uporablja pa se tudi kratica LEP (light-emitting polymers). Te diode vsebujejo elektroluminiscentni prevodni polimer, ki seva svetlobo, ko je priključen na zunanjo napetost. Polimerne OLED imajo visok izkoristek in porabijo relativno malo moči glede na količino sevanja svetlobe.

Vakuumski nanos pri polimernih OLED elementih ni primeren za tvorbo tankih filmov, kot je to v primeru malomolekularnih OLED. Da tvorimo polimerne tanke filme, se običajno uporabi predelava materiala v raztopini in nanašanje premaza s pomočjo vrtenja (spin coating). Te metode so bolj primerne za tvorbo filmov na večjih površinah, kot tehnike s termičnim izhlapevanjem. Pri teh metodah ne potrebujemo

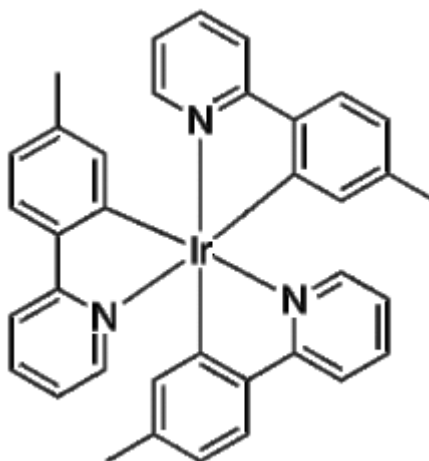
vakuuma in emisijski material lahko nanesemo na substrat s pomočjo tehnike, ki izvira iz komercialnega inkjet tiskalnika. Vendar problem nastane, ko nanesemo naslednje plasti, ki običajno raztopijo tiste, ki so bile že nanesene pred njimi. Iz tega razloga te metode niso uporabne, ko želimo izdelati večplastne strukture. Kovinska katoda pa se še vedno nanese s termičnim izhlapevanjem pod vakuumom.

Pogosti polimeri, ki se uporabljajo za polimerne OLED elemente, so derivati $(C_8H_6)_n$ in $(C_{13}H_8)_n$. S spremembo zgradbe polimerne strukture lahko nastavimo sevano barvo in izboljšamo zmogljivost naprave.

3.3 Fosforescentni materiali

Fosforescentni OLED elementi uporabljajo princip elektrofosfescence, da pretvorijo električno energijo v svetlobo. Ti OLED elementi imajo običajno zelo visoke izkoristke. Notranji kvantni izkoristki dosegajo vrednosti blizu 100%.

Za fosforescentne OLED se pogosto uporablja polimer $C_{14}H_{11}N$, ki nastopa kot gostiteljski material, kateremu se doda organsko kovinsko spojino kot dopant. Trenutno se največ raziskav o dopirnih materialih dela na spojinah iridija. Primer iridijeve spojine $Ir(mppy)_3$ prikazuje slika 3.3. S tem dopantom dobimo zeleno sevanje. Za dopante uporabljajo tudi druge težke kovine, kot je platina.



Slika 3.3: $Ir(mppy)_3$ se pogosto uporablja kot dopant za fosforescentne OLED

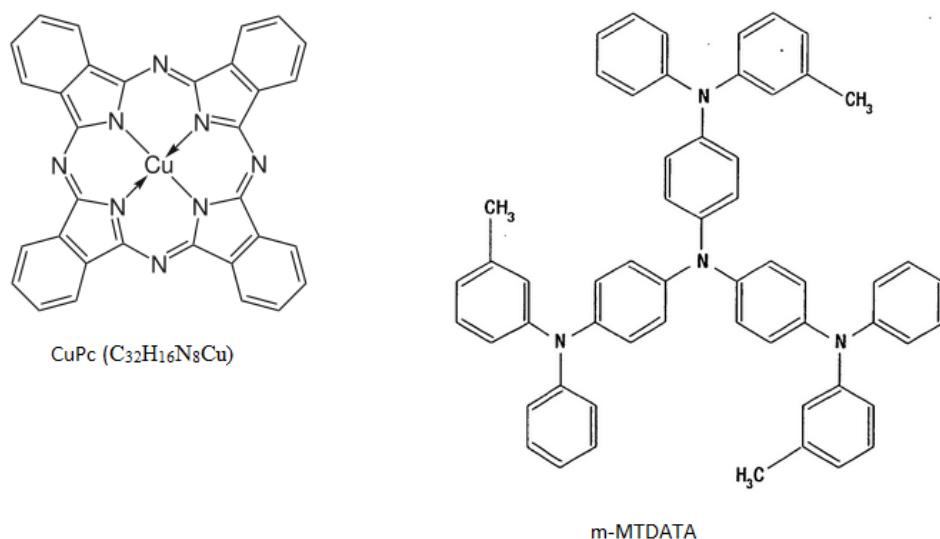
Pri emisiji svetlobe fosforescentnih materialov sodelujejo tako enojna vzbujena stanja kot trojna vzbujena stanja. Pri polimernih OLED sodelujejo le enojna vzbujena stanja. Do tega pride, ker atom težke kovine na sredini kompleksa povzroči močno sklopitev med spini in orbitalami, kar omogoča medsystemsko prehajanje iz enojnega

v trojno vzbujeno stanje. Ker pri sevanju sodelujejo tako enojna kot trojna vzbujena stanja, imajo fosforescenčni OLED elementi veliko večji notranji kvantni izkoristek.

3.4 Materiali za injekcijo vrzeli

Izbira materiala je za posamezno plast pri večplastni strukturi zelo pomembna, saj morajo biti materiali med seboj kompatibilni v smislu njihovih HOMO in LUMO nivojev.

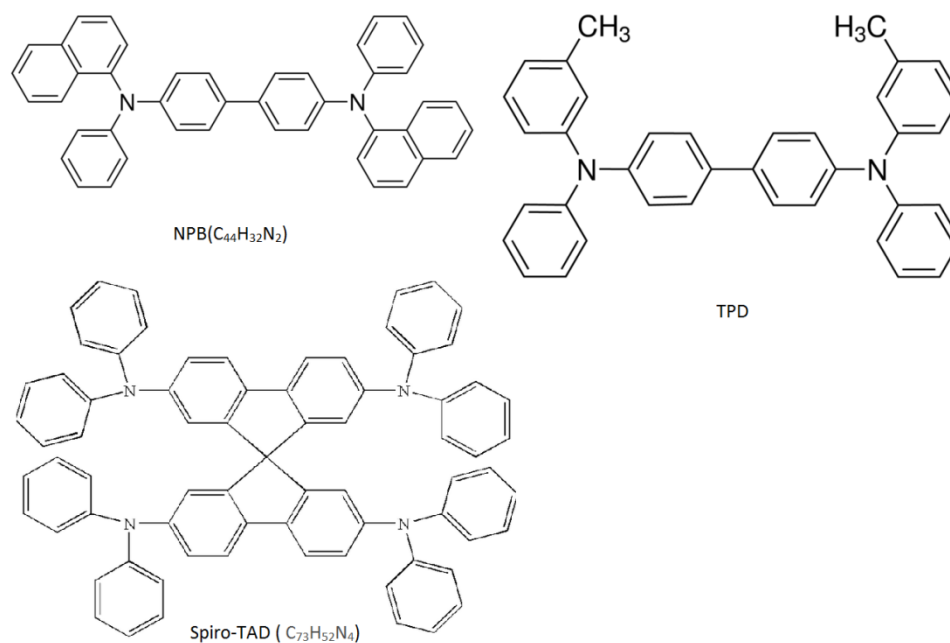
Injekcija vrzeli se nanaša na injekcijo vrzeli iz anode in onemogočanje pritoka elektronov v anodo. Ta material se uporablja za zmanjšanje višine potencialne bariere, kar omogoča lažjo injekcijo elektronov. Material, ki se uporabi za plast injekcije vrzeli, je izbran tako, da se HOMO nivo nahaja med HOMO nivojem vrzelne transportne plasti in delovno funkcijo anodne elektrode. Primere struktur materialov za injekcijo vrzeli podaja slika 3.4.



Slika 3.4: Strukture materialov za injekcijo vrzeli [9]

3.5 Material za transport vrzeli

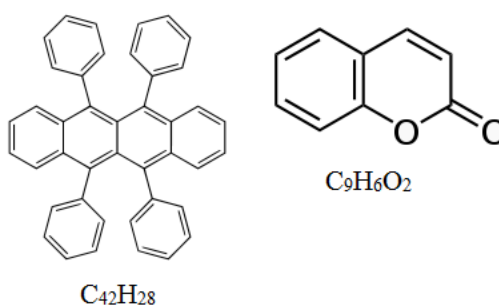
Material za transport vrzeli rabimo za transport vrzeli iz plasti injekcije vrzeli v emisijsko plast. Ta material je običajno izbran tako, da ima večji prepovedan pas. Tega mora imeti zato, da se energija vzbujanja emisijske plasti ne prenese na transportno plast. Nekaj struktur materialov, ki se uporabljajo za transport vrzeli je podanih na sliki 3.5.



Slika 3.5: Strukture materialov za transport vrzeli

3.6 Materiali za emisijsko plast

Plast, skozi katero se oddaja generirana svetloba, imenujemo emisijska plast. Elektronski ali vrzelni transportni sloj lahko služita tudi kot emisijske plasti. Običajno imajo materiali za emisijsko plast že zmožnost oddajati svetlobo, vendar s pomočjo dopiranja lahko natančno nastavimo barvo svetlobe, ki jo želimo sevati. V takih primerih mora biti energijska reža materiala, ki ga želimo dopirati, širša od energijske reže dopanta. Slika podaja nekaj materialov, ki oddajajo fluorescentno svetlobo.



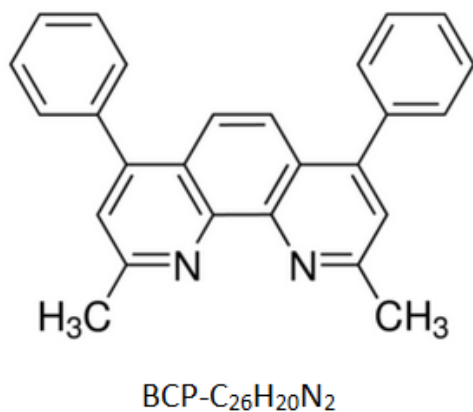
Slika 3.6: Strukture materialov, ki oddajajo fluorescentno svetlobo

Za emisijsko plast se uporabljajo tudi fosforescentni materiali, ki so opisani v poglavju 3.3.

3.7 Material za transport elektronov

Material za transport elektronov se uporablja za transport elektronov, ki so injicirani iz katode. Plast za transport elektronov se uporablja v kombinaciji s plastjo za injekcijo elektronov npr. LiF, da izboljšamo zmožnost injekcije elektronov. Elektronski transportni sloj, se tudi uporabi brez sloja za injekcijo elektronov, ko se delovna funkcija katode ujema z LUMO nivojem elektronskega transportnega sloja.

Podobno kot pri sloju za transport vrzeli, mora imeti elektronski transportni sloj širšo prepovedano območje od emisijske plasti. Ta se tudi uporablja za omejevanje gibanja ekscitonov in vrzeli, kar izboljša izkoristek sevanja. Material na sliki 3.7 se pogosto uporablja kot elektronski transportni sloj, ker ima dobro lastnost blokiranja vrzeli. Pogosti material za ta sloj je tudi Alq₃. Sloj za blokiranje vrzeli se uporablja, da blokira transport vrzeli in s tem omogoči, da se večina naboja nabere v emisijski plasti in s tem dobimo več rekombinacij.



Slika 3.7: Primer strukture materiala za transport elektronov

4 Primerjava med OLED in LCD zasloni

V tem poglavju bomo naredili kratko primerjavo med OLED in LCD zasloni. Potrebne komponente za izdelavo LCD in OLED zaslona so podane na sliki 4.1. Kot je razvidno iz prvega pogleda na to sliko, LCD zaslon potrebuje mnogo več komponent kot OLED zaslon. LCD sestoji iz mnogih komponent, ker mora pretvoriti osvetlitev ozadja (backlight) v enotno površinsko emisijo, ter vžigati in izklapljati svetlobo s pomočjo zaklopke iz tekočega kristala, ki je postavljen med polarizatorjema.

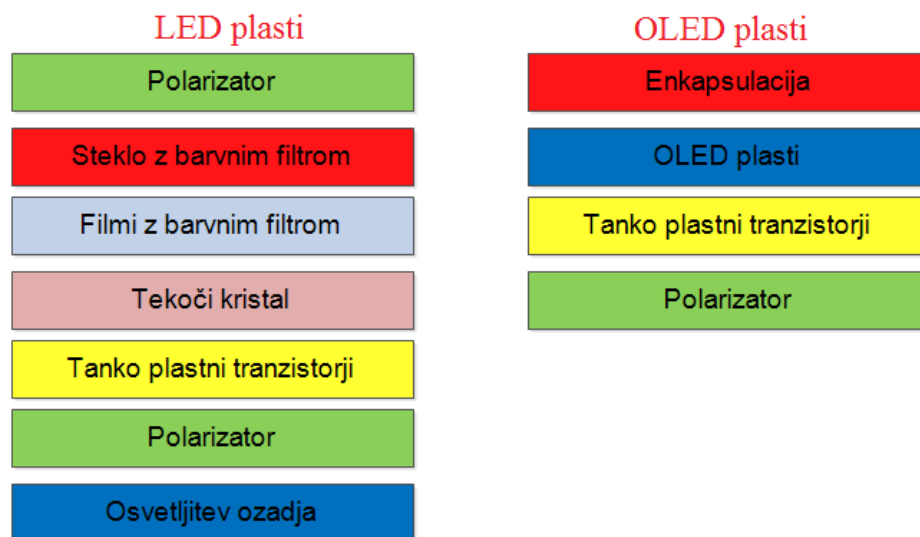
Običajno LCD televizorji za hrbtno osvetlitev uporabljajo hladno katodno fluorescentno cev ali več LED. Uporabljata se dva tipa LED:

1. LED, ki oddajajo svetlobo s kratko valovno dolžino, ki je pretvorjena v svetlobo z večjo valovno dolžino z uporabo fluorescentnega materiala,
2. LED, ki oddajajo osnovne tri barve (rdečo, zeleno in modro).

Svetlobni vir je tako lahko ali linearen (fluorescentna cev) ali točkovni, to pomeni, da mora biti svetloba pretvorjena v površinsko obliko, da se lahko uporabi kot hrbtni svetlobni vir. Svetloba, ki se odbije od reflektorja, potuje skozi svetlobni vodnik in pride do difuzije svetlobe. Svetlobni vodnik je narejen iz materiala, ki ima zelo visok odbojni indeks, npr. akrilni polimer. Ta dostavlja svetlobo s totalnim notranjim odbojem, zaradi velike razlike med odbojnima indeksoma tega materiala in okoliškega zraka. Svetloba, ki izstopa iz svetlobnega vodnika, je prenesena skozi prizmatični list in difuzor in je nato polarizirana s pomočjo zadnjega polarizatorja. Polarizacija svetlobe se spremeni s poljsko inducirano orientacijo molekul tekočih kristalov, tako da iz polarizatorja izstopi le zelena količina svetlobe. Ta svetloba je nato še spremenjena v zeleno RGB barvo s pomočjo barvnega filtra. Končno intenziteto svetlobe dosežemo z izhodnim polarizatorjem in ta izhodna svetloba doseže človeško oko.

Pri OLED zaslonih pride do svetlobne emisije znotraj OLED elementa, ki je bil izdelan na steklenem substratu. Pri OLED zaslonih se uporablja polarizator za zmanjšanje svetlosti zaslona za okoli 50%. Svetlost zaslona moramo zmanjšati, ker pri gledanju OLED zaslona v svetlem okolju pride zaradi odbojev od površine do

poslabšanja kontrastnega razmerja. Pogosto se uporabljajo polarizatorji s 45% prepuščanjem. LCD zasloni imajo tudi probleme z odboji svetlobe iz okolice. Za rešitev tega problema LCD zasloni uporabljajo črno matriko za izboljšanje razmerja. Splošno je odbojnost resnejši problem pri OLED, ker ti elementi uporabljajo odsevne elektrode, a pri LCD zaslonih se uporabljajo prozorne elektrode na obeh straneh.



Slika 4.1: uporabljene komponente v LCD in OLED televizijah

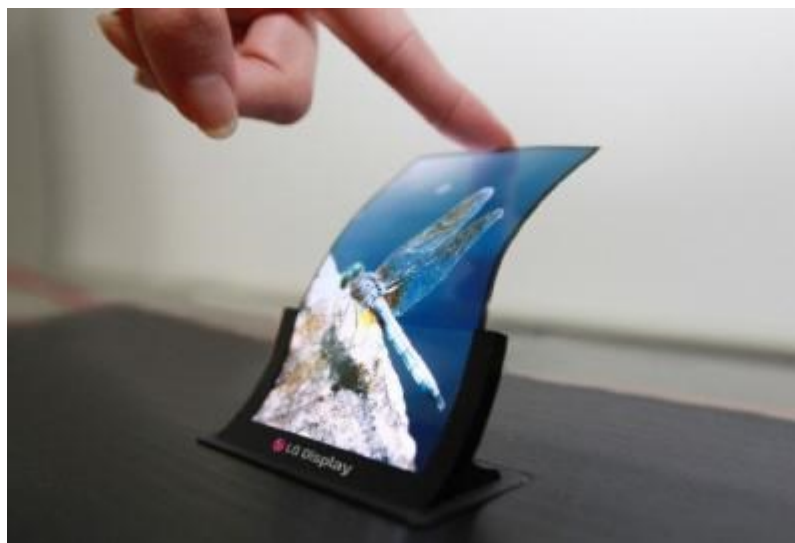
4.1 Prednosti OLED zaslonov v primerjavi z LCD zasloni

4.1.1 Cena

OLED elemente lahko nanesemo na katerikoli primeren substrat z inkjet printerjem ali celo z zaslonskim tiskanjem, kar pomeni, da bi teoretično njihova izdelava morala biti cenejša glede na LCD ali plazma zaslone. Vendar temu ni tako, ker je izdelava OLED substrata dražja, kot izdelava LCD zaslona s tankoplastnimi tranzistorji. Vendar se bo cena v prihodnosti, zaradi množične izdelave, zmanjšala. Obstajajo metode, kot npr. t. i. roll to roll napajanje [15]. Ta metoda omogoča izdelavo tisoče organskih elementov na minuto za minimalen strošek. Toda zaenkrat ta metoda predstavlja tudi problem pri izdelavi več plastnih elementov, saj je zahtevno poravnati natisnjene plasti na željeno natančnost.

