

ENERGETSKI EFIKASNA UNUTRAŠNJA POLUPROVODNIČKA RASVETA

Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Dokić, *Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet*

Sadržaj – Energetska efikasna poluprovodnička rasveta (LED i OLED) značajno je unapređena otkako su proizvodi bazirani na svetlećim diodama prvi put dospeli na tržište. Trenutno dostupne lampe i svetiljke mogu da imaju efikasnost koja je i više od tri puta veća u odnosu na najkvalitetnije LED proizvode pre 10 godina. U ovom radu dat je pregled tehnologija koje se koriste za dobijanje poluprovodničkih izvora svetlosti. Efikasno korišćenje ovih izvora svetlosti za rasvetu zavisi od uspešnog projektovanja sistema, što podrazumeva razumevanje uticaja električnih i fotometrijskih temperaturno zavisnih karakteristika na performanse uređaja. U radu su razmatrani i indikatori koji definišu sveukupnu efikasnost LED uređaja za rasvetu, a dato je i poređenje sa konvencionalnim tehnologijama.

1. UVOD

Princip rada svetlećih dioda (eng. *Light-emitting diode* - LED) zasniva se na pojavi elektroluminescencije, što podrazumeva emisiju svetlosti pod uticajem električnog polja. Ova pojava je otkrivena još davne 1907. godine (Henry Joseph Round) prilikom proticanja električne struje kroz kristal silicijum karbida [1]. Međutim, prva praktična svetleća dioda (LED) nastala je tek 1962. godine (Nick Holonyak) [2]. LED su dugo bile dostupne u zelenoj, crvenoj i boji čilibara, što je doprinelo njihovoj popularnosti u primenama za identifikacije signala i displeje. Kasnije je napravljena dioda koja je davala svetlost u plavoj boji (1994. godina, Nakamura) [3]. Ovo otkriće je omogućilo novi pristup u svetu rasvete, jer je, zahvaljujući njemu, dobijena dioda na galijum nitridu (GaN) koja je davala belu svetlost. U osnovi, belu svetlost je moguće dobiti na dva načina: mešanjem boja crvene, zelene i plave diode ili dodavanjem sloja fosfora u plavu diodu, čime se modifikuje emisioni spektar. Bele LED su transformisale tehnologiju osvetljenja, uključujući unutrašnju i spoljašnju rasvetu i saobraćajnu i železničku signalizaciju. Karakteristike svetlećih dioda, kao što su svetlosna efikasnost, robusnost, dug životni vek, visok indeks reprodukcije boje, i visoka pouzdanost, čine ih odličnim kandidatima koji zamenjuju tradicionalne izvore svetlosti [4].

Nedavno je i organska LED tehnologija (OLED tehnologija) postala interesantna za osvetljenje. Izučavanja elektroluminescencije u organskim poluprovodnicima su počela sredinom 20. veka, rezultirala su i predlogom određenih komponenata koje, zbog prekomerne debljine i velikog radnog napona, nisu komercijalno bile zanimljive. Prva organska dioda (OLED) napravljena je 1987. godine u Eastman Kodak Company [5]. Ova OLED je imala različite slojeve za transport elektrona, šupljina i emisiju svetlosti. Dobijena je vakuumskim naporavanjem malih molekula organskog materijala zajedno sa metalnom katodom na provodnu podlogu. Svetlosna efikasnost komponente se smatrala zadovoljavajućom za komercijalne primene, ali ono što je značajnije od toga jeste početak intenzivnog istraživanja u oblasti organske elektroluminescencije [5].