4.1.2 Teža in fleksibilnost plastičnih substratov

OLED zaslone je mogoče izdelati na fleksibilnih plastičnih substratih, kar omogoča tudi izdelavo fleksibilnih organskih LED za nove aplikacije, kot so zasloni, ki jih lahko zvijemo in so vgrajeni v tkanine oz. oblačila. Primer fleksibilnega OLED zaslona prikazuje slika 4.2. Ker je uporabljen substrat lahko fleksibilen, lahko te zaslone izdelujejo po nizki ceni, še več, plastični substrati se ne morejo razbiti, kar se pri LCD zaslonih lahko.



Slika 4.2: Fleksibilni OLED zaslon

4.1.3 Večji zorni kot

OLED zasloni tudi omogočajo večjo kontrastno razmerje in večji zorni kot, kakor LCD zasloni, ker OLED piksli oddajajo direktno svetlobo. Barva OLED pikslov izgleda pravilna in ne premaknjena tudi, ko se kot gledanja približa 90° glede na normalo.

4.1.4 Boljši izkoristek moči

LCD zasloni filtrirajo svetlobo, ki se generira v ozadju in prepušča le majhen del le te. To pomeni, da LCD zasloni ne morejo prikazati pravilne črne barve. Pri OLED zaslonih neaktiven OLED piksel ne oddaja svetlobe in ne porablja nobene moči, kar omogoča prikaz pravilne črne. Ker OLED zasloni ne potrebujejo hrbtnih luči, so takšni zasloni tudi lažji. Zaradi tega bi izdelava elektronike za OLED zaslone morala biti cenejša, vendar kot smo omenili, so OLED zaenkrat le še tržna niša. Njihova izdelava ni tako poceni, kot bi lahko bila, če bi bila njihova izdelava množična.

4.1.5 Odzivni čas

OLED zasloni imajo tudi hitrejši odzivni čas od LCD-jev. Z uporabo kompenzatorjev odzivnega časa lahko najhitrejši moderni LCD-ji dosežejo odzivni čas 1 ms za njihov najhitrejši prehod med barvami in omogočajo osvežilne frekvence do 144 Hz. Pri podjetju LG pravijo, da so odzivni časi OLED zaslonov do 1000 krat hitrejši, kot LCD-jevi. Glede na približke naj bi ti zasloni dosegali hitrosti pod 10 μ s, kar pomeni, da se frekvence osveževanja približujejo 100 kHz. Posledica krajšega odzivnega časa je manj meglitve gibanja.

4.1.6 Sposobnost prikazovanja črne barve

Eden najpomembnejših faktorjev, ki pripomorejo k odlični kvaliteti slike zaslonov je, kako dobro lahko zaslon prikaže globoko črno barvo. Globlje črne barve med drugim omogočajo višje kontraste in bolj bogate barve, čigar posledica je bolj realistična in lepša slika. V tej kategoriji se nobena druga tehnologija ne more primerjati z OLED zasloni.

LED zasloni uporabljajo LED hrbtne svetila, ki svetijo za LCD panelom. Kljub uporabi naprednih tehnologij za zatemnitev, ki zatemnijo LED in za katere ni potrebno, da svetijo s polno močjo, se LED zasloni trudijo za doseg temne črne barve. Še en problem LED zaslonov je uhajanje svetlobe izza robov.

OLED zasloni nimajo nobene od naštetih težav. Če piksel OLED zaslona ni pod nobeno napetostjo, ne generira svetlobe, kar pomeni, da je črn. OLED zasloni lahko tudi reproducirajo bolj fine odtenke več barv znotraj vidnega barvnega spektra.

4.2 Slabosti OLED zaslonov

4.2.1 Življenjski čas

Glavni problem OLED televizorjev je bil omejen življenjski čas organskih materialov. Poročilo iz leta 2008 podjetja DisplaySearch-a, ki izvaja tržne raziskave na področju zaslonov [10] je pokazalo, da imajo Sony-jevi AMOLED zasloni težavo z različnimi staranji. Rezultati testiranja so pokazali, da se po 1.000 urah modro sevanje degradira za 12%, rdeče za 7% in zeleno za 8%. Največji problem je v modri OLED, pri kateri se je izkazalo, da ima življenjski čas okoli 14.000 ur, kar pomeni, da je življenjski čas TV zaslona okoli 5 let pri 8-urnem dnevnem delovanju. V tem času pride na 50% originalne svetilnosti. Ta življenjski čas je dosti nižji v primerjavi z LCD ali LED tehnologijami, ki dosežejo polovično svetilnost pri okoli 25.000 do 40.000 ur, odvisno od proizvajalca in modela. Do degradacije pride zaradi kopičenja nesevalnih

delcev in dušiteljev luminiscence (luminiescence quenchers [11]) v emisijski plasti. Kar nekaj izdelovalcev zaslonov se trudi, da bi jim podaljšali življenjski čas. S svojimi raziskavami bi radi dosegli celo, da bi OLED zasloni imeli daljši življenjski čas kot LCD zasloni. Upajo, da jim bo to uspelo z izboljšanjem razmerja med generirano svetlobo in pridobljeno, kar bi pomenilo, da bi dosegli enake svetilnosti pri nižjih delovnih tokih. Leta 2007 so bili izdelani eksperimentalni OLED elementi, ki so vzdrževali konstantno luminiscenco z vrednostjo 400 cd/m^2 za več kot 198.000 ur pri zeleni OLED, ter 62.000 ur pri modri. Glede na te podatke, so uspeli zelo povečati življenjski čas elementov, vendar je še vedno ogromna razlika pri različnih barvah, kar bo škodilo barvnemu ravnovesju.

4.2.2 Barvno ravnovesje

Kot smo omenili v prejšnjem poglavju, se OLED material, ki proizvaja modro svetlobo, bistveno hitreje degradira, kot materiali, ki proizvajajo ostale barve. To pomeni, da se bo oddajanje modre svetlobe znižalo glede na druge barve. Ker bodo različne barve sevale z različnimi jakostmi, se bo barvno ravnovesje zaslona spremenilo in to je veliko bolj opazno kot znižanje skupne svetilnosti. Temu problemu se lahko izognemo s sprotnim nastavljanjem barvnega ravnovesja. To bi lahko dosegli s pomočjo naprednih krmilnih vezij in z interakcijo uporabnika (uporabnik v nastavitvah TV zaslona nastavlja svetilnost), kar bi bilo v današnjem času nesprejemljivo za uporabnika. Druga, bolj praktična pot k izboljšanju barvnega ravnovesja je, da proizvajalci optimizirajo velikosti rdečih, zelenih in modrih subpikslov. To zmanjša gostoto toka skozi nje in izenači njihove življenjske čase.

Da bi OLED zasloni uspeli kot nadomestilo za LCD tehnologijo, bo potrebno izboljšati izkoristek in življenjski čas modrih OLED elementov. Veliko raziskav je narejenih na razvoju modrih OLED z visokim kvantnim izkoristkom in iskanje intenzivnejše modre sevalne barve. Rdeči (625 nm) OLED in zeleni (530 nm) OLED elementi imajo notranji kvantni izkoristek okoli 20% in 19%. Pri modrih (430 nm) OLED elementih je bilo mogoče doseči le kvantni izkoristek v rangi od 4% do 6 %.

4.2.3 Vodne poškodbe

Organski materiali za OLED zaslone so zelo neodporni proti vodi, voda jih v trenutku poškoduje. Zaradi te slabe lastnosti so pri izdelavi zaslonov potrebni procesi za izboljšanje tesnjenja. Vodne poškodbe lahko še posebej omejijo dolgotrajnost fleksibilnih OLED zaslonov.

4.2.4 Zmogljivost OLED zaslonov na prostem

OLED zasloni se zelo slabo obnašajo na prostem. To pa zaradi tega, ker se kovinska katoda v OLED zaslonu obnaša kot zrcalo, ki ima 80% odbojnost, kar povzroči slabo berljivost v prostorih z visoko osvetljenostjo, kot je to v primeru, če imamo OLED zaslon na prostem. Vendar se lahko ta problem hitro odpravi s pomočjo krožnega polarizatorja in protiodbojnostnim premazom. S tem se odbojnost zniža na manj kot 0,1%. Nedavni napredki v OLED tehnologijah so omogočili, da se OLED zasloni obnašajo v sončni svetlobi celo boljše kot LCD zasloni. Kot primer je Super AMOLED zaslon, ki ga uporabljajo v Samsungovem Galaxy S5 telefonu. Ta aparat je prekosil vse LCD zaslone na tržišču glede na svetlost in odbojnost zaslona.

4.2.5 Poraba moči

Ko z OLED zaslonom prikazujemo sliko, ki je po večini črna, bo uporabil samo okoli 40% moči, ki bi jo moral uporabiti LCD zaslon za enako sliko. Za večino ostalih slik pa porablja okoli 60–80% moči LCD zaslona. Pri OLED zaslonih pa problem predstavlja slika, ki ima belo ozadje (npr. spletna stran ali dokument). V takih primerih OLED zaslon porabi več kot trikratno moč LCD zaslona za prikaz slike. To povzroči hitrejšo porabo baterije pri mobilnih napravah, ko uporabljamo bela ozadja.

4.2.6 Svetlost

Glede na svetlost imajo LCD zasloni prednost pred OLED zasloni, ker na hrbtni strani LED lahko svetijo z veliko močjo. OLED zasloni lahko tudi postanejo zelo svetli, vendar če svetlost OLED piksla nastavimo na maksimum za daljši čas, se mu ne le zmanjša življenjski čas, temveč tudi potrebuje nekaj časa, da se izklopi in postane črn.

4.2.7 Velikost

V kategoriji velikosti OLED zasloni še zaostajajo za LED/LCD zasloni. Trenutno se na tržišču lahko kupi OLED televizor z diagonalo 65 inčev, kar je približno 165 cm. Konkurenca so jim 90 inčni (228,6 cm) LCD televizorji, kot je na primer Sharp-ov televizor AQUOS HD. Velik izziv za proizvajalce OLED zaslonov je bil doseči velikost do 55 inčev, vendar ker so to velikost presegli, upajo, da pri naslednjih korakih večanja velikosti ne bo večjih težav.

4.2.8 Učinek zapečene slike na zaslonu

Kadar zaslon daljši čas prikazuje statično sliko in se ta slika še vedno pojavi tudi, ko se prikazovana slika spremeni, imenujemo to učinek zapečenosti slike. Ta problem se je pojavljal že pri katodnih TV zaslonih in plazemskih TV-jih, sedaj pa se je pojavil tudi pri OLED zaslonih. Do tega pride, ker dlje časa prikazujemo statično sliko in se čez čas vžgani piksli degradirajo. Če nek piksel dlje časa dovolj močno obremenimo, se bo ta začel temniti pred ostalimi piksli, kar bo povzročilo nastanek temnega vtisa slike. Zapečena slika televizorja iz trgovine, ki je služil kot razstavni eksponat prikazuje slika 4.3. Vendar v realnosti to naj ne bi nikomur povzročalo problemov. Če bi nekdo hotel, da bi nastal ta učinek, bi moral TV zaslon namerno zlorabiti. Tudi logotip, ki ga uporabljajo TV kanali, pogosto izgine ali pa je narejen namenoma prozorno, da bi se izognili zapečenosti. Če pa bi ga hoteli povzročiti, bi moral gledati nek TV program ves dan in kar nekaj dni pri največji možni svetlosti. Toda to skoraj ni verjetno, zato mislim, da pri domači uporabi do tega problema ne bi smelo priti.



Televizor v trgovini kot razstavni eksponat



Slikovni burn-in statične slike

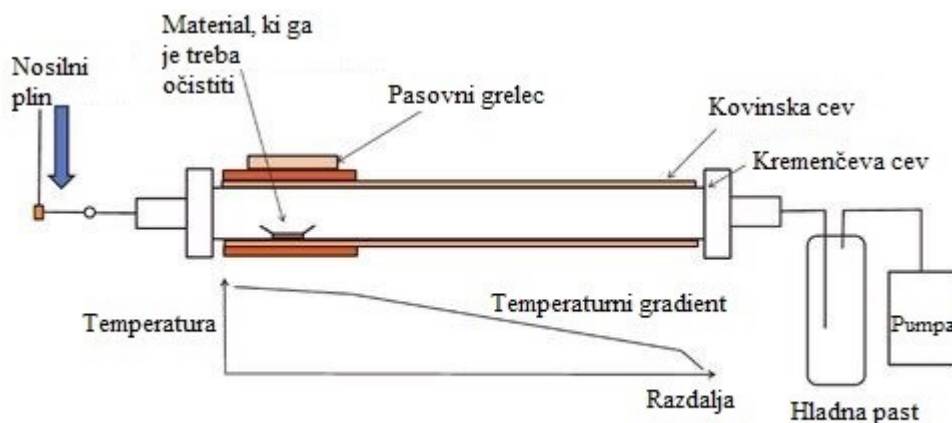
Slika 4.3: Slikovni burn-in OLED zaslona

5 Proces izdelave OLED elementov

5.1 Postopek očiščevanja materiala

Življenjska doba in karakteristike vseh OLED elementov so odvisne od čistosti materialov, ki se uporabljajo za njihovo izdelavo. Za zagotavljanje čim večje čistote materialov, uporabljajo proces očiščevanja s sublimacijo. Opremo, ki jo potrebujemo za proces sublimacije, sestavljajo: kvarčna cev, kovinska cev, ki je pritrjena na kvarčno cev in se uporablja za nastavljanje temperaturnega gradienta in pasovni grelec. Vse te komponente lahko vidimo na sliki 5.1.

Material, ki ga je potrebno očistiti, postavimo pod pasovni grelec, ki ga počasi segreva. Bolj kot je material oddaljen od grelca, manjša je temperatura. Iz tega razloga potuje sublimiran material na lokacijo, ki ima nižjo temperaturo. Nevnetljive nečistoče ostanejo v posodici, kjer je bil prvotno ves material. Material z visoko maso je pridobljen v območju z visoko temperaturo, material z majhno maso pa je pridobljen v območju z nizko temperaturo. S to metodo je mogoče ločiti različne mase. Med izdelavo OLED elementov, kljub temu, da je material enoten (se ne spreminja skozi čas), lahko katerekoli nečistoče, ki jih vsebuje, bistveno vplivajo na karakteristike končnega izdelka. Prav zato je proces čiščenja s sublimacijo zelo pomemben.



Slika 5.1: Shema naprave za očiščevanje materiala s sublimacijo

5.2 Postopek naparevanja

Naparevanje je postopek, ki pretvori material v trdnem ali tekočem stanju v plinasto stanje. Poznamo dve vrsti materialov: materiale, ki direktno prehajajo iz trdega v plinasto stanje, imenujemo jih sublimacijski materiali in materiale, ki gredo najprej v tekoče stanje in nato v plinasto. Slednje imenujemo topljeni materiali. Najpreprostejši vir izparevanja je tako imenovan čolniček. Takšno ime je dobil, ker je po obliki podoben čolnu in je izdelan iz kovine (pogosto iz volframa). Kovinski material služi kot uporovni vir toplote, ki segreva material znotraj čolnička, da začne izhlapevati. Do izhlapevanja materiala lahko pridemo tudi na drug način, npr. s pomočjo snopa elektronov. Toda ta metoda ni pogosto uporabljena za OLED, ker visokoenergijski elektroni, ioni ali X žarki lahko poškodujejo substrat tankoplastnih tranzistorjev in OLED material. Za izdelavo OLED elementov je poleg čolnička kot vir izhlapevanja bolj pogosto uporabljen lonček, ker toploto dovaja bolj enakomerno. Ko uporabimo ta vir toplote, se le-ta dovaja preko uporovnega gretja z žarilno nitko, ki je postavljena zunaj lončka.

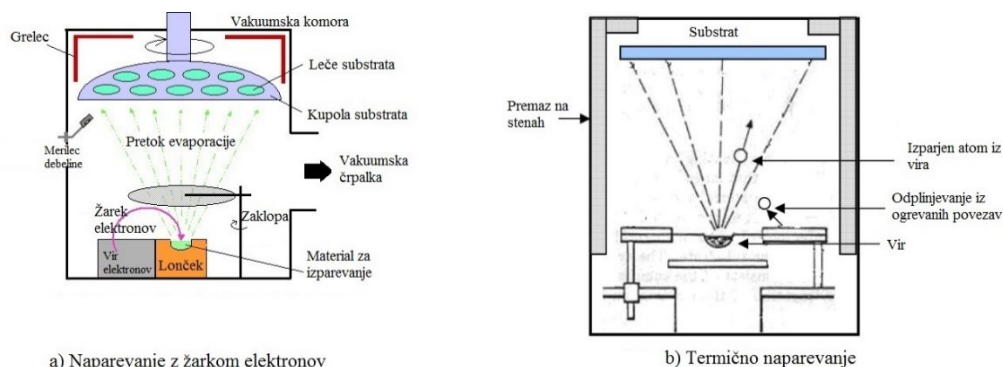
Pri postopku izhlapevanja je potrebno natančno kontrolirati, koliko materiala se nanese na substrat. Odstopanje debeline nanosa mora biti znotraj nekaj procentov načrtovane debeline. Če debelina nanosa ni znotraj zastavljenih meja, potem je OLED element neenoten in neprimeren za uporabo v izdelavi OLED zaslona.

Za kontrolo debeline organske plasti, ki se nanese na substrat, so razvili naslednje metode:

- povečanje razdalje med substratom in virom izhlapevanja,
- rotiranje substrata,
- postavljanje vira izhlapevanja z odmikom od centra rotacije substrata.

Ker je razdalja med virom in substratom zelo velika, se precejšni del materiala nanese na stene komore, kar pomeni, da je izkoriščenost materiala običajno nizka.

Slika 5.2 prikazuje strukture komor za termično in elektronsko napajevanje.



Slika 5.2: Shemi struktur za termično in elektronsko napajevanje

5.2.1 Vrste virov napajevanja

Joulovo segrevanje zaradi električnega toka, ki teče skozi kovino z visokim tališčem, je najbolj uporabljena metoda uporovnega segrevanja za izparevanje materiala. Ta metoda se lahko implementira na dva načina. Prvi način je, da kovino z visokim tališčem uporabimo kot žarilno nitko, s katero ustvarimo segrevanje. Drugi način pa je, da uporabimo takšno kovino kot čolniček. Pri uporabi druge metode, je potrebno biti pozoren na kompatibilnost med materialom za čolniček in materialom, ki želimo da izpari. Izogniti se je potrebno katerikoli interakciji med tema dvema materialoma.

Če uporabimo več lončkov z različnimi materiali, lahko na substrat naneseemo zmes različnih materialov. S tem postopkom dobimo dopiran material. Ta postopek je nujno potrebno izvesti z več lončki, ker če imamo le enega, znotraj njega zmes materialov, ne bo izhlapevala hkrati (materiali potrebujejo različne pritiske za doseganje izhlapevanja) in en material bo izhlapel, ko drugi ne bo (proces destilacije). Vir izparevanja je potrebno izbrati glede na parametre izparevanja specifičnega materiala.

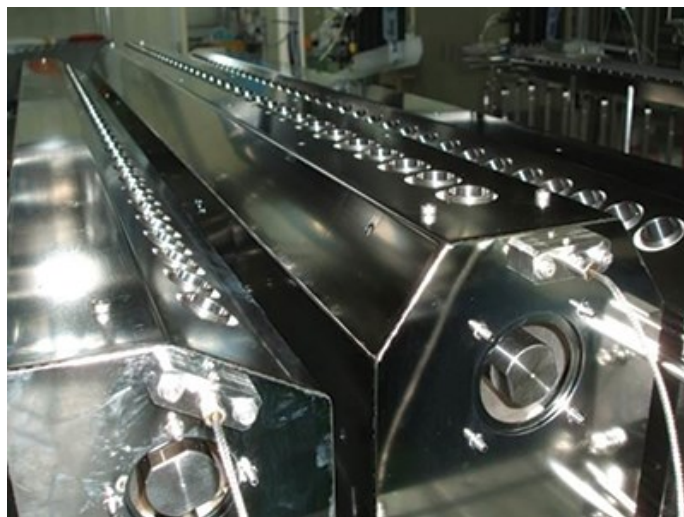
Če proces napajevanja izvaja en sam vir izparevanja cel teden, se bodo karakteristike OLED elementa spremenile med delovanjem opreme za izparevanje ali pa bo zmanjkalo materiala, ki ga želimo izpariti. V ta namen se za ta proces uporablja revolverski mehanizem. Pri tem mehanizmu, imamo več lončkov, ki se med procesom izmenjujejo, kot naboji v revolverju. Kako to deluje v praksi lahko vidimo na sliki 5.3.



Slika 5.3: Revolverski mehanizem, kot oprema za napajanje

Materiali za OLED elemente imajo redko visoko termično prevodnost. To pomeni, da bo material blizu sten lončka hitreje izpareval, kot material na sredini. Zložen material, ki ostane na sredini se lahko tudi sesuje (pride do kolapsa materiala na sredini), kar lahko spremeni čas izhlapevanja materiala v lončku, to pa je pri proizvodnji problematično. Ker materiali pri stenah hitreje izparevajo, bi bilo potrebno temperaturo grelca dvigniti nad običajno temperaturo izparevanja, da bi kot rezultat dobili ustrezno hitrost izparevanja. Vendar visoke temperature lahko poškodujejo lastnosti OLED materiala. Ustrezna rešitev te težave je dodajanje materiala, ki ima visoko termično prevodnost in je termično stabilen okoli temperature izparevanja OLED materiala. Ker ima dodan material visoko termično prevodnost, se problemom, kot so nenadne spremembe v hitrosti izparevanja in razgradnja materiala zaradi previsoke temperature, na ta način lahko izognemo.

Uporabljajo se tudi linearni viri napajanja. Primer takšnega vira lahko vidimo na sliki 5.4.



Slika 5.4: Linearni vir napajanja

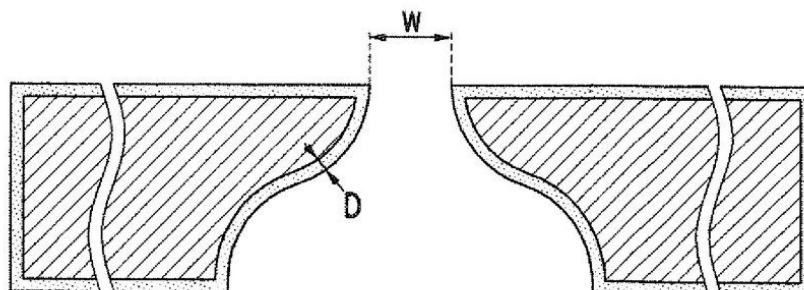
5.3 Vzorčenje z uporabo maske za senčenje

Trenutno (od leta 2011) večina OLED zaslonov v proizvodnji za barvno vzorčenje uporablja masko. Shemo postopka lahko vidimo na sliki 5.6.

Kriteriji za optimalno vzorčenje, ki zagotovijo visoko kakovost so:

- visoka dimenzionalna natančnost,
- visoka natančnost izdelave odprtine,
- nizki termični raztezek,
- minimalni efekt senčenja (nenamerno dodatno senčenje zaradi visokega vpadnega kota).

Če ti kriteriji niso izpolnjeni, lahko izdelan OLED zaslon prikazuje nenormalno sliko in povzroči degradacijo zaslona. Da zmanjšajo efekt senčenja, se pri maski uporablja stožčasta oblika odprtine, ki jo lahko vidimo na sliki 5.5.

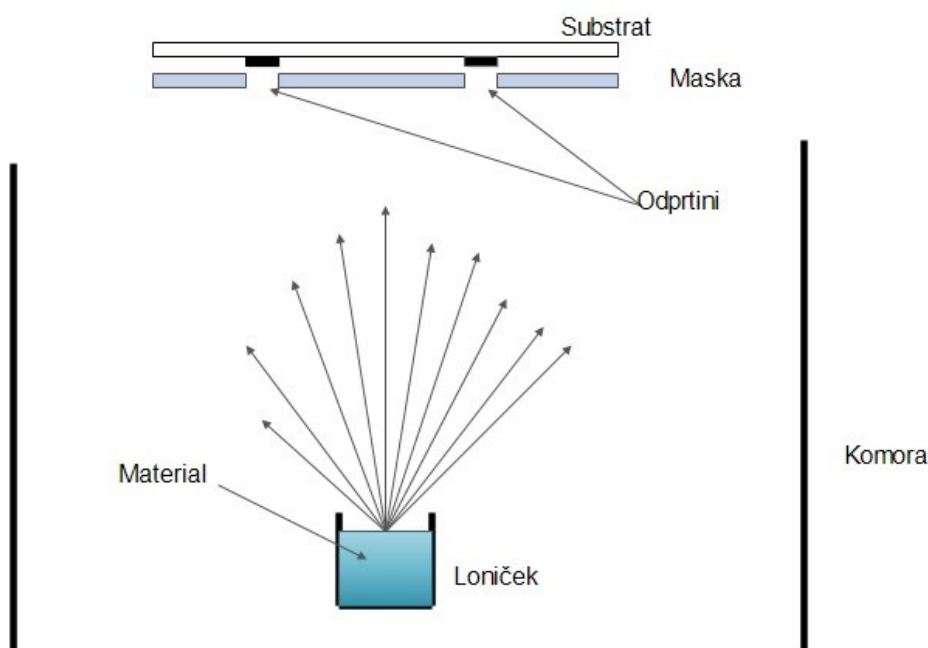


Slika 5.5: Maska za senčenje

Maska za senčenje je tanka plast narejena iz zlitine (npr. zlitina niklja in železa - invar). To masko običajno izdelajo z jedkanjem ali galvanizacijo. Metoda jedkanja ima kar nekaj prednosti pred galvanizacijo, kot so:

- uporaba kovine z nizkim termičnim raztezkom (invar),
- postopek je relativno poceni,
- kot piksla pri maski za senčenje je zaobljen.

Po drugi strani z metodo galvanizacije dobimo zelo tanke maske v primerjavi z jedkanjem, vendar ne moremo doseči tako nizkega temperaturnega raztezka. Galvanizacija je tudi običajno dražja kot jedkanje.



Slika 5.6: Vzorčenje z uporabo maske za senčenje

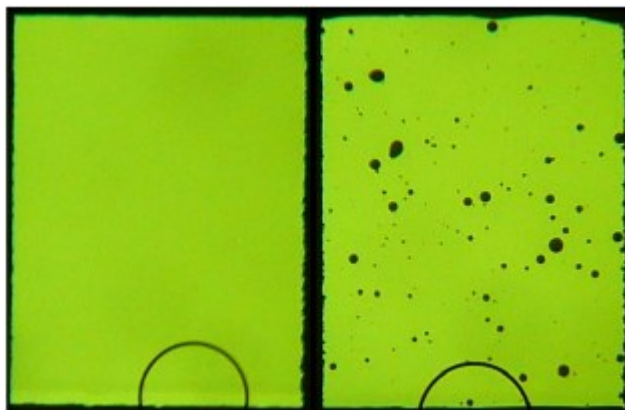
5.4 Vgrajevanje (enkapsulacija) OLED elementov

5.4.1 Defekti zaradi črnih pik in širjenja robov

Pri izdelavi visoko kvalitetnih OLED elementov je potrebno biti zelo pazljiv. Ker so OLED elementi zelo občutljivi na vodo, je potrebno vsak element obvarovati pred vlago.

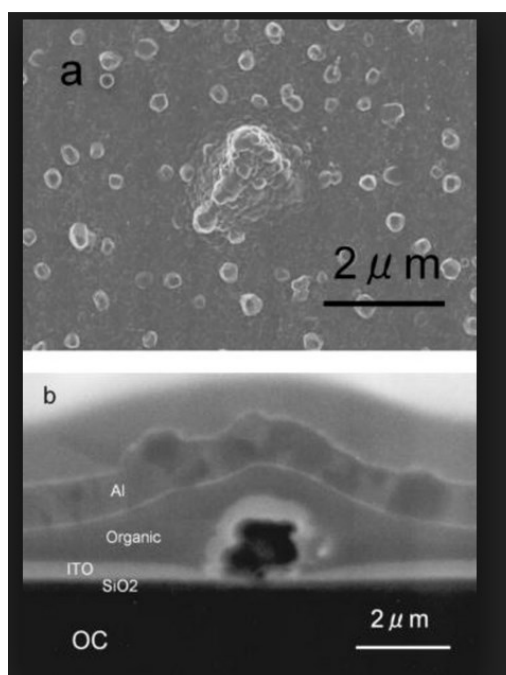
Defekt, ki ga lahko vidimo na sliki 5.7, je tako imenovan defekt črne pike. Do te napake naj bi prišlo zaradi luščenja katode ali zaradi degradacije organskega materiala v bližini vdolbinic. Te vdolbinice nastanejo zaradi več mehanizmov, npr. nepravilnosti

na površini substrata ali anode. Izbokline na strukturi organske plasti so tudi pogosti vzroki nastajanja črnih pik.



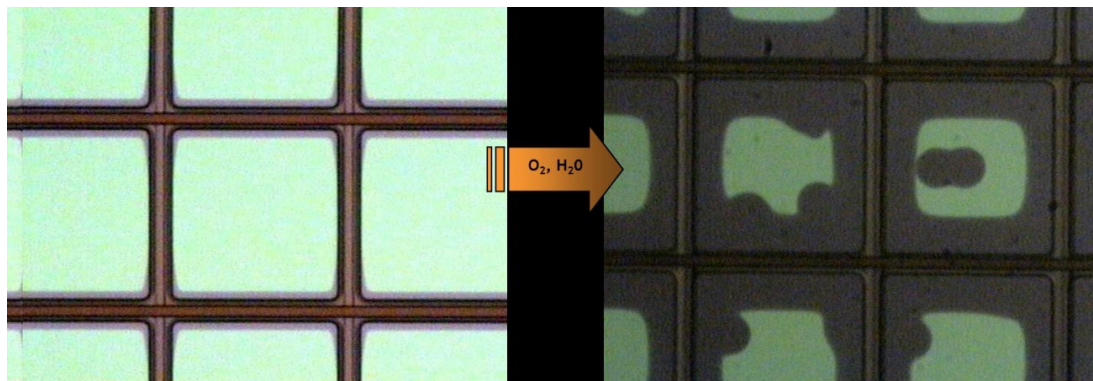
Slika 5.7: Širjenje defekta črne pike skozi čas

Na sliki 5.8 je vidna črna pika pod mikroskopom iz ptičje perspektive, ter iz prereza.



Slika 5.8: Mikroskopski prerez strukture okoli črne pike

Druga okvara, ki nastane zaradi preslabe enkapsulacije OLED elementov je t. i. širjenje robov ali skrčenje pikslov. Pri tem defektu se zaradi preslabe enkapsulacije začne širiti nesevalno območje (slika 5.9).



Slika 5.9: Širjenje robov ali krčenje pikslov

Do OLED zaslonov pa ne pride vlaga le od zunaj. Če se uporablja polimerna smola kot robna izolacija, je potrebno natančno preučiti materiale in pogoje za peko, da zagotovijo, da njegova prisotnost ne povzroči dodatne vlage. Pri izdelavi OLED zaslonov je pomembno, da se izognejo kakršni koli notranji ali zunanji vlagi, da dosežejo čim večjo kvaliteto zaslonov.

5.4.2 Enkapsulacije zgornje in spodnje sevalne strani OLED elementov

Pri OLED elementu, ki seva svetlobo na spodnji strani, se za zgornjo elektrodo (katoda) uporablja neprozorni aluminij. Spodnjo prozorno elektrodo (anodo) običajno naredijo iz indij kositrovega oksida. V tem primeru generirana svetloba znotraj OLED elementa potuje skozi steklo in se sprošča ven. Pri spodnje sevalnih OLED elementih je dodano sušilno sredstvo med substrat OLED elementa in nasprotni substrat. To sušilno sredstvo uporabijo zato, da absorbira kakršnokoli vlago znotraj elementa. Za zaključek strukture dodajo še mejno tesnilo iz epoksi smole.

Pri strukturah, ki sevajo svetlobo iz zgornje strani, neprozorno sušilo ni mogoče postaviti znotraj naprave. Lahko bi uporabili prozorno sušilo, vendar tega nikoli niso v proizvodnji tudi izvedli. Enkapsulacijo OLED elementov, ki sevajo navzgor, izvedejo z nanašanjem anorganskih materialov (SiO_xN_y , SiN_x ,...) s pomočjo nizko temperaturnega kemičnega napajanja. Enkapsulacijo teh elementov izvajajo prav tako s pritrditvijo stekla z laserskim tesnjenjem ali z epoksi lepilom.

Ko se uporabi tanka plast za enkapsulacijo, imamo možnost dodati anorgansko plast iz materialov kot so SiO_xN_y ali SiN_x . Oba ta materiala zagotovita dobro bariero pred vlago, če na elementu nimamo vdolbinic. Plasti anorganskih materialov imajo nizko koračno pokritost (angl. step coverage). Korak je prehod iz spodnjih stopenj rezin na zgornje plasti. Koračna pokritost je razmerje med debelino plasti ob stenah koraka in debelino plasti na dnu koraka. Dobra koračna pokritost zniža elektromigracije in visoko uporabne povezave. Po drugi strani imajo organske plasti

dobro koračno pokritost, vendar slabo sposobnost zaščite proti vlagi. Iz teh razlogov se uporabljajo izmenične organske in anorganske plasti, ki omogočajo dobro koračno pokritost in dobre pregradne zmožnosti.

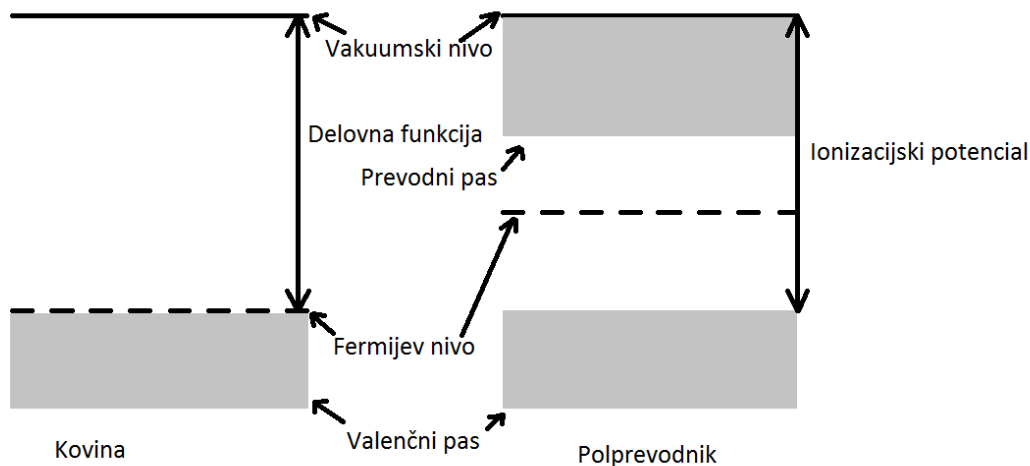
5.5 Analiza problemov OLED elementov

Če se zdi, da so lastnosti izdelanega OLED elementa slabe, je potrebno analizirati posamične komponente elementa ali ostanke materiala znotraj lončka za napajanje, da poiščemo vzrok. V tem poglavju bomo opisali metode, ki se uporabljajo za odpravljanje in analizo problemov.

5.5.1 Meritev ionizacijskega potenciala

Kot je že napisano v poglavju 2.2.3, je zelo pomembno pri izdelavi OLED elementov, da se delovna funkcija elektrode ujema z energijskimi nivoji organskih materialov (HOMO in LUMO nivoji). S tem dosežemo visoki izkoristek in majhno porabo pri sevanju svetlobe OLED elementa. Za ta namen se uporablja analizator ionizacijskega potenciala.

Analizator ionizacijskega potenciala izmeri razmerje med številom fotoelektronov, ki so sproščeni iz vzorčne površine po obsevanju z UV svetlobo. Prečkanje tega razmerja z x osjo nam poda delovno funkcijo (to je minimalna potrebna energija, da premaknemo elektron na točko v neskončnosti) in polprevodniški ionizacijski potencial (potrebna energija, da odstranimo elektron in, da se tvori ion; temu tudi pravimo ionizacijska energija). Delovno funkcijo in ionizacijski potencial prikazuje slika 5.10.