Uvođenjem novih tehnoloških koncepata organskih dioda, poboljšana je svetlosna efikasnost i njihov životni vek. Međutim, postoje još uvek velike poteškoće u razvoju OLED tehnologije, te se posebni naponi ulažu u istraživanja vezana za povećanje svetlosne efikasnosti, produženju životnog veka i povećanje svetleće površi organskih svetlećih dioda [6]. OLED su tanke, lake, imaju veliku površ i mogu biti fleksibilne i savitljive. U isključenom stanju, njihova površina može biti reflektujuća, difuziona ili transparentna. Raznovrsnost OLED formata čini ih veoma primenljivim u dekorativnoj i rasveti unutrašnjeg prostora. Zbog organske prirode ovih dioda, moguće je dobijanje ravnomerne svetlosne emisije po velikim površinama, ugodne za ljudsko oko [7].

U ovom radu biće dati osnovni principi poluprovodničkih tehnologija koje se koriste za rasvetu. Takođe, razmatraće se svetlosna efikasnost LED paketa, kao gradivnog elementa LED lampi i svetiljki, i efekti koji utiču na svetlosnu efikasnost celog LED sistema za rasvetu.

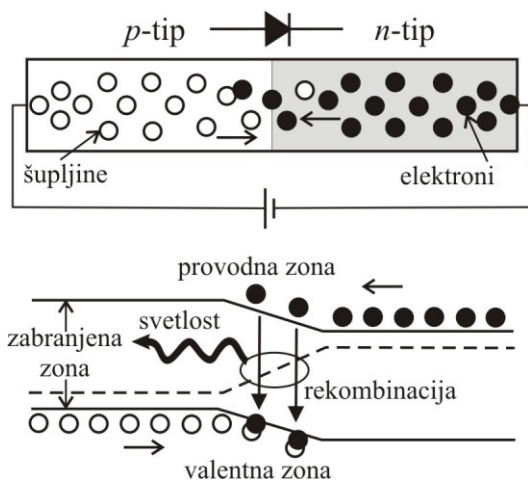
2. OSNOVNI PRINCIPI LED I OLED TEHNOLOGIJA

OLED tehnologija je već uveliko zastupljena za dobijanje displeja, i to je trenutno tržište na kojem je ova tehnologija dominantna. Karakteristike OLED tehnologije, kao što su ušteda energije, reprodukcija boje, veliki kontrast, širok vidni ugao i brzina odziva, veoma su poželjne za displeje prenosnih uređaja, monitore i televizore [8]. S druge strane, LED tehnologija je već započela smenu klasičnih izvora svetlosti za osvetljenje i unutrašnjeg i spoljašnjeg prostora. U ovom području, OLED tehnologija zahteva još dodatnih usavršavanja tehnoloških procesa kako bi postala konkurentna na tržištu i mišljenje je naučne zajednice [7,9] da će se to desiti u bliskoj budućnosti.

2.1. Princip rada LEDa

Svetleća dioda, LED, je u osnovi napravljena od poluprovodničkih materijala. Dopiranje u n oblasti obezbeđuje veliku koncentraciju negativnih nosilaca naelektrisanja (elektrona), dok dopiranje u p oblasti omogućava veliku koncentraciju pozitivnih nosilaca naelektrisanja (šupljina), kao što je prikazano na slici 1. Kada se na pn spoj primeni direktni napon, kroz diodu će proteći struja. U području u kojem dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina, kao prapratni efekat može se pojaviti foton određene talasne dužine. Postoje dva osnovna mehanizma rekombinacije u poluprovodnicima, sa zračenjem (emisijom svetlosti) i bez zračenja. Za vreme rekombinacije bez zračenja, energija elektrona se transformiše u energiju vibracije atomske rešetke, odnosno u fonone. Glavni uticaj neradijacijske rekombinacije jeste povećanje temperature spoja (T_j), što je kritični parametar LEDa usled uticaja koji taj parametar ima na životni vek, svetlosni fluks, efikasnost i električne karakteristike diode. Kod rekombinacije sa zračenjem, emituje se foton koji ima energiju jednaku širini energetskog procepa materijala, odnosno emituje se zračenje

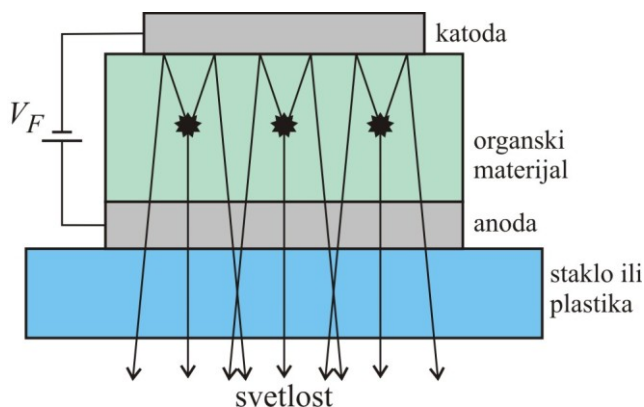
koje je rezultat raspada pobuđenog stanja (ekscitona). Rekombinacija sa emisijom fotona je uglavnom karakteristika neorganskih poluprovodnika sa direktnim zonskim prelazom, kao što su galijum arsenid (GaAs), galijum fosfid (GaP) i silicijum karbid (SiC). Boja emitovanog svetla zavisi od vrste poluprovodnika, od vrste i količine primesa u poluprovodniku, i može biti od infracrvenog, preko vidljivog do ultraljubičastog dela spektra.



Sl. 1. Princip rada LEDa

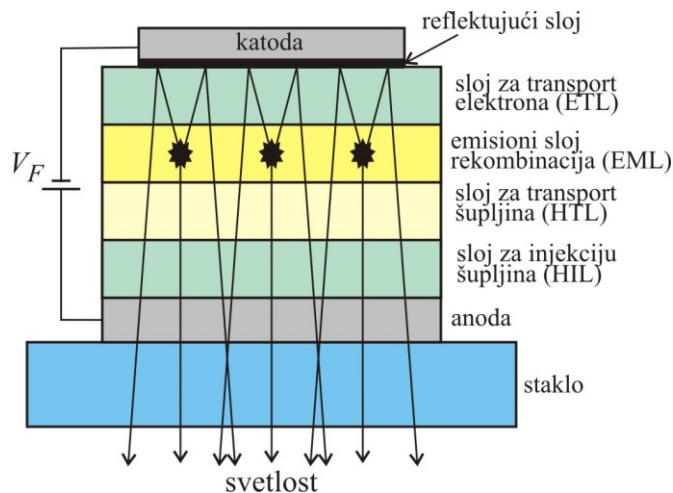
2.2. Princip rada OLEDa

Najjednostavnija OLED struktura sastoji se od jednog sloja organskog materijala, smeštenog između metalnog kontakta (najčešće od aluminijuma ili srebra) koji čini katodu, i transparentne elektrode (uobičajeno od indijum tin oksida - ITO) koja čini anodu. Ovakva struktura se nalazi na podlozi od stakla ili plastike, kao što je prikazano na slici 2.



Sl. 2. Najjednostavnija OLED struktura

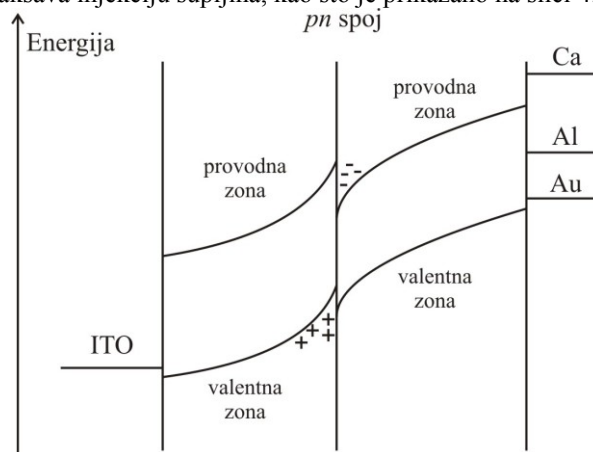
Kod direktne polarizacije diode, elektroni i šupljine se injektuju iz katode i anode, redom, u organski sloj. Šupljine se, u „skokovima“, kreću u smeru električnog polja kroz energetske najviše zauzete orbite molekula, a elektroni se kreću u suprotnom smeru na energetske najniže nezauzete orbite molekula. U zavisnosti od pokretljivosti elektrona i šupljina, elektron i šupljina će se sresti u određenoj tački organskog sloja i, relaksacijom energetskog stanja, proizvesti svetlost. Primer višeslojne OLED strukture je prikazan na slici 3.