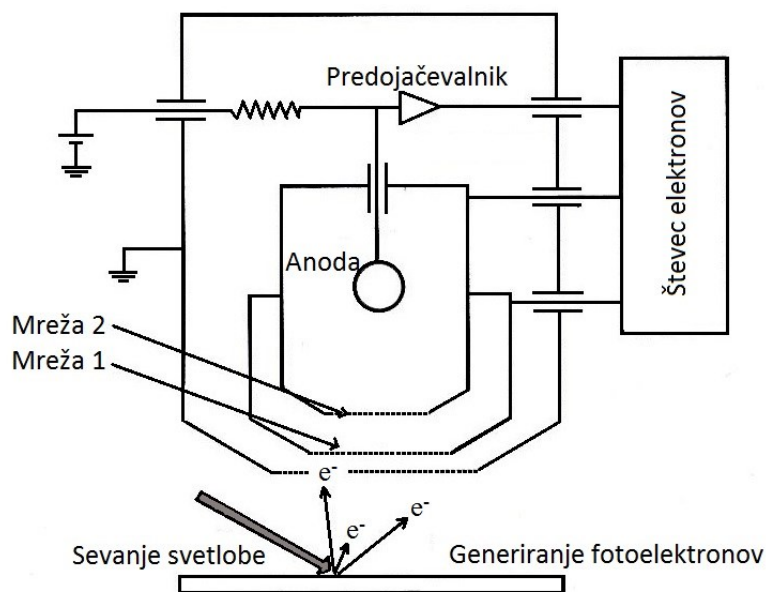
Slika 5.10: Shema delovne funkcije in ionizacijskega potenciala

Kovina, ko jo obsevamo z UV svetlobo in ko je energija te svetlobe nižja od energije delovne funkcije, ne oddaja nič fotoelektronov. Ko je energija UV svetlobe višja, se začnejo sproščati fotoelektroni. V primeru polprevodnika je podobno. Ko je energija UV svetlobe višja od ionizacijskega potenciala, se začnejo sproščati fotoelektroni. Na tak način analizator potencialne energije izmeri delovno funkcijo in ionizacijski potencial.

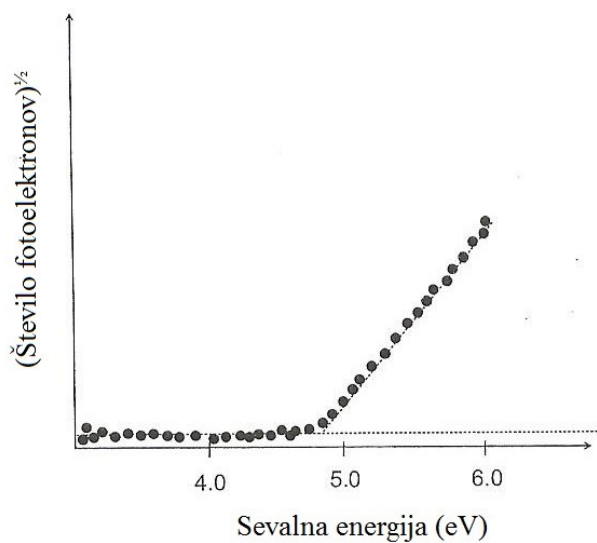
Shema analizatorja ionizacijske potencialne energije prikazuje slika 5.11. Elektroni, ki se sproščajo zaradi fotoelektronskega efekta, ob prisotnosti UV sevanja potujejo do mreže, kjer jih ujame molekula kisika. Elektroni nato prispejo do anode po prečkanju mreže 1 in 2. Ko se ion približuje anodi, pride do elektronskega plazmu zaradi prisotnosti močnega električnega polja. Vsak elektron je ojačan za 10^5 do 10^7 in nato je signal razelektritve pripeljan na predojačevalnik.

Število oddanih elektronov je odvisno od energije sevane svetlobe, to se vidi na sliki 5.12. Presek grafa na sliki 5.12 z x osjo nam poda delovno funkcijo in ionizacijski potencial v primeru polprevodnika.

Ko OLED element prikazuje karakteristike nihanja ali ko izdelana naprava ne izpolnjuje načrtovanih karakteristik, je meritev delovne funkcije elektrode lahko zelo uporabna, saj nas pripelje do rešitve težav.



Slika 5.11: Shema analizatorja ionizacijskega potenciala



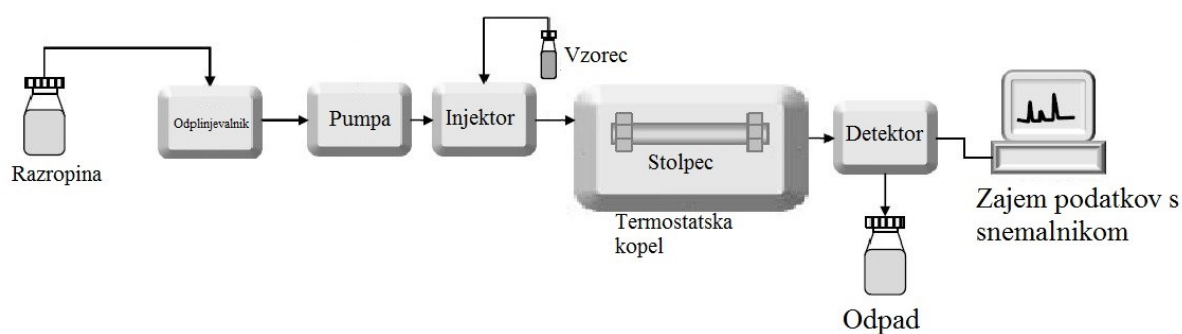
Slika 5.12: Grafični prikaz rezultatov meritve z analizatorjem ionizacijskega potenciala

5.5.2 HPLC analiza

Kratika HPLC v angleščini pomeni high-performance liquid chromatography, kar se prevede v slovenščino kot »visoko zmogljiva tekoča kromatografija«. HPLC analiza se pogosto uporablja za analizo nečistoč v neparjenih OLED materialih in ostankih materiala znotraj lončkov za napajanje iz poglavja 5.2.

Komponente, ki so potrebne za HPLC analizator, so: odplinjevalnik, pumpa, injektor, termostatska kopel, stolpec, detektor in snemalnik.

Raztopina nosilca je prenesena v merilno opremo iz steklenice s pomočjo pumpe. Odplinjevalnik odstrani kakršnekoli pline, ki se nahajajo znotraj nosilca raztopine, saj prisotnost plinov, kot so kisik, lahko povzroči šum na detektorju. Nato so utekočinjeni vzorci s pomočjo injekcijske brizge pripravljeni za analizo in so vneseni v stolpec. Tu se vzorci ločujejo z dodatkom finega (3–15 μm) prahu. Ker je ločilni postopek vzorčnega materiala občutljiv na spremembe temperature, se stolpec nahaja v termostatski kopeli. Električni signali, ki jih generira detektor po ločilnem postopku, so zaznani in posneti s pomočjo snemalnika. Slika 5.13 prikazuje opremo in potek analize s HPLC metodo.



Slika 5.13: Diagram postopka analize s HPLC opremo

5.5.3 Ciklično spreminjanje električnega potenciala

Metoda cikličnega spreminjanja električnega potenciala se uporablja za analizo elektrokemičnih reakcij materiala, s tem da določimo parametre kot so: hitrost transporta elektronov, reverzibilnost in kemična ločitev med reakcijo. Slika 5.14 zgoraj prikazuje primer tipičnega poteka spremembe električnega potenciala in spodaj vidimo pripadajočo tokovno-napetostno krivuljo (v angleščini se tem krivuljam reče »Cyclic voltammogram«).

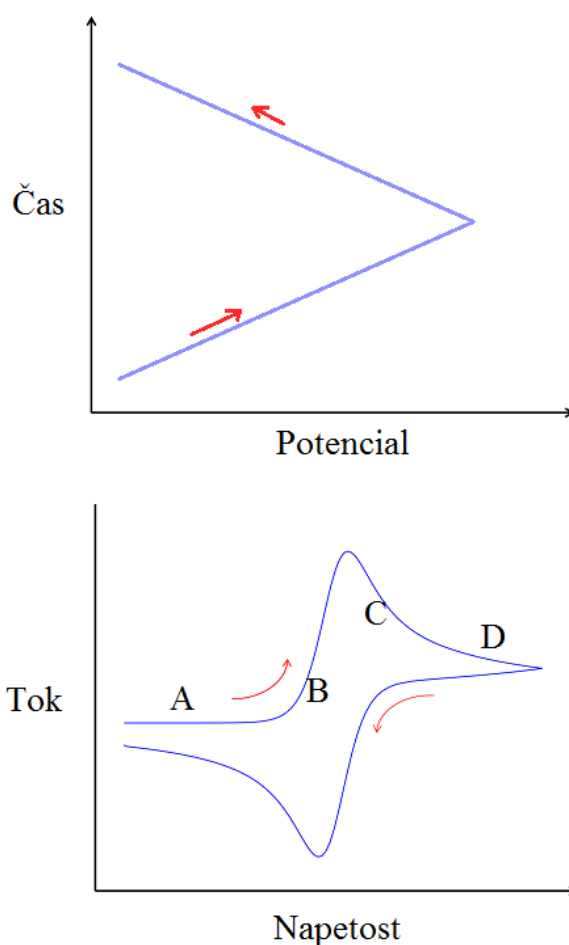
Napetost na elektrodi je krmiljena tako, da potuje od napetosti, ki je višja od redoks potenciala (kvantitativna mera za sposobnost spojine ali sistema za sprejemanje, oddajanje elektronov, za njuno oksidacijsko in redukcijsko sposobnost), do nižje napetosti in nato spet do višje napetosti. V območju A ni nič materiala za oksidacijo, zato je tok skoraj nič. V območju B je sistem podvržen redukciji, zato elektroni potujejo proti oksidu in električni tok hitro naraste.

V območju C je napetost tik pod redoks potencialom, kar pomeni, da je material blizu elektrode skoraj čisto reduciran in ne pride več do redukcije in tok začne upadati. Sčasoma električni tok, ustvarjen zaradi redukcije materiala blizu elektrode upada in je omejen na določeni vrednosti, zaradi difuzijskega toka, ki teče v elektrodo.

Če je material stabilen ob napetostni spremembi iz nižje do višje napetosti napram redoks potencialu, mora priditi do obratne reakcije in tokovno-napetostna krivulja mora kazati simetrijo. Ko pa je sistem ne-reverzibilen, se ustvari nesimetrična I - U krivulja.

V nekaj primerih je tak potek napetosti izmerjen večkrat. Izmeri se tudi odvisnost I - U krivulje od hitrosti spreminjanja napetosti, kar omogoča analizo mehanizma prenosa elektronov v mikrometrskem območju. Ta metoda omogoča pridobitev informacije o spremembi molekularne strukture glede na prenos elektronov in mobilnost elektronov.

Injekcija oz. prenos vrzeli iz anode in injekcija oz. prenos elektronov iz katode sta enaka kot tista v oksidaciji in redukciji organskega materiala v elektrokemični definiciji, zato je kar uporabno uporabiti metodo cikličnega spreminjanja električnega potenciala za obe vrsti analiz.



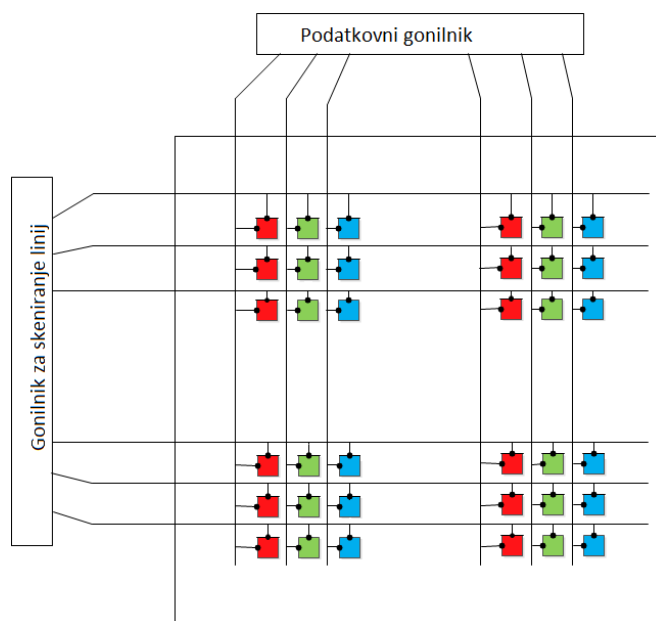
Slika 5.14: Primer cikličnega spreminjanja električnega potenciala

6 Tipi OLED zaslonov

6.1 OLED zasloni s pasivno matriko

6.1.1 Struktura

Na sliki 6.1 je prikazan shematični prikaz krmiljenja pasivnih matrik pri OLED zaslonih. OLED zaslone, ki imajo pasivne matrice za krmiljenje, imenujemo PMOLED. Najprej so tvorjene podatkovne linije, ki so vertikalne in linije za skeniranje, ki so horizontalne in nato je izdelan OLED element med linijami. Rdeči, zeleni in modri sub-piksli so dodeljeni specifičnim linijam. Podatkovne linije krmili podatkovni gonilnik in linije za skeniranje krmili skenirni gonilnik. Podatkovne in linije za skeniranje lahko krmili en sam ASIC čip (t.i. »application specific integrated chip«). Ko je na podatkovno linijo in linijo za skeniranje aplicirana napetost, steče tok skozi ciljni piksel in pride do emisije svetlobe.



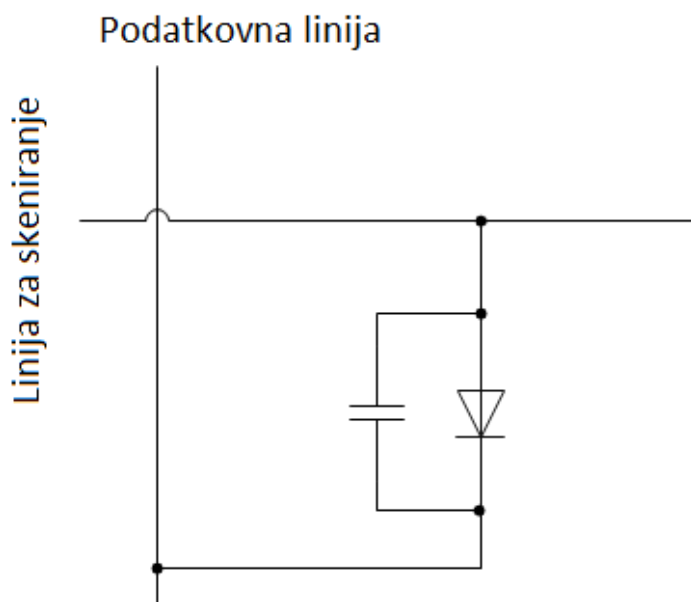
Slika 6.1: Shema krmiljenja matrice pasivnega OLED zaslona

6.1.2 Krmiljenje pikslov pasivne matrike

Nadomestno vezje OLED elementa sestavlja dioda s parazitno kapacitivnostjo. To nadomestno vezje prikazuje slika 6.2. Parazitna kapacitivnost posameznega piksla je nekje v pikofaradih, če je debelina organskih plasti okoli 100–200 nm in površina piksla okoli $0,2 \text{ mm}^2$. Tok, ki je potreben za polnjenje in praznjenje kondenzatorja, ne prispeva k emisiji svetlobe in iz tega razloga lahko poveča porabo energije in zmanjša čas emisije svetlobe. Zaradi teh negativnih lastnosti se je pri izdelavi OLED zaslonov potrebno znebiti nepotrebne lastnosti polnjenja in praznjenja s pasivno matriko.

Pri krmiljenju pasivnih OLED zaslonov moramo biti pazljivi na presluh (različne svetlosti pikslov). Do presluha lahko pride, ker so nekateri piksli vnaprej nabiti zaradi prejšnjega skeniranja in nekateri piksli še niso nabiti. Da se izognemo temu problemu, so podatkovne linije in linije za skeniranje med seboj povezane, da ponastavijo predhodno nabite piksele in jih pripravijo na emisijo svetlobe.

S preprostim skeniranjem pasivne matrike OLED zaslona, se emisija te naprave dogaja le na eni izbrani liniji za zelo kratek čas. Npr., če imamo N število linij za skeniranje, je perioda sevanja svetlobe v enem časovnem okviru ($t_{\text{čas_okvir}}$) enaka $t_{\text{čas_okvir}}/N$. Običajno je življenjski čas OLED elementa sorazmeren $1/L^n$, kjer je n enak 1,2–1,9 in L je svetlost. Iz te formule je razvidno, da večja ločljivost zaslona lahko zmanjša življenjski čas OLED elementa. Ta problem se da rešiti z uporabo večlinijskega skeniranja (skeniranje krmili več linij hkrati).



Slika 6.2: Nadomestno vezje piksla OLED zaslona s pasivno matriko

Nekaj primerov naprav, ki uporabljajo pasivno matriko prikazujejo slike 6.3, 6.4 in 6.5. Do sedaj so se OLED zasloni s pasivno matriko uporabljali za naprave, ki imajo nižjo ločljivost. Temu je tako zaradi naslednjih razlogov:

- zaradi kratkega časa emisije je za visoko ločljivost potrebna velika svetlost, ki zmanjša življenjski čas naprave,
- nezadostna perioda polnjenja za zaslone z visoko ločljivostjo, zaradi časovne izgube, ki jo povzroči velika parazitna kapacitivnost OLED zaslonov s pasivno matriko in
- kapacitivnost podatkovnih linij se ne izprazni dovolj hitro, kar povzroči zelo slab prikaz nizkih odtenkov sive.

OLED zasloni s pasivno matriko se uporabljajo za zadnji in glavni zaslon nekaterih mobilnih telefonov, zvočne sisteme v avtomobilih in MP3 predvajalnikih.



Slika 6.3: MP3 predvajalnik, ki uporablja OLED zaslon s pasivno matriko



Slika 6.4: Pasivna OLED matrika v fleksibilnem OLED zaslonu



Slika 6.5: Pasivna OLED matrika v prozornem zaslonu

6.2 OLED zasloni z aktivno matriko

6.2.1 Potrebne komponente AMOLED zaslona

Kot smo povedali v prejšnjem poglavju, se OLED zasloni z aktivno matriko uporabljajo, ko potrebujemo večje zaslone oz. zaslone z večjo ločljivostjo.

Na sliki 6.6 vidimo primer uporabe aktivne OLED matrike na telefonu. OLED zaslon z aktivno matriko sestavljajo naslednje komponente:

- TFT (tankoplastni tranzistor) substrat,
- steklo za enkapsulacijo,
- integrirano vezje gonilnika,
- krožni polarizatorji (ti so potrebni le pri določenih aplikacijah).



Slika 6.6: Primer zaslona z aktivno OLED matriko (Samsung Galaxy S2)

Glede na to, da se tankoplastni tranzistorji že izdelujejo v veliki količini za LCD zaslone, je njihova cena dosti nižja glede na druge komponente. Sedaj je glavni fokus posvečen znižanju cen ostalih komponent: enkapsulaciji, gonilnikom in povečanju izkoristka materiala.

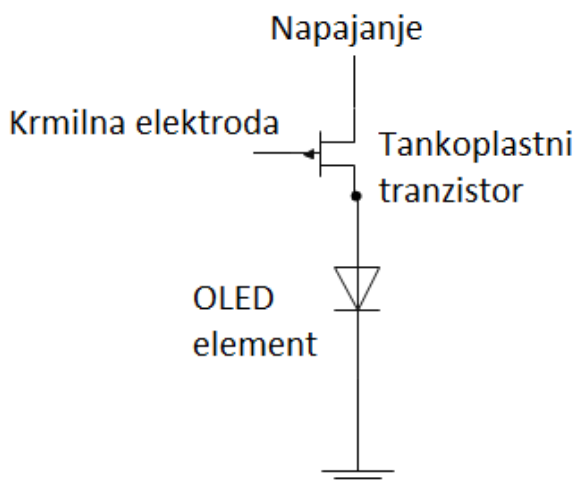
6.2.2 Krmilno vezje z dvema tranzistorjema in enim kondenzatorjem (2T1C)

Primer OLED piksla na nekem izdelku prikazuje slika 6.7. Slika 6.8 pa prikazuje, kako s tokom napajamo OLED element s krmilnim tankoplastnim tranzistorjem. S spreminjanjem napetosti na vratih tankoplastnega tranzistorja lahko kontroliramo tok, ki priteče v OLED, in s tem jakost emisije svetlobe.

Slika 6.9 prikazuje najpomembnejše vezje za krmiljenje piksla OLED zaslona, to je t. i. 2T1C vezje. Kot je že razvidno iz naslova, ta okrajšava pomeni, da krmilno vezje vsebuje dva tranzistorja in en kondenzator. Uporabljajo se tudi druga vezja za krmiljenje pikslov z dvema tankoplastnima tranzistorjema in enim kondenzatorjem, vendar oznaka T21C običajno označuje vezje, ki ima konfiguracijo kot je prikazano na sliki 6.9.



Slika 6.7: Primer piksla v OLED zaslonu

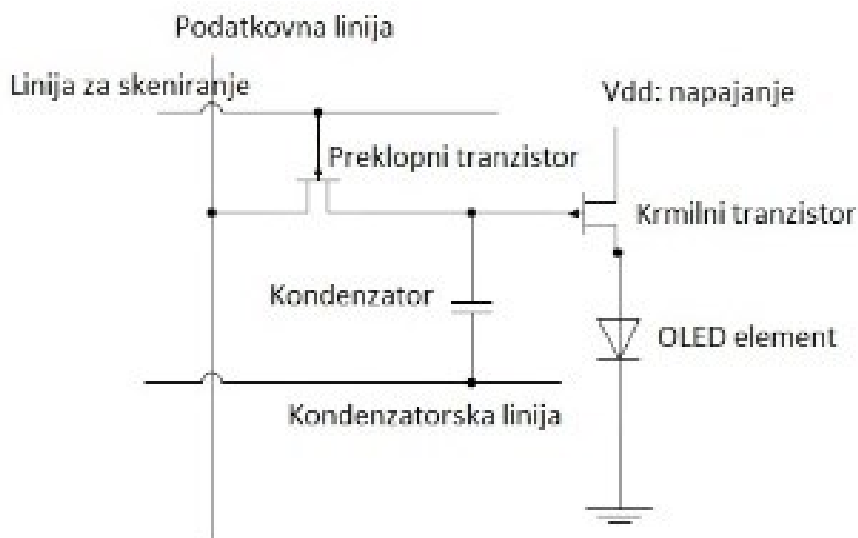


Slika 6.8: Preprosto napajalno vezje OLED elementa z tankoplastnim tranzistorjem

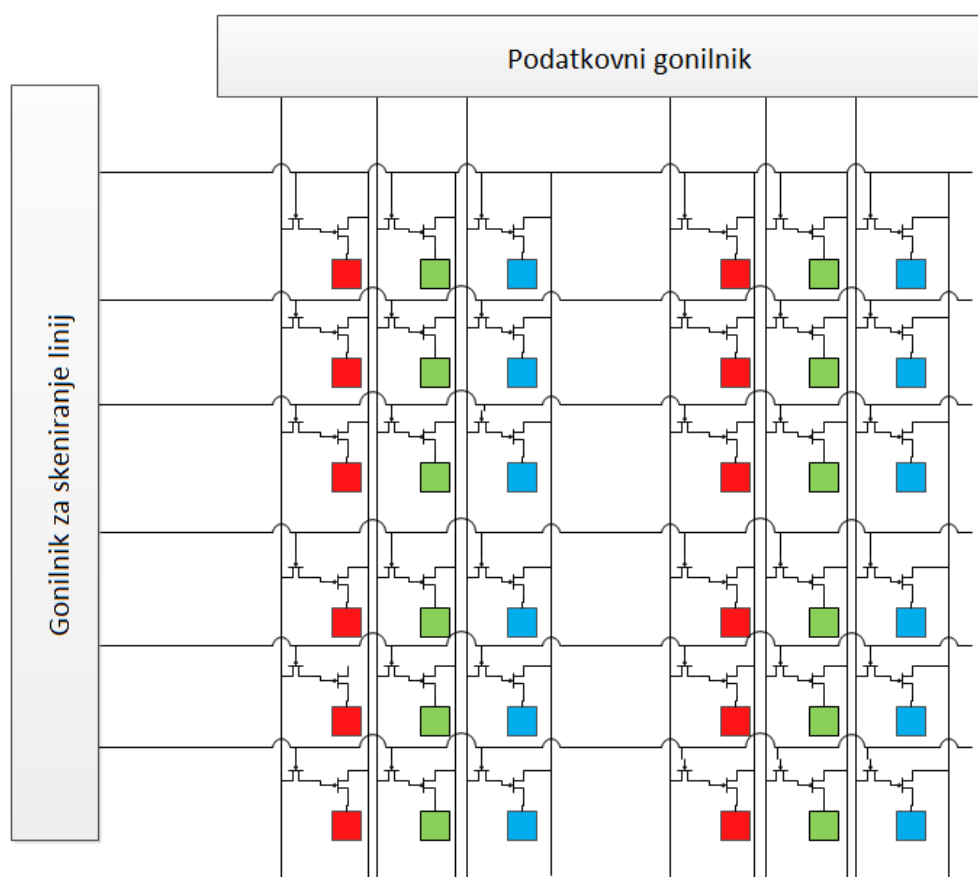
To vezje programira napetost v vozlišču vrat krmilnega tankoplastnega tranzistorja, ki odloča o svetilnosti OLED elementa, s tem da pripelje napetost podatkovne linije skozi preklopni tranzistor, ko je piksel izbran s strani linij za skeniranje. Metoda programiranja napetostnega signala podatkovnih linij s pomočjo preklopnega tranzistorja do kapacitivnosti piksla je enaka kot pri vezju za krmiljenje pikslov LCD zaslona.

Pri realnih implementacijah se uporabljajo bolj komplicirana vezja z namenom, da kompenzirajo distribucijo toka za tranzistorski krmilnik in OLED elemente. Ta bolj zapletena vezja, se uporabljajo tudi za kompenzacijo nestabilnosti OLED elementov.

Matrična porazdelitev pikslov AMOLED zaslona je prikazana na sliki 6.10, različne barve so prikazane s pomočjo kombinacije rdečega, zelenega in modrega subpiksla. Večina podatkovnih krmilnikov lahko zagotovi prikaz 6- ali 8-bitno sivinsko lestvico, pri specialnih aplikacijah, kot medicinska uporaba, pa se uporablja celo 10- ali 12-bitov. Ko je uporabljena 8-bitna sivinska lestvica, potem vsak subpiksel lahko prikazuje 2^8 , kar je 256 sivinsko lestvico, torej $256^3 = 16777216$ različnih barv. Povprečen računalnik lahko prikazuje sivinsko lestvico od 0 do 255. Temu, da zaslon lahko prikazuje skoraj 16 milijonov različnih barv, pravijo polno barvni zaslon.



Slika 6.9: Vezje krmilnega vezja piksla z dvema tranzistorjema in enim kondenzatorjem



Slika 6.10: Shema aktivne matrike OLED zaslonov

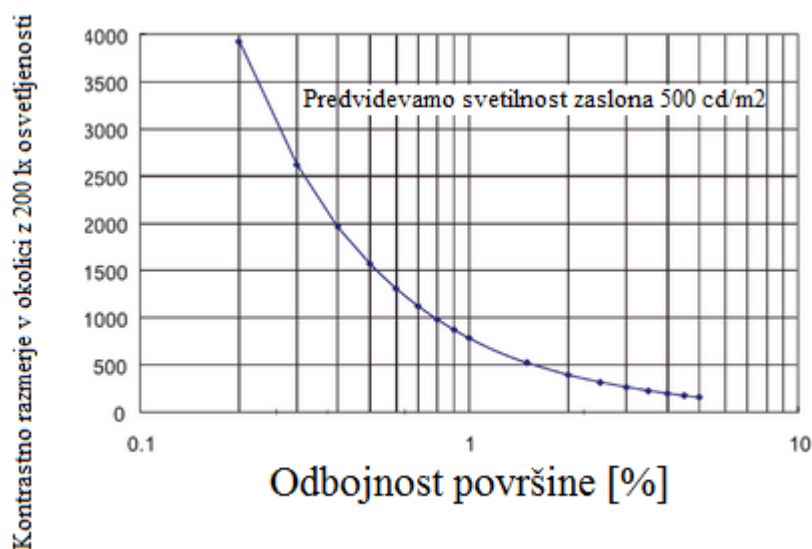
6.2.3 Zmogljivost AMOLED zaslonov

OLED zasloni sami od sebe oddajajo svetlobo, zato dobimo visoki kontrast v temnih sobah. Toda ti zasloni se redko uporabljajo v temnih prostorih in zato kontrast merimo tam, kjer bo tudi bolj pogosto uporabljen. Pri aplikacijah, kot so npr. mobilni telefoni, je zelo pomembna berljivost znakov in vidnost v svetlem okolju, zato je potrebna površinska obdelava zaslonov. Tabela 6.1 prikazuje standardne vrednosti osvetlitve v različnih prostorih.

Okolica	Osvetljenost [lx]
Sončni prostor sredi poletja	>100000
Senca v toplem vremenu	10000
Pisarna	750

Recepcija v pisarni	500
Učilnica	500
Razstavni prostor	500–1500
Razstavna polica v trgovini	500
Dneva soba	200–300
Hotelska soba	100
Muzej	50
Konferenčna soba	300–700
Kino	3
Noč s polno luno	0,2

Tabela 6.1: Osvetljenost različnih okolici



Slika 6.11: Graf kontrastnega razmerja proti odbojnosti površine v dnevni sobi

Za televizijske aplikacije je zelo pomemben podatek o kontrastu, ki ga dobimo v dnevnih sobah, ker ta podatek ponazarja najnižjo osvetljenost pri realnih aplikacijah. Kontrastnem razmerju v okolici z 200 lx običajno pravijo kontrastno razmerje dnevene sobe.

Graf na sliki 6.11 prikazuje izmerjeno kontrastno razmerje zaslona (brez krožnega polarizatorja) s svetilnostjo 500 cd/m^2 pri različnih vrednostih površinske odbojnosti.

Iz grafa je razvidno, da je lahko vrednost površinske odbojnosti višja od 1% zaradi odbojnosti, ki jo povzroči elektroda in ožičenje. Poleg krožnih polarizatorjev se uporabljajo tudi barvni filtri za povečanje absorpcije in s tem izboljšanje kontrastnega razmerja OLED zaslona v dnevni sobi.

Za primerjavo visokokvalitetni LCD zaslon uporablja drago protiodbojnost, da dobi 1500–1800:1 kontrastno razmerje v dnevni sobi. Iz tega razloga bi morali OLED TV zasloni uporabljati krožne polarizatorje z visoko protiodbojnostjo.

7 OLED kot veliko površinska svetlobna plošča

7.1 Izdelava in težave

Kot smo že mnogokrat omenili, so pozitivne lastnosti OLED elementov vzrok, da se pogosto uporabljajo za aplikacije kot sta razsvetljava in televizijski zasloni. Te lastnosti so: velik potencial pri zagotavljanju visoke energijske učinkovitosti, nizke delovne napetosti, nizke temperature delovanja in dolgi življenjski čas. Ker so OLED elementi sami po sebi vir svetlobe na površini, so idealni za aplikacije na področju razsvetljave, saj lahko delujejo pri nizki svetlobni intenziteti in lahko pridobimo enak svetlobni tok, če samo povečamo območje sevanja. Zmožnost povečanja svetlobnega toka na podlagi povečave površine sevanja, je zelo zaželeno, saj ne povzroča večjega generiranja dodatne toplote in to omogoča uporabo veliko površinskih fleksibilnih in nefleksibilnih svetlobnih sistemov.

Kljub tem prednostim obstaja kar nekaj tehničnih težav pri proizvodnji veliko površinskih OLED svetlobnih panelov. Te težave so: kratek stik, neenotnost sevanja svetlobe, vroče točke, izguba moči in generacija toplote.

Poleg emisije svetlobe na veliki površini in fleksibilnost je ena pomembnejša lastnost OLED elementov njihova transparentnost in ta lastnost je zelo pomembna pri aplikacijah, ki bodo opisane v tem poglavju. Ta lastnost omogoča veliko aplikacij v kombinaciji z drugim napravami, kot so sončne celice in neorganske svetleče diode (LED). Te nove aplikacije, v kombinaciji z drugimi napravami, še dodatno poživijo OLED razsvetljavno industrijo.

Slika 7.1 prikazuje različne oblike in velikosti OLED panelov. Da lahko dosežemo določen svetlobni tok ali za razvoj novih svetlobnih sistemov, je potrebno vezati več posameznih panelov paralelno ali serijsko. Kot v primeru običajnih LED, lahko OLED uporabljamo kot točkovni vir svetlobe, če je izdelan v mikro velikosti. Kljub temu, da se lahko intenziteta svetlobe takega OLED elementa primerja z LED, se, kot smo omenili v prejšnjih poglavjih, njihov življenjski čas zmanjša pri visoki svetilnosti. Da dosežemo enak svetlobni tok kot LED, je bolj zaželeno uporabiti večje

OLED panele, kot visoko svetilnost na manjših OLED panelih in jim s tem zmanjšati življenjski čas.

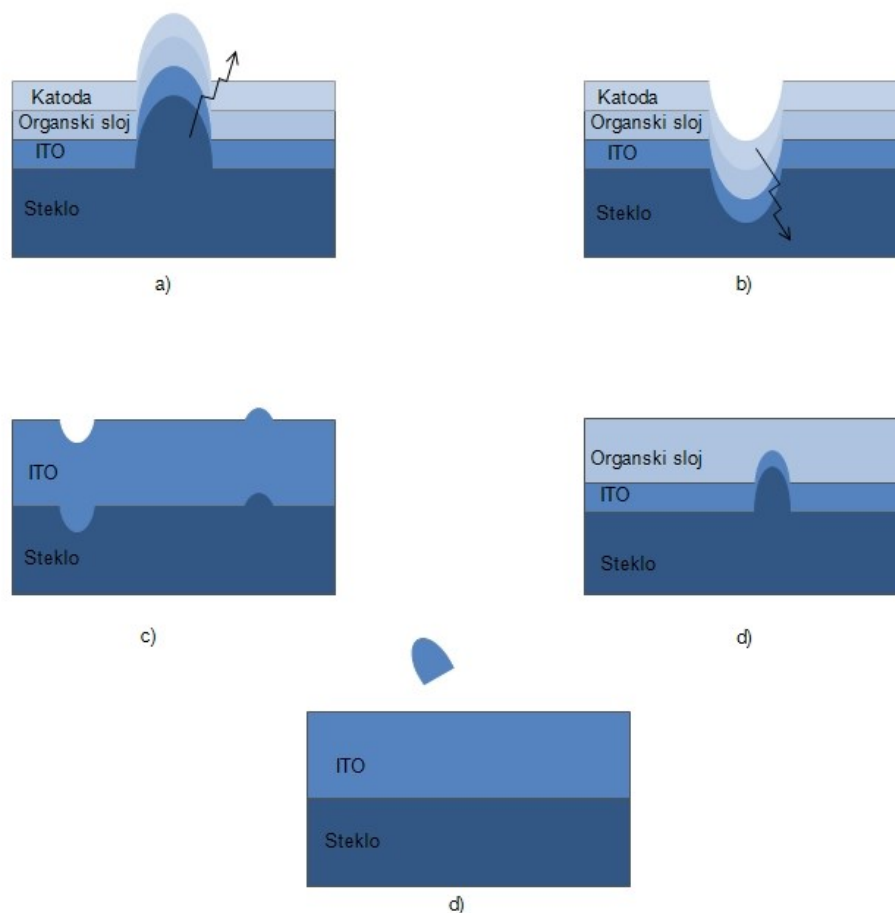


Slika 7.1: Primeri OLED panelov z veliko površino

Čeprav je emisija svetlobe na veliki površini prednost, ki jo imajo OLED elementi, obstaja meja v širitvi območja sevanja. Z večanjem velikosti panela se tudi poveča možnost, da se pojavi kratki stik in vroča točka. Zaradi omejene prevodnosti transparentnih elektrod pri OLED elementih, se lahko pri večjih površinah pojavi neenotna emisija svetlobe, izguba moči in generacija toplote.