Sl. 3. Višeslojna OLED struktura

Poboljšanje efikasnosti OLEDa može se postići promenom debljine sloja, podešavanjem koncentracije primesa i višeslojnim strukturama koje se sastoje od slojeva različitih materijala sa različitim funkcionalnostima.

U OLED strukture spadaju i strukture kod kojih je jedan ili više slojeva provodni polimer. Kao anoda najčešće se koristi ITO jer ima veliki izlazni rad što omogućava ubacivanje šupljina u valentnu zonu organskog materijala. Najčešće se kao provodni polimer koristi PEDOT (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) ili PSS (Poly(*p*-phenylene vinylene)) kod kojih je valentna zona iznad izlaznog rada ITO, a ispod valentne zone nekog drugog polimera što olakšava injeksiju šupljina, kao što je prikazano na slici 4.



Sl. 4. Dijagram energetske zone kod dva poluprovodnika koji formiraju pn spoj

Kao katoda može se koristiti kalcijum, barijum ili magnezijum, jer imaju mali izlazni rad, što će olakšati injeksiju elektrona. Ovi metali su reaktivni pa su često zaštićeni aluminijumom. Kod provodnih polimera, mala je energija jonizacije, pa je injeksija šupljina jednostavna, dok je mnogo teže ostvariti injeksiju elektrona. Osim injeksije elektrona i šupljina, kod OLEDa je veoma važan i njihov transport kroz sloj poluprovodnika. Kao negativni efekat može se javiti rekombinacija elektrona i šupljina u blizini elektrode preko koje se ubacuju naelektrisanja, što će

smanjiti delotvornost uređaja ili će doći do prestanka svetlosne emisije. Ova pojava može biti posledica nejednakih brzina kretanja elektrona i šupljina i na nju se može uticati odabirom katodnog materijala [7].

2.3. Poređenje LED i OLED izvora svetlosti

Postoje određene razlike između LED i OLED tehnologije; jedna od tih razlika odnosi se na sam dizajn komponente. LED se proizvode narastanjem slojeva neorganskog materijala na podlogu od safira ili silicijuma. OLED se proizvode ubacivanjem slojeva organskih materijala na bazi ugljenika između elektroda, a na podlogu koja je od stakla ili plastike. OLED imaju veću površinu, to su površinski izvori svetlosti. U zavisnosti od karakteristika organskog materijala, mogu biti veoma tanki i fleksibilni. S druge strane, LED su tačkasti izvori svetlosti. Svetlost koju LED daje je koncentrisana i stoga su često neophodna sočiva i drugi optički dodaci kako bi se dobila odgovarajuća distribucija svetlosti. Nasuprot tome, OLED ima difuziono svetlo, bez prekomernog odsjaja, čime se osigurava meko osvetljenje [7,8]. Obe tehnologije su projektovane za različite primene. Prema mišljenju naučne zajednice [7,9], OLED tehnologija će zameniti velike izvore svetlosti za unutrašnje osvetljenje, kao i za dekorativne i ambijentalne primene. Rasveta na bazi LED tehnologije je uglavnom projektovana za poslovno i spoljašnje, odnosno ulično osvetljenje.

3. ENERGETSKA EFIKASNOST LED PAKETA

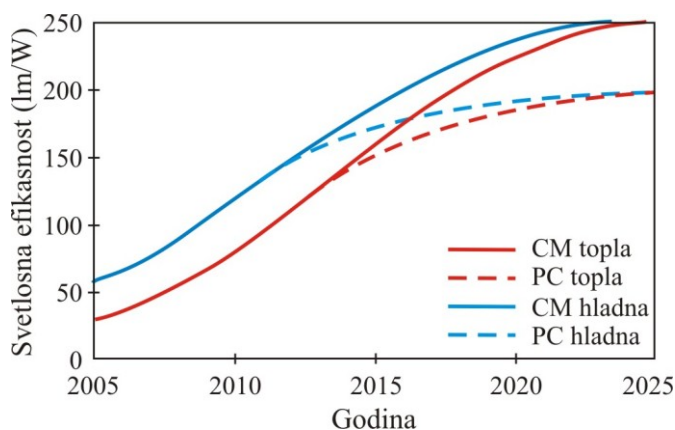
Energetska efikasnost LED proizvoda se uobičajeno definiše kroz svetlosnu efikasnost (ili samo efikasnost), što podrazumeva emitovani fluks po utrošenoj snazi (izražava se u lm/W). Uz ovako pojednostavljenu definiciju efikasnosti kod LED proizvoda, važno je napomenuti da postoje neke činjenice koje se ne smeju zanemariti. LED paket (individualni LED čvor koji je gradivni blok svih LED proizvoda) ima svetlosnu efikasnost koja se razlikuje od efikasnosti LED proizvoda, kao što su lampe ili svetiljke, usled termičkih i optičkih, kao i gubitaka zbog drajvera [9].

Kad je reč o samom LED paketu, postoji više promenljivih koje utiču na efikasnost, ali se tri faktora mogu izdvojiti kao značajna i za proizvođače i za potrošače: način dobijanja bele svetlosti, kvalitet boje i struja pobude.

Postoje dva načina dobijanja bele svetlosti pomoću LEDa, mešanje boja (*eng.* Color mixing - CM) i dodavanje sloja fosfora u plavu LED (*eng.* Phosphor conversion - PC). Trenutno su PC LED tehnologije energetski efikasnija opcija, koja može dati LED paket sa svetlosnom efikasnošću iznad 130 lm/W (teorijski projektovana maksimalna efikasnost LED paketa je 266 lm/W). Međutim, usled dodatnih procesa koji prate konverziju fosfora, smatra se da PC LED paketi moraju imati manju efikasnost od CM LED paketa (slika 5). Trenutno manja efikasnost CM LED paketa je usled male efikasnosti zelene i diode boje ćilibara. Inovativni postupci mešanja boja ili hibridni sistemi (više od jedne spektralne diode sa emisijom fosfora) bi vrlo uskoro trebalo i komercijalno da daju LED pakete sa povećanom efikasnošću.

Drugi važan parametar efikasnosti je kvalitet boje. Na primer, postizanje određene temperature boje zahteva promenu spektralnog sadržaja izvora svetlosti. Promenom spektralnog sadržaja menja se svetlosna efikasnost radijacije. Shodno tome, LED paketi koji imaju različite vrednosti za

usaglašenu temperaturu boje (*eng.* Correlated color temperature - CCT) i indeks reprodukcije boje (*eng.* Color rendering index - CRI) imaju i različite efikasnosti. Na primer, veći CRI zahteva restriktivnost spektralnog sadržaja i širu distribuciju spektralne snage, te stoga unutar jedne familije proizvoda paketi sa većim CRI imaju smanjenu efikasnost. Teoretski, niža CCT ne bi trebalo da loše utiče na efikasnost, ali usled ostalih faktora efikasnosti, trenutno dostupni LED paketi sa hladnom belom bojom (6500 K) imaju skoro 20% veću efikasnost u odnosu na LED pakete sa toplom belom bojom (3000 K). Trendovi ukazuju da će se ova razlika vremenom smanjivati.