7.1.1 Kratek stik pri velikopovršinskih OLED panelih

Kratek stik je eden glavnih problemov OLED panelov z veliko površino. Ta napaka nastane zaradi majhnih delčkov na steklenem substratu in zaradi delcev, ki nastanejo med fotolitografijo in izparevanjem. Dve možnosti nastanka kratkega stika sta prikazana na slikah 7.2 a in b. Kot je razvidno iz slike, se pojavi kratka pot, ki omogoča pretok toka.



Slika 7.2: Kratek stik na OLED elementu (a, b) in možne rešitve (c–e)

Do kratkega stika lahko pride tudi, če je kovinska maska nepravilna med procesom fotolitografije ali termičnim izparevanjem. Ko se pojavi kratek stik, povzroči topljenje aluminijeve katode. Večanje sevalne površine poveča možnost pojava kratkega stika. OLED paneli z veliko površino potrebujejo na transparentni elektrodi še pomožno elektrodo; običajno iz indij kositrovega oksida (ITO –indium-tin-oxide plast). Med samim postopkom nanašanja teh plasti lahko pride do določenih poškodb na ITO plasti in lahko pusti tudi nekaj finih kovinskih delcev v emisijski plasti, kar spet lahko povzroči kratek stik. Pojav je odvisen od stanja površine ITO plasti. Pri fleksibilnih OLED elementih je tudi večja verjetnost, da pride do kratkega stika, ker je pri izdelavi fleksibilnih substratov več omejitev. Bolj resna težava je v tem, da lahko do tega pojava pride pri stabilnem obratovanju, kar povzroči težave pri zanesljivosti naprave.

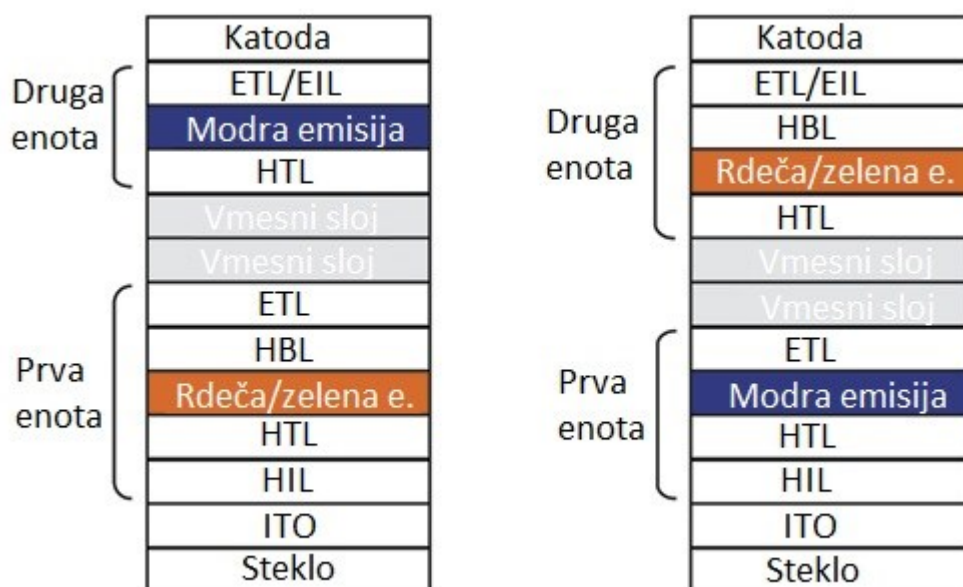
Vendar obstajajo rešitve s katerimi lahko v veliki meri to nevarnost odstranimo:

- s povečanjem debeline prozorne anode, vendar s tem zmanjšamo optično prepustnost,

- z nanosom prevodnega polimera na prozorno anodo,
- s povečanjem debeline organske plasti,
- s poliranjem delcev na substratu ali ITO plasti.

Od vseh teh predlogov večanje debeline OLED elementa še najbolj izniči efekt kratkega stika. Z večanjem debeline organske plasti lahko naredimo kombinacijo dveh OLED elementov, ne da bi s tem žrtvovali zmogljivost naprave. Kot je razvidno iz slike 7.3, lahko uporabimo kombinacijo modro sevalnega OLED elementa in zeleno rdečega sevalnega OLED elementa, da dobimo hibridni OLED element, ki seva belo barvo. Pri toliko slojih naloženih eden na drugega, se debelina naprave poveča za več kot 200 nm. Taki OLED elementi se radi uporabljajo za veliko površinske OLED panele, ker izboljšajo življenjski čas in donos izdelave.

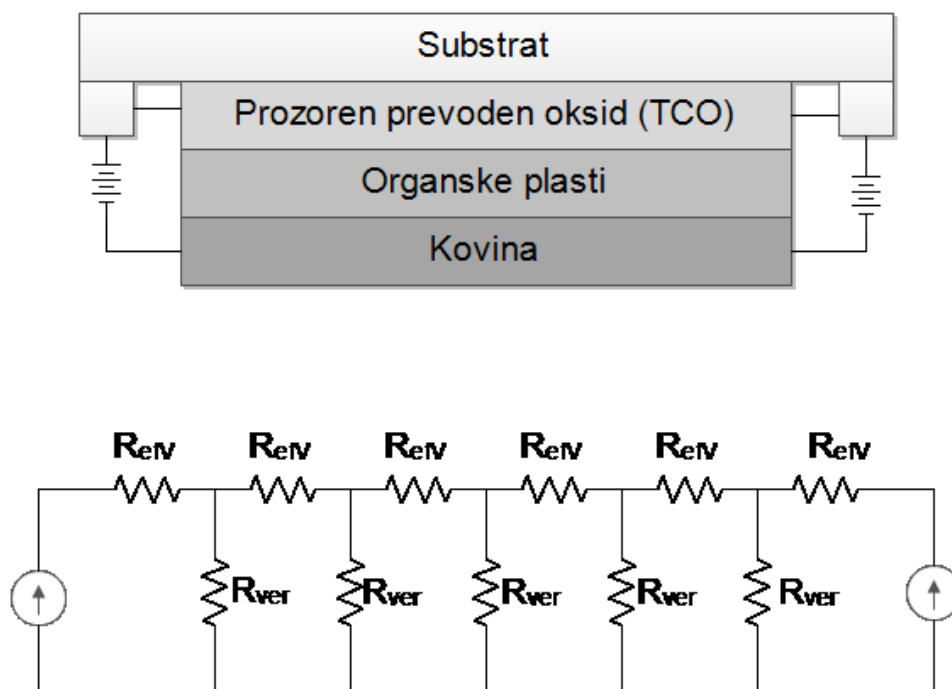
Problem kratkega stika pa se da zmanjšati tudi s t. i. procesom staranja. To pa naredijo tako, da pred enkapsulacijo OLED panel izpostavijo kisiku in vlagi za nekaj sekund in istočasno priključijo napetost 10 V. S tem se skupna upornost naprave poveča za do 100 M Ω . Izpostavljanje OLED panelov vlagi je bolj učinkovito pri znižanju kratkega stika kot izpostavljanju panela kisiku.



Slika 7.3: Shematični prikaz hibridnega belega OLED elementa

7.1.2 Neenotno sevanje svetlobe

Zaradi omejene prevodnosti prozornih elektrod, injicirani tok iz robov panela težko pride do srednjega območja, kar povzroči nehomogenost pri sevanju svetlobe. Ta težava postane bolj resna pri večjih OLED panelih in višji svetlobni intenziteti. Na sliki 7.4 je prikazana struktura in nadomestno vezje OLED panela. Če je efektivna vodoravna upornost (označena z R_{eff}) anode relativno višja kot vertikalna upornost (označena z R_{ver}) OLED elementa, bo večina toka steklo blizu robov. V takšnem primeru je potrebno povečati vertikalno upornost in to naredijo tako, da povečajo debelino (hibridna struktura iz prejšnjega poglavja). Za izboljšanje enotnosti sevanja svetlobe je potrebno upoštevati razmerje med R_{eff} in R_{ver} . Enostaven rešitev tega problema je tudi zmanjšanje upornosti transparentne elektrode, ne da bi posegali v njeno transparentnost. Najpogosteje uporabljen material za anodno elektrodo je indij kositrov oksid in ima upornost plasti okoli 9–12 Ω /kvadratno enoto, kar je preveč za aplikacije z veliko površino. Uporablja se tudi visokoprevodna elektroda iz srebra, ki je v sendviču med dvema oksidoma. Takšna elektroda ima nižjo upornost plasti, ki znaša 3–4 Ω /kvadratno enoto, vendar je izdelava takšne elektrode bolj komplicirana.



Slika 7.4: Prerez OLED panela in nadomestno vezje

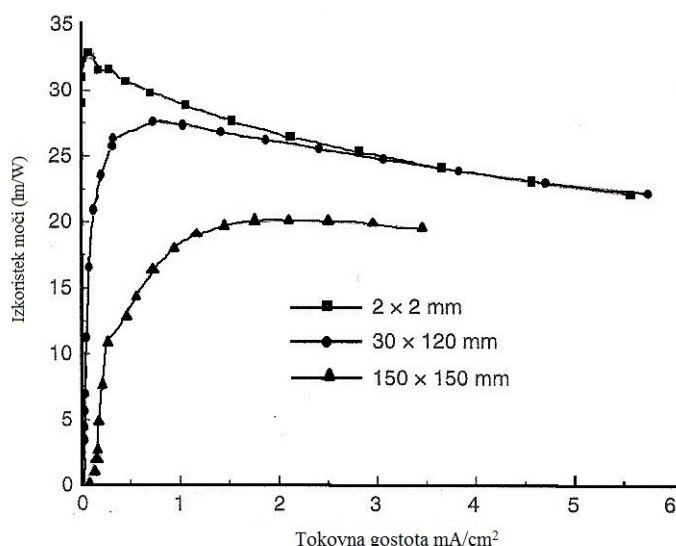
7.1.3 Vroča točka

Vroče točke nastanejo zaradi špičk in grobe površine na prozorni elektrodi ter zaradi majhnih delcev, ki pridejo na elektrodo. Čeprav se vroče točke pojavijo bolj redko, so lahko glavni povzročitelj krajšega življenjskega časa panelov. Če na elektrodi obstaja špička, se bo tam kopičil električni tok in ta bo povzročil generacijo toplote okoli te lokacije. Če se na elektrodi pojavi vroča točka, se da njen efekt dobro zmanjšati s pomočjo odvoda toplote.

7.1.4 Izguba moči

Zaradi omejene prevodnosti prozornih elektrod, imajo velikopovršinski OLED paneli problem z izgubo moči. Ta omejena prevodnost povzroči zmanjšanje gostote toka in močnostnega izkoristka. Na grafu 7.5 se dobro vidi, kako nižji je izkoristek pri večjih panelih. Če se uporabijo dodatne kovinske elektrode na transparentnih elektrodah, lahko nekaj izgubljenega izkoristka še pridobimo nazaj.

Zmanjšanje tokovne gostote pa pomeni zmanjšanje intenzitete svetlobe. Da pridobimo enako svetlobno jakost, je potrebno dovesti več toka, kar lahko povzroči težave s toploto. Da lahko pridobimo OLED panel z visokim tokovnim izkoristkom pri nizki tokovni gostoti, je potrebno narediti takšno strukturo OLED elementa, ki uporablja več funkcionalnih plasti (iz prejšnjih poglavij so to plasti za blokiranje vrzeli elektronov, itd.).



Slika 7.5: Graf izkoristka moči glede na tokovno gostoto pri različnih velikostih OLED panelov

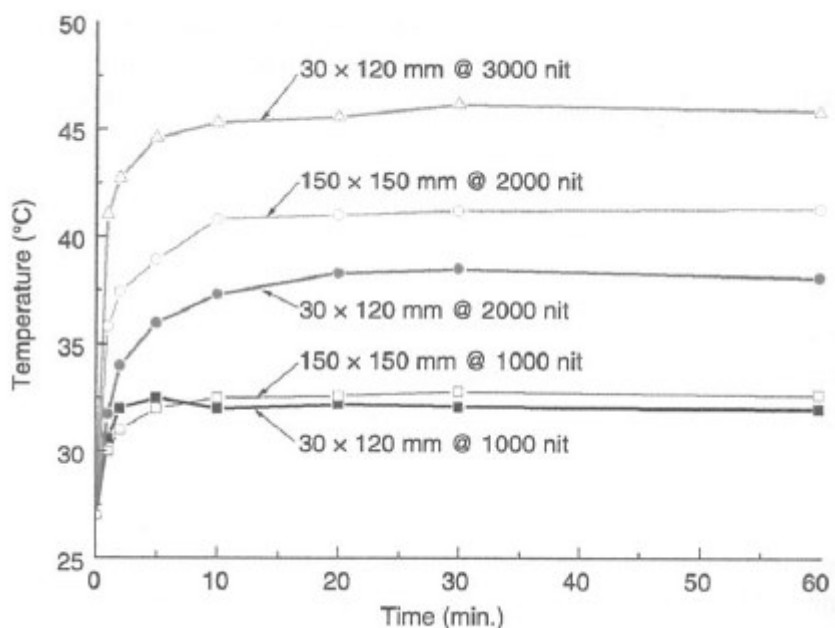
7.1.5 Generiranje toplote

Enako kot pri drugih virih svetlobe, imajo velikopovršinski OLED paneli težave, povezane s temperaturo. Kot pri običajnih virih svetlobe: žarnicah, fluorescenčnih svetilkah in LED svetilih, se pri OLED svetilih površinska temperatura veča skupaj z jakostjo svetlobe. Od običajnih LED se OLED razlikujejo v tem, da imajo zelo kratko pot za prenos toplote (stekleni substrat debeline okoli 0,7 mm) med notranjim virom toplote (emisijaska plast) in zunanjo površino elementa. To pomeni, da je temperaturna razlika med notranjo in zunanjo površino zelo majhna, zaradi česar lahko odvajamo toploto brez potrebe po večjem hladilnem telesu. Kljub temu se pri OLED elementih pojavi Joulovo segrevanje. Toplotni tok pri OLED elementih je pogojen s spodnjo enačbo:

$$C \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x,t) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + \left[\frac{J_n(x,t)^2}{q\mu_n(x,t)n(x,t)} + \frac{J_p(x,t)^2}{q\mu_p(x,t)p(x,t)} \right]. \quad (7.1)$$

V enačbi (7.1) označuje T temperaturo, k toplotno prevodnost, C prostorninsko toplotno kapacitivnost, J gostoto toka, μ mobilnost nosilcev, n gostoto elektronov in p gostoto vrzeli. Desna stran te enačbe nam pove, kolikšen delež Joulovega segrevanja je dan zaradi visoke injekcije toka med delovanje OLED elementa. Zaradi Joulovega segrevanja se OLED elementom zniža svetilnost in življenjski čas ter pride tudi do večjega premika spektra. Zaradi teh negativnih posledic, je potrebno uporabiti odvod toplote, da znižamo degradacijo organskih molekul. Upoštevati moramo tudi to, da mora biti odvod toplote čim bolj tanek, da lahko prikažemo najpomembnejše lastnosti ultra tankih OLED elementov.

Graf na sliki 7.6 prikazuje temperaturo OLED panela pri različnih velikostih in svetlobnih jakostih. Pri večjih svetlobnih jakostih se poveča temperatura in istočasno postane porazdelitev temperature bolj neenotna. Problem postane tudi v tem, da se zaradi upornosti anode večina toplote generira na robih OLED panelov. Iz grafa 7.6 je razvidno, da večji paneli generirajo več toplote pri doseganju enake svetlobne jakosti. OLED panel manjše velikosti (30 x 120 mm) generira maksimalno toploto, ki je nekaj čez 45 °C, pri tem pa sveti s svetlobno jakostjo 3000 nit (nit = cd/m²). To pomeni, da manjši OLED paneli pridejo v poštev za aplikacije kot so razsvetljava z dokaj nizko svetlobno jakostjo, saj ni potrebe po hladilnem telesu. Za razsvetljava, kjer potrebujemo višjo svetlobno jakost, je vedno potrebno uporabiti hladila telesa, če hočemo imeti stabilno delovanje in dolg življenjski čas.



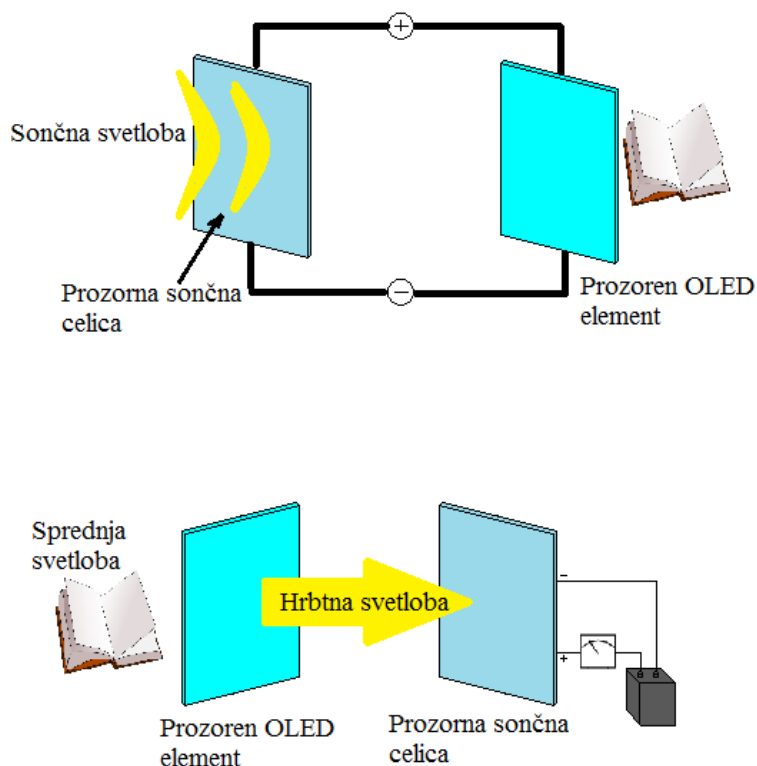
Slika 7.6: Temperatura OLED panelov pri različnih velikostih in svetlobnih intenzitetah

Nedavno so bile narejene raziskave o tankoplastni enkapsulaciji, ki naj bi nadomestila klasično enkapsulacijo s steklom. Ta ima prednost, ker odlično prevaja toploto, zaradi kratke termične poti. Tankoplastno enkapsulacijo sestavljajo izmenjujoče anorganske in organske plasti in naj bi omogočale znižanje površinske temperature za več kot 25 °C.