Sl. 5. Trenutno stanje i projektovano povećanje efikasnosti LED paketa dobijenog mešanjem boja (CM) i dodavanjem sloja fosfora u plavu LED (PC), u slučaju tople bele (CCT 2580 K do 3710 K i CRI od 80 do 90) i hladne bele (CCT 4746 K do 7040 K i CRI od 70 do 80) [9]

Treći važan parametar efikasnosti je pobudna struja. Tipične vrednosti ove struje su 350 mA, 700 mA i 1000 mA, ali se mogu koristiti i veće vrednosti struje. Veće pobudne struje LEDa omogućavaju veći izlazni svetlosni fluks, ali i srazmerno smanjenje efikasnosti. Uzrok ovog smanjenja efikasnosti se intenzivno istražuje i očekuje se da će u sledećih deset godina ovaj problem biti u potpunosti prevaziđen.

4. ENERGETSKA EFIKASNOST LAMPI I SVETILJKI

Termički efekti, gubici drajvera i optički gubici smanjuju efikasnost LED lampi i svetiljki u odnosu na efikasnost ugrađenih LED paketa. Zajedno posmatrano, ovi gubici mogu smanjiti efikasnost i za više od 30%. Prema podacima iz 2013. godine, svetlosna efikasnost komercijalno dostupnih integrisanih lampi i svetiljki se nalazi u opsegu od 10 lm/W do skoro 120 lm/W. Najveći broj proizvoda ima efikasnost između 40 i 80 lm/W, što je značajno manje u poređenju sa efikasnošću LED paketa.

4.1. Termički gubici

Glavni faktor pri određivanju svetlosnog izlaznog fluksa LEDa je temperatura pn spoja (T_j). Sa povećanjem temperature spoja, proces generacije svetlosti postaje manje efikasan i smanjuje se izlazni svetlosni fluks. LED lampe i svetiljke stoga zahtevaju sistem za upravljanje temperaturom.

Međutim, čak i u izuzetno dobro projektovanim sistemima, temperatura spoja može porasti značajno iznad laboratorijskih uslova, što može smanjiti ukupnu efikasnost i do 15% [9].

4.2. Optički gubici

Bez obzira na vrstu izvora svetlosti, korišćenje sočiva, reflektora ili drugih optičkih sistema za oblikovanje osvetljaja smanjuje ukupni fluks emitovanog svetla. Ovo je jedan od važnih faktora razlike efikasnosti LED paketa i LED sistema (lampi ili svetiljki). S obzirom na veliku raznolikost upotrebljenih optičkih sistema za LED sisteme, trenutno dostupne na tržištu, teško je proceniti koliko iznosi smanjenje efikasnosti usled optičkih gubitaka [9].

4.3. Gubici usled drajvera

Fluorescentne i natrijumove svetiljke sa visokim pritiskom (HID) ne mogu funkcionisati bez prigušnice, sistema koji obezbeđuje početni napon i ograničava električnu struju. Slično, LED lampe i svetiljke imaju drajver, sistem koji sadrži napajanje i kola za upravljanje. Najveći broj drajvera konvertuje mrežni napon u malu DC vrednost napona napajanja i mogu sadržati dodatna pomoćna električna kola za podešavanje izlaznog fluksa i/ili korekciju boje. Trenutno dostupni drajveri imaju efikasnost oko 85%.

U poređenju sa drugim izvorima svetlosti, efikasnost LED rasvete je uporediva sa efikasnošću kompaktnih HID sijalica (metal halidnih i natrijumovih sa visokim pritiskom) i mnogo je veća u poređenju sa drugim izvorima svetlosti (metal halogene, halogene, fluorokompaktne, fluorescentne sijalice i sijalice sa žarnom niti). Trenutno dostignuta efikasnost LED i HID svetiljki je oko 130 lm/W, ali su LED svetiljke jedine kod kojih se očekuje značajno poboljšanje efikasnosti u bliskoj budućnosti.