7.2 Povezava OLED razsvetljave s sončnimi celicami

Ena od aplikacij, kjer bi se lahko uporabljali velikopovršinski OLED paneli, bi lahko bila OLED razsvetljava na samostojen pogon. To se da doseči s povezavo OLED panelov s sončnimi celicami. Za veliko različnih aplikacij, kjer bi lahko uporabili svetleče okno v zgradbah in avtomobilih, je potrebno uporabiti prozorni OLED panel v kombinaciji s prozorno organsko sončno celico. Prozorni OLED panel in organsko sončno celico se da preprosto narediti z zamenjavo neprosojne aluminijeve katode s prozorno ali polprozorno katodo. Na sliki 7.7 je shematično prikazano, kako se bi uporabljala sončna celica v tandemu z OLED panelom. Ta bi čez dan generirala moč s pomočjo sončne svetlobe in proti večeru bi se ta moč porabljala za krmiljenje OLED panelov. Prozoren OLED panel lahko oddaja svetlobo iz prednje in zadnje strani hkrati. Svetloba, ki seva spredaj, se porablja za osvetlitev, svetloba, ki seva na hrbtni strani, pa je neizkoriščena. Vendar jo je možno reciklirati s pomočjo sončne celice, da

nam generira moč, kot je prikazano na sliki 7.7. V praksi je OLED element zlahka integriran z organsko sončno celico z nanosom organskih plasti sončne celice in OLED elementa v seriji na skupni stekleni substrat. Ta koncept je bil predlagan za izboljšanje kontrastnega razmerja OLED zaslonov. Dosežen izkoristek reciklirane moči, ki je definiran kot razmerje med izhodno močjo sončne celice in vhodno močjo OLED elementa, na enem takem pikslu je bil 0,26%. Drugi način integracije organske sončne celice z OLED elementom bi bil, da naneseemo OLED element na eno stran in organske plasti sončne celice na drugo stran skupnega substrata.



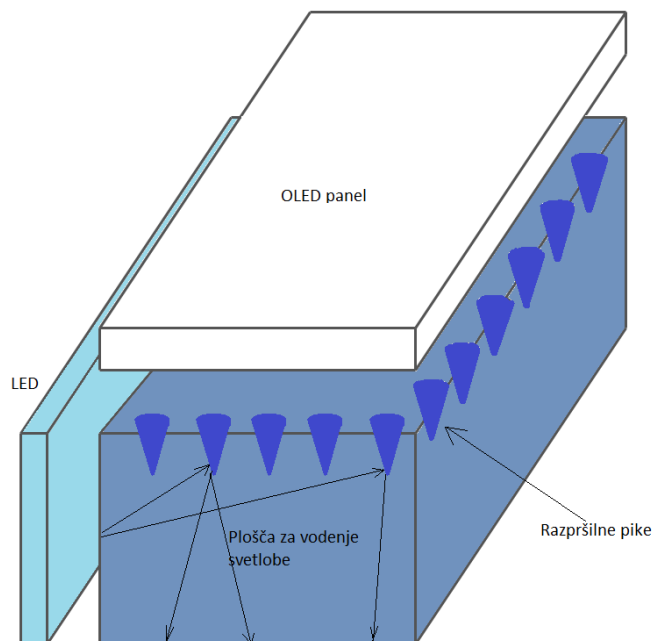
Slika 7.7: Shematični prikaz kombinacije OLED panela s prozorno sončno celico

V knjigi »Organic light-emitting diodes (OLEDs) Materials, devices and applications« v poglavju 19.3, je opisan njihov preizkus recikliranja energije s kombinacijo organske sončne celice z OLED panelom velikosti $30 \times 120 \text{ mm}^2$. Sončna celica in panel v njihovem preizkusu sta bila med seboj oddaljena za 1,5 in 9,5 mm, pri taki konfiguraciji so izvajali meritve. Izmerili so, kako količina svetilnosti vpliva na fototok (tok, ki ga povzroči svetloba) in izkoristek reciklirane moči. Z večanjem svetilnosti, se je fototok večal, izkoristek pa manjšal. Največji fototok, ki so ga izmerili, je imel vrednost 6,465 mA pri 7 V in maksimalni izkoristek je imel vrednost 0,152% pri 5 V. Izmerjena vrednost izkoristka je precej nizka, vendar se jo da bistveno

izboljšati, če znižamo delovno napetost OLED elementa, povečamo njegovo moč, izboljšano pretvorni izkoristek sončnih celic, zmanjšamo razdaljo med celico in OLED panelom, zmanjšamo velikost in če ujamemo absorpcijski spekter sončne celice z emisijskim spektrom OLED panela.

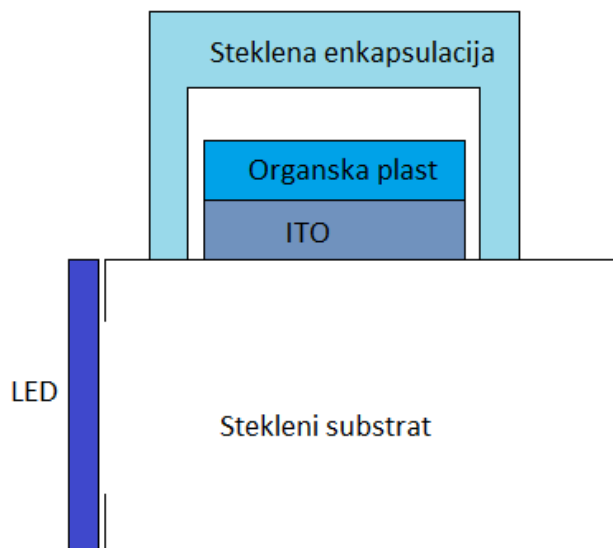
7.3 Povezava OLED in anorganske LED razsvetljave

Naslednja aplikacija, kjer bi lahko uporabili velikopovršinske OLED panele, bi bila hibridni sistem za razsvetljavo, ki uporabi kombinacijo klasičnih LED in OLED. LED in OLED združimo z namenom, da bi dopolnili njune skupne šibkosti ali izkoristili njune skupne moči. Če pogledamo najprej na pomanjkljivost OLED, je lastnost velike svetlosti in dolgega življenjskega časa, ki ga imajo LED, zelo zaželena. Iz perspektive klasične LED, je za njih zanimivo veliko površinsko sevanje, ki ga omogočajo OLED. Takšen hibriden sistem nam pride prav, ker OLED paneli lahko delujejo pri nizki svetilnosti, kar izboljša življenjski čas OLED in LED omogoča hitro krmiljenje barvne temperature in s tem se odpre tudi aplikacija razsvetljave občutkov (»emotional lighting«). Tak hibriden sistem razsvetljave se da izvesti, če naneseemo LED na stran svetlobne vodilne plošče, ki ima razpršene pike. S takšno konfiguracijo se da doseči enotno površinsko sevanje LED. OLED panel pa je položen na spodnjo stran svetlobne vodilne plošče. OLED panel seva svetlobo skozi vodilno ploščo, kjer se ta pomeša s svetlobo, ki jo oddaja LED. Ta konfiguracija pa ne omogoča enotno sevanje svetlobe s strani OLED, ker to onemogočajo razpršene pike. Zaradi tega se raje uporabljajo prozorne pike. Primer te preproste strukture je prikazan na sliki 7.8.



Slika 7.8: Shema OLED, LED hibridnega sistema razsvetljave

Takšne hibridne strukture lahko naredimo tudi na drugačne načine. Eden od teh je prikazan na sliki 7.9. Pri tej konfiguraciji je klasična LED nanescena na rob steklenega substrata OLED elementa. Svetloba, ki jo generira LED, potuje skozi stekleni substrat in nekaj te svetlobe bo prišlo v območje, kjer OLED generira svetlobo in se bo zmešala z njo, nekaj svetlobe pa bo sevalo direktno skozi substrat in prišla ven na drugi strani. Da lahko pridobimo več svetlobe iz spodnje površine, se doda dodatna plast pod stekleni substrat in ta plast se imenuje razpršilna plast. To plast lahko postavimo tudi med stekleni substrat in plastjo indij kositrovega oksida. Če dodamo to plast, izboljšamo razmerje med generirano in pridobljeno svetlobo.



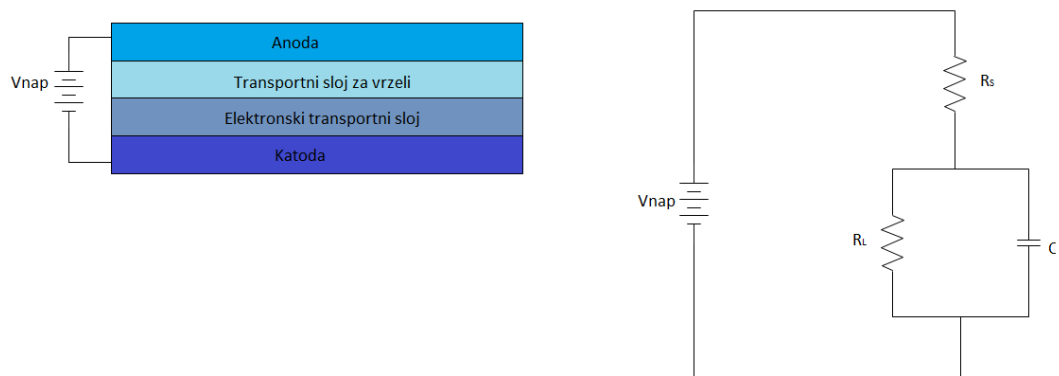
Slika 7.9: Shema bolj komplicirane strukture hibridnega sistema razsvetljave

7.4 OLED paneli kot komunikacija z vidno svetlobo

Še zadnja aplikacija OLED panelov, ki jo bomo na kratko opisali, je komunikacija z vidno svetlobo. OLED panele je možno uporabiti, poleg običajne razsvetljave, za prenašanje signalov. Kar nekaj raziskav za takšne aplikacije se je že delalo na klasičnih LED, nekaj se jih je začelo delati tudi za OLED. Vendar za to aplikacijo pri OLED elementih obstaja kar velika težava in ta težava je hitrost modulacije. Ta hitrost je omejena zaradi izolacijske lastnosti organskih molekul in dokaj počasnih nosilcev. Omejujejo jo tudi velikost panela, saj je kapacitivnost naprave premo sorazmerna z velikostjo naprave.

Struktura OLED elementa za takšno aplikacijo je zelo preprosta, saj jo poleg katode in anode sestavljata le še transportni sloj za elektrone in vrzeli. Takšen OLED element se imenuje dvoplastna OLED in ekvivalentno vezje tega OLED elementa je prikazano na sliki 7.10. Kot je razvidno iz slike ekvivalentno vezje sestavlja upornost naprave v seriji z diodo ter upornost puščanja in ekvivalentna kapacitivnost. Napetost na kondenzatorju je podana z enačbo:

$$V_C(t) = V_{nap}(1 - e^{-\frac{1}{CR_S}}) \quad (7.2)$$



Slika 7.10: Ekvivalentno vezje dvoplastnega OLED elementa

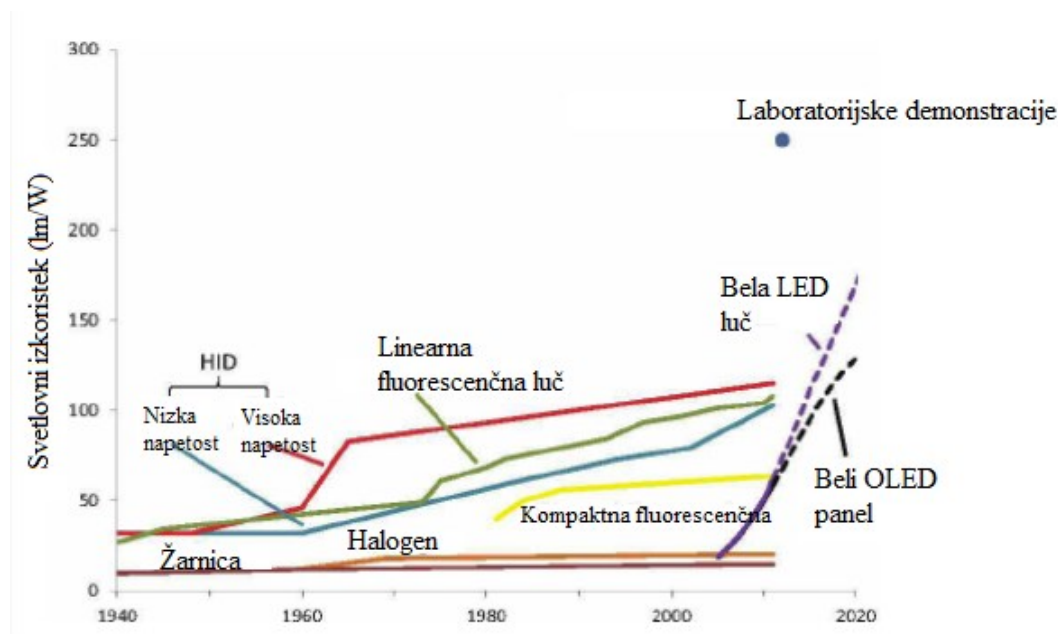
Glavne raziskave, ki se delajo na tem področju, so najti najboljšo kombinacijo materialov in velikosti elementa, da se kondenzator čim hitreje polni in prazni in s tem dosežemo hitro modulacijo. Če nam to uspe, ne bo nobene težave uporabiti OLED panele za komunikacijo na velike razdalje s pomočjo vidne svetlobe.

8 Primerjava OLED in LED tehnologij

8.0.1 Uvod

Organske in anorganske svetleče diode nam ponujajo bistveno novejšo vire osvetlitve z možnostjo boljšega izkoristka, daljših življenjskih časov in izvrstno kontrolo nad barvo sevanja svetlobe, glede na konvencionalno osvetlitev. Oba vira svetlobe obljubljata redefinicijo, kako se razsvetljava, ki je ekonomična in energijsko učinkovita, integrira v vsakodnevno življenje. Anorganske LED, ki so izdelane iz svetlečih polprevodnikov, so finančni vzvod za izdelavo in proizvodnjo razvijalne opreme za polprevodniške naprave. Čeprav so bile rdeče, zelene in rumene LED na voljo že od 1970-ih let, je s prihodom zelo svetleče modre LED v letu 1993, bila omogočena visoko učinkovita razsvetljava z LED. OLED razsvetljava pa se gradi na izkušnjah, pridobljenih iz proizvodnje velikih OLED zaslonov. Danes že obstajajo beli OLED elementi, ki lahko upodabljajo skoraj katerokoli barvo, tako da lahko enostavno sevamo visoko kvalitetno belo barvo z izkoristkom več kot 100 lm/W. Slika 8.1 prikazuje napredek v izkoristku in tudi kakšno vlogo imata LED in OLED pri večanju izkoristka v prihodnosti.

OLED in LED svetila se dopolnjujejo in skupaj nudijo veliko rešitev pri aplikacijah za razsvetljava. OLED svetila nam nudijo veliko površinsko razpršeno svetlobo, LED svetila nudijo intenzivno točkovno svetlobo, ki je uporabna za reflektorje. Anorganske LED proizvajajo in so na voljo na tržišču že kar nekaj časa, medtem ko se OLED proizvodnja šele sedaj bolj uveljavlja.



Slika 8.1: Večanje izkoristkov svetil skozi leta

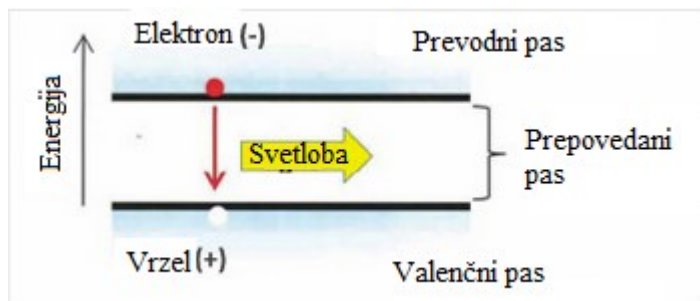
8.1 Mehanizem sevanja svetlobe in materiali

8.1.1 LED

Preprosti princip emisije svetlobe pri anorganskih LED prikazuje slika 8.2. V valenčnem pasu elektroni napolnjujejo energijska stanja. Valenčni pas je ločen od prevodnega pasu z energijsko špranjo E_g , znotraj katere se ne smejo nahajati elektroni. Če elektronu v valenčnem pasu dodamo dovolj energije, lahko ta preide v prevodni pas in v valenčnem pasu pusti vrzel. Elektron se lahko vrne v nižje energijsko stanje in pri tem odda energijo v obliki sevanja. Elektron, ki pade na nižji energijski nivo odda foton, ki ima energijo enako energijski špranji. Pri LED želimo imeti čim več sevalnih rekombinacij, vendar lahko pride tudi do številnih nesevalnih rekombinacij, kjer se elektron ali vrzel lahko ujame v defektu ali nepopolnosti materiala. Te napake v materialu omejujejo izkoristek generirane svetlobe in s tem tudi celoten izkoristek LED.

Prve LED (okoli 1962) so bile narejene iz galijevega arzenida (GaAs), aluminijevega galijevega arzenida ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), galijevega fosfida (GaP) in galijevega arzenid fosfida ($\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$). LED iz galijevega arzenida in aluminijevega galija arzenida so sevale svetlobo z infrardečo valovno dolžino. LED iz fosfida pa sevajo svetlobo z valovno dolžino okoli rdeče in zelene barve. Šele v zgodnjih 1990 letih so

se pojavile učinkovite modre LED, ki so bile narejene iz elementov iz tretje skupine periodnega sistema in nitrída.

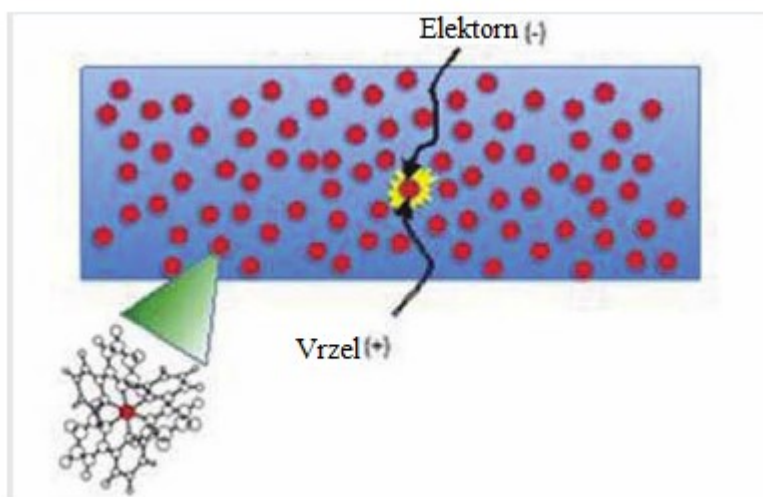


Slika 8.2: Princip emisije svetlobe pri anorganskih LED

8.1.2 OLED

Sedaj pa na kratko še ponovimo mehanizem svetlobne emisije pri OLED elementih. Slika 8.3 prikazuje na preprost način emisijo svetlobe pri OLED elementih. Bolj točno ta slika prikazuje le kaj se dogaja v emisijski plasti, ki je ponazorjena z modro barvo. Kot vemo, je emisijska plast običajno v sendviču med transportnima slojema za vrzeli in elektrone. V tej sliki so rdeče pike molekule dopantov, ki se običajno nahajajo v emisijski plasti in ena molekula dopanta (fosforja) je tudi prikazana bolj v detajl. Dopantne molekule so lahko fluorescenčne ali fosforescenčne. Kot vemo, nam fosforescenčni dopanti omogočajo doseči OLED elemente z najvišjim kvantnim izkoristkom. Pri OLED elementih pride do emisije svetlobe, ko se elektron, ki je injiciran iz katode, sreča na isti molekuli kot vrzel, ki je bila injicirana iz anode in skupaj tvorita eksciton. Ko ekscitonu poteče življenjski čas, se sprosti foton in se generira svetloba. S spremembo molekularne strukture lahko dostopamo do celotnega vidnega spektra in tudi skoraj infrardečega spektra.

Z razliko od anorganskih LED, so OLED elementi narejeni iz organskih polprevodniških materialov, ki so na osnovi ogljika. Ti materiali so skoraj enaki tistim, ki se uporabljajo za barve v printerjih in barvah za barvanje blaga. To pomeni, da je teh materialov zelo veliko in so zato poceni in ne delajo velike škode okolju.



Slika 8.3: Princip emisije svetlobe pri OLED

8.2 Struktura naprav

8.2.1 LED

Pri LED je osnovna struktura sestavljena iz pn-spoja (spoja p in n tipa materiala). N tip material vsebuje veliko elektronov, material P tipa pa vsebuje veliko število vrzeli. Ko na p-n spoj priklopimo napajalno napetost, začnejo elektroni potovati v P tip materiala in vrzeli v N tip materiala. To povzroči električni tok, veliko število injiciranih elektronov in vrzeli se na sredini sreča, se rekombinira in povzroči sevanje svetlobe.

V realnih aplikacijah je struktura LED bolj komplicirana z namenom, da:

- se poveča izkoristek injekcije elektronov in vrzeli,
- lokaliziramo elektrone in vrzeli, s čimer povečamo verjetnost sevalnih rekombinacij.

Običajno svetlečo diodo poleg materiala N tipa in P tipa, sestavlja še kvantna jama, ki omeji gibanje nabojev na dve dimenziji, in kovinski kontakti, ki povezujejo diodo z zunanjim svetom. Vrhnji kontakt je običajno prozoren in je narejen iz iridij kositrovega oksida.

Ta strukture se na koncu zapakira v paketek, ki ga vidimo v prodaji. K dodatnemu pakiranju strukture strmimo zaradi več razlogov:

- varovanje aktivnega polprevodniškega materiala pred degradacijo zaradi vzrokov okolice (v največjem delu vlaga),
- uporaba optične leče, ki določa kako bo struktura sevala svetlobo,

- odvajanje toplote iz naprave, ki bi povzročala dodatno degradacijo,
- varovanje naprave pred elektrostatično razelektritvijo.

8.2.2 OLED

Preprosto OLED strukturo sestavlja elektronski transportni sloj, transportni sloj za vrzeli in emisijski sloj. Emisijski sloj je običajno sestavljen iz dveh različnih molekul: prevodna gostiteljska molekula in dopantne molekule, ki oddaja svetlobo zelene valovne dolžine. Prav tako, kot pri anorganski LED moramo na sevalni strani imeti prozoren kontakt, skozi katerega lahko pride svetloba in ta je tudi običajno narejen iz indij kositrovega oksida. Prozoren kontakt je običajno anoda, katoda pa je narejena iz kovine (npr. aluminij dopiran z litijem).

Več o plasteh in materialih, ki sestavljajo OLED element si lahko preberete v poglavju 2.2.10 in poglavju 3.

8.3 Izkoristek LED in OLED elementov

8.3.1 LED

Najpomembnejši podatek pri vseh napravah je izkoristek. Pri anorganskih LED je podan zunaji kvantni izkoristek z enačbo:

$$\eta_{zun_Q} = \eta_{not_Q} \cdot \eta_{zun} \quad (8.1)$$

V enačbi (8.1) je η_{not_Q} notranji kvantni izkoristek in η_{zun} izkoristek ekstrakcije svetlobe (razmerje med generirano in pridobljeno svetlobo).

Ni nujno, da pri tvorjenju fotonov sodelujejo vsi elektroni in vrzeli, ki so bili injicirani v LED element. Zaradi defektov v materialu, se lahko vrzel ali elektron ujame v pasti, ki onemogoči formacijo fotona. Razmerje med generiranimi fotoni in velikostjo toka (število elektronov, vrzeli), ki je injiciran v LED, nam poda podatek o notranjem kvantnem izkoristku. η_{not_Q} se da povečati z uporabo strukture s kvantnimi jamami, z uporabo polprevodniškega materiala brez defektov in uporabo kovinskih kontaktov z zelo nizko upornostjo. V letu 2011 so pri modrih LED zabeležili notranji kvantni izkoristek okoli 80 % in 37 % pri zelenih LED. Enaki izkoristki pri vseh barvah so zelo pomembni. Z dodatnimi izboljšavami naj bi se približali 100 % notranjemu izkoristku. Zato bodo potrebovali veliko boljšo kontrolo nad defekti v materialih. Problem pri LED je tudi nižji izkoristek pri večjem krmilnem toku.

Ko so se fotoni že generirali znotraj LED, je potrebno poskrbeti, da bodo zapustili napravo. Razmerje med fotoni, ki zapustijo napravo, in številom generiranih fotonov znotraj naprave, je izkoristek ekstrakcije svetlobe. Ker ima LED višji refleksijski indeks ($n \sim 2,5$) od zraka ($n = 1$), se bo večina fotonov na meji odbila in ujela znotraj LED strukture ali pa absorbirala v druge materiale, ki sestavljajo LED. Da povečamo število fotonov, ki zapustijo LED, se doda tanka plast kovine, ki usmeri svetlobo iz LED svetila. Odbijanje svetlobe na meji in ujetje znotraj LED, se da tudi zmanjšati z uporabo grobe in ne gladke LED površine.

Na koncu podajmo še podatek o zunanjem močnostnem izkoristku (η_m), ki je definiran z razmerjem med skupno izhodno optično močjo in električno vhodno močjo. Z zagotovitvijo nizkih močnostnih izgub zaradi upornosti, visokega notranjega kvantnega izkoristka in dobrega dizajna za povečanje η_{zun} , dobimo zelo močnostno učinkovito LED. Maksimiranje močnostnega izkoristka ne le poveča izkoristek LED, ampak tudi zmanjša probleme s toploto.

8.3.2 OLED

Podobno kot pri anorganskih LED je skupni zunanji kvantni izkoristek odvisen od notranjega kvantnega izkoristka materiala in izkoristka ekstrakcije svetlobe. Enačba za zunanji kvantni izkoristek je podana z enačbo (8.2):

$$\eta_{zun_Q} = \phi \cdot \gamma \cdot \chi \cdot \eta_{zun} \quad (8.2)$$

V zgornji enačbi je ϕ absolutna učinkovitost molekule, da odda svetlobo, ko je vzbujena, γ možnost, da vsak injiciran elektron in vrzel lahko hkrati obstajata na svetlobno sevalni molekuli (ravnovesje nosilcev), η_{zun} izkoristek ekstrakcije svetlobe in χ je razmerje med številom sevalnih vzbujenih stanj in vsemi ostalimi možnimi vzbujenimi stanji. Pri najbolj sevalnih molekulah je $\phi = 1$ in tako je tudi pri materialih, ki se uporabljajo pri sodobnih OLED elementih. Pri pravilno zgrajenih strukturah je tudi $\gamma = 1$.

Najbolj pomemben delovni parameter OLED elementov je močnostni izkoristek. V tem primeru je optična izhodna moč v odvisnosti od električne moči podana z enačbo:

$$\eta_m = \theta \cdot \eta_{zun_q} \frac{V_\lambda}{V} \quad (8.3)$$

V enačbi (8.3) je θ prekrivanje svetlobnega vira s spektralno občutljivostjo očesa in V_λ je povezan z energijo sevanega fotona. Delovna napetost OLED elementa je enaka V in lahko vidimo, da se močnostni izkoristek manjša z večanjem delovne napetosti.

Pri trenutnih OLED elementih, izdelanih na steklenem substratu z metodami, ki so podobne tistim pri anorganskih LED, se veliko sevane svetlobe ujame znotraj steklenega substrata, ali absorbira v plasteh, ki sestavljajo OLED element. To pa povzroči, da je izkoristek pridobljene svetlobe le okoli 20 %. Vendar so že predlagali nove sisteme za izdelavo elementov, ki bi povečali ta izkoristek na okoli 40 do 60 %. Kljub temu je eden glavnih izzivov pri OLED elementih, kako bi še povečali ta izkoristek in, da bi bili tudi cenovno ugodni.

8.4 Krmiljenje sevalne barve

8.4.1 LED

Pri LED svetilih je pomemben podatek tudi natančnost, kvaliteta in stabilnost krmiljenja barve oz. valovne dolžine svetlobne emisije. Obstajajo trije glavni načini pridobivanja bele svetlobe pri LED, ti so:

- uporaba modre LED z rumenim fosforjem,
- uporaba ultravijolične LED z rumenim in modrim fosforjem (ali rdečim, zelenim in modrim fosforjem),
- izdelati napravo, ki vsebuje rdečo, zeleno in modro LED.

Barva, ki jo seva LED, je odvisna od strukture in sestave LED elementa. Da lahko pridobimo želeno valovno dolžino fotona, je potrebno izredno natančno kontrolirati debelino in sestavo elementa med proizvodnjo.

Pri krmiljenju barve s fosforjem, se modra svetloba, ki jo generira GaN (galijev nitrid), absorbira v fosforju in se svetloba ponovno izseva pri daljših valovnih dolžinah. Fosfor je izbran tako, da kombinacija direktne svetlobe iz LED elementa in svetloba, ki jo seva fosfor, tvorita želeno belo svetlobo. Fosforji so običajno nameščeni direktno na LED v enkapsulacijski material, ki je baziran na silikonu ali epoksiju. Enotnost fosforjevega premaza in izbira mešanice fosforja, lahko drastično vplivata na izkoristek in kvaliteto svetlobe. Kot primer, z uporabo rumeno sevajočega YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$) [17] fosforja z eno samo modro galij nitridno LED, dobimo visok svetlobni izkoristek, vendar relativno slabo kvaliteto (indeks upodabljanja barve < 75) svetlobe. Zaradi tega zaznavamo vso LED razsvetljavo, kot da oddaja modro-belo in hladno svetlobo. Ultravijolične LED z mešanim fosforjem pa zagotavljajo boljši barvni indeks pri slabšem izkoristku. Uporaba treh ali več LED z različnimi valovnimi

dolžinami (rdeča, zelena in modra) pride v poštev, ko želimo dinamično kontrolirati belo svetlobo. S to metodo dosegamo višje izkoristke kot s UV-fosforjevimi LED.

8.4.2 OLED

Pri OLED elementih spreminjanje molekularne strukture materialov vpliva na valovno dolžino sevane svetlobe. Belo svetlobo pridobimo z mešanjem rdeče, zelene in modre generirane svetlobe iz različnih koncev OLED elementa. Ker je spekter sevane svetlobe določene OLED preozek, ne moremo uporabiti le posamezne molekule za pridobivanje bele svetlobe določene valovne dolžine. Zato je nujna uporaba več različnih molekul znotraj emisijske plasti, da proizvedemo visoko kvalitetno svetlobo in zelen beli spekter.

Določena molekula znotraj emisijske plasti bo sevala z zelo dobro definirano spektralno obliko. Vendar belina oz. barvina je na koncu določena ne le z dobro definiranim spektrom sestavnih molekul v emisijski plasti, ampak tudi z detajli v strukturi naprave, ki se lahko spremenijo od ene izdelane naprave do druge.

Strukture, ki se uporabljajo za pridobivanje stabilne, predvidljive in kontrolirane bele svetlobe so:

- črtaste bele OLED,
- fluorescentne/fosforescentne bele OLED,
- zložene bele OLED.

Preproste strukture črtastih belih OLED elementov imajo črte rdečih, zelenih in modrih fosforescentnih OLED elementov postavljene eno zraven druge. Ta RGB vzorec se ponavlja in je zelo majhen, da opazovalec ne vidi posamezne barve. Ko vsako črto napajamo, bo mešanica osnovnih barv tvorila belo barvo, ki jo vidi opazovalec. Prednost te metode je ta, da nam omogoči optimiziranje posameznega elementa in s spremembo toka skozi element, lahko na fino nastavimo barvo. Slabost te strukture pa je v kompleksnosti njenega krmiljenja.

Fluorescentna/fosforescentna (F/F) OLED struktura uporablja fluorescentni modri segment in dobavlja preostala zelena in rdeča vzbujena stanja iz fosforescentnih molekularnih struktur (te vsebujejo težke kovine). Ta struktura potrebuje najnižjo krmilno napetost in zato ima tudi najvišji izkoristek glede na druge strukture. Ta F/F zasnova se lahko uporablja tudi pri zloženih in črtastih strukturah. Takšna naprava lahko dosega 100-odstotni notranji izkoristek, ker so vsi ekscitoni izkoriščeni s kombinacijo modrega fluorescentnega dopanta ter rdečega in zelenega fosforja.

Pri naloženi beli OLED strukturi se zložijo dva do trije belo sevajoči segmenti, med vsakim segmentom je dodan še zelo tanek sloj za generiranje naboja. V tem primeru se lahko vsak injiciran elektron rekombinira z vrzeljo v vsakem segmentu in

tvori foton. Tako lahko pri tej strukturi pridobimo 2–3 krat večji kvantni izkoristek glede na druge strukture, vendar potrebujemo toliko višjo napajalno napetost. Iz tega razloga skupen izkoristek takšne strukture ni nič višji, kot pri drugih, vendar je prednost te strukture v daljšem življenjskem času.

9 Zaključek

V magistrski nalogi sem se natančneje seznanil z LED in OLED elementi. Spoznal sem zgodovino njihovega razvoja in začetne aplikacije. Zelo podrobno sem si ogledal njihovo delovanje. Primerjal sem, kako lahko različni materiali in postopki izdelave izboljšajo njihovo delovanje ter izkoristek. Po korakih sem opisal izbiro materialov, proizvodnjo, zaščito in postopke testiranja končnega izdelka. Pogledal sem si tudi, kako se trenutni OLED zaslone na tržišču lahko konkurenčni že nekaj let uveljavljenim LED zaslonom. Prišel sem do zaključka, da imajo kljub velikim karakterističnim in praktičnim prednostim (manjša debelina, fleksibilnost, ...), tudi nekaj manjših in eno pomembnejšo slabost, to je cena, ki pa bo z množično proizvodnjo sigurno iz leta v leto nižja.

Ugotovil sem tudi, da imajo OLED elementi prihodnost v drugih aplikacijah, ne le pri TV zaslonih. To so mobilni telefoni, javna ter privatna razsvetljava, avtomobilska industrija in v različnih aplikacijah z velikopovršinskimi OLED paneli, ki so še v razvoju. Kot sem navedel, imajo OLED elementi veliko prihodnost tudi v avtomobilski industriji, kjer se lahko uporabijo za indikacijske luči, reflektorje, zaslone za števec in zabavno elektroniko. Večje avtomobilske znamke, kot so Audi, BMW, ... so že začele predstavljati koncepte avtomobilov, kjer bodo uporabljali OLED tehnologijo.

Glede na navedeno lahko sklepamo, da bo z večjim vložkom v raziskave OLED elementov ta tehnologija prinesla še veliko novega na tržišče in da bo prihodnost OLED elementov svetla.

Literatura

- [1] Takatoshi Tsujimura, OLED displays: fundamentals and applications, Wiley
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Intersystem_crossing (15.8.16)
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Pauli_exclusion_principle (15.8.16)
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_effect (15.8.16)
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Screen_burn-in (15.8.16)
- [6] http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2013_2014/Termalizacija_zaprlih_kvantnih_sistemov.pdf (15.8.16)
- [7] <https://sl.wikipedia.org/wiki/Kelacija> (15.8.16)
- [8] <http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.112.047403> (15.8.16)
- [9] <http://www.google.com/patents/EP1403354B1?cl=en> (15.8.16)
- [10] http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1308801 (15.8.16)
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Quenching_%28fluorescence%29 (15.8.16)
- [12] <http://www.digitaltrends.com/home-theater/oled-vs-led-which-is-the-better-tv-technology> (15.8.16)
- [13] https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/6179/Phatak_Radhika.pdf?sequence=1 (15.8.16)
- [14] Alastair Buckley, Organic light-emitting diodes (OLEDs) Materials, devices and applications, Woodhead publishing
- [15] <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR%20Ch8%20-%20Roll%20To%20Roll%20Processing%20TA%20Feb-13-2015.pdf> (23. 7. 2016)
- [16] Rainer Waser (Ed.), Nanoelectronics and Information Technology Advanced Electronic Materials and Novel Devices Third Completely Revised and Enlarged Edition, 2012 Wiley – VCH Verlag & Co.
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphor> (23.7.16)
- [18] <http://www.oled-info.com/oled-cars> (25.7.16)