5. ZAKLJUČAK

Od prvih primena LED tehnologija u osvetljenju, efikasnost LED sistema je značajno poboljšana. Očekivanja su da će se ovaj trend nastaviti zahvaljujući novim materijalima, poboljšanim proizvodnim procesima i novim dizajnom samih svetiljki i lampi. Trenutno dostignuta efikasnost LED paketa je veća od ostalih izvora svetlosti, dok mnoge integrisane LED lampe i svetiljke imaju efikasnost koja je uporediva sa HID svetiljkama. OLED paneli za unutrašnju rasvetu su takođe energetske efikasni (između kompaktnih fluorescentnih sijalica i LED). Neki proizvođači već imaju u ponudi panele s ugrađenim OLED izvorom svetlosti, no one su još uvek vrlo skupe i u ranoj fazi razvoja.

Prednost poluprovodničkih tehnologija u osvetljenju ogleda se u mogućnosti promene LED i OLED proizvoda koja je mnogo veća u odnosu na proizvode dobijene klasičnim tehnologijama u osvetljenju. LED proizvodi se značajno menjaju u vrlo kratkom vremenskom periodu u poslednjih par godina.

Efikasnost ne bi trebalo da bude jedini kriterijum pri poređenju dostupnih svetiljki na tržištu. Ostale karakteristike, kao što su kvalitet boje, svetlosni intenzitet distribucije, i podesivost izlaznog svetlosnog fluksa, idu u prilog odabiru poluprovodničkih izvora svetlosti. U prednosti poluprovodničke tehnologije može se svrstati još i značajno duži vek trajanja ovih proizvoda.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske u okviru projekta INGRID.

7. LITERATURA

- [1] H. J. Roland, „A note on carborundum,“ *Electr. World*, vol. 19, p. 309, Feb. 1907.
- [2] N. Holonyak and S. F. Bevacqua, „Light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions,“ *Appl. Phys. Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 82-83, Dec. 1962.
- [3] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, „Candela class high-brightness InGaN/AlGaIn double heterostructure blue light-emitting diodes,“ *Appl. Phys. Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, Mar. 1994.
- [4] S. Peralta and H. Ruda, „Applications for advanced solid-state lamps,“ *IEEE Ind. Applicat. Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 31-42, July-Aug. 1998.
- [5] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, „Organic electroluminescent diodes,“ *Appl. Phys. Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 913-915, Sep. 1987.
- [6] R. Meerheim, B. Lussem, and K. Leo, „Efficiency and stability of p-i-n type organic light emitting diodes for display and lightening applications,“ *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 9, pp. 1606-1626, Sept. 2009.
- [7] Vitor C. Bender, Tiago B. Marchesan and J. Marcos Alonso, „Solid-State Lighting – A concise Review of the State of the Art on LED and OLED Modeling,“ *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 6-16, June 2015.
- [8] D. Mian and Z. Lin, „Chameleon: A color-adaptiveweb browser for mobile OLED displays,“ *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 724-738, May 2012.
- [9] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency of LED*, March 2013.

Abstract – Energy efficient solid-state lighting (LED and OLED) has significantly improved since the products based on LEDs first came on the market. Currently available lamps and luminaires can have efficiency which is more than three times higher than the highest quality LED products 10 years ago. This paper provides an overview of technologies used for obtaining the solid-state light sources. Effective use of these light sources for general lighting depends on the successful design of the system, including understanding of the impact of temperature-dependent electrical and photometric characteristics on the performance of the device. The paper discusses the indicators that define the overall efficiency of LED devices for lighting, and gives the comparison with conventional technologies.

ENERGY EFFICIENT INTERIOR SOLID-STATE LIGHTING

Tatjana Pešić-Brdanin, Branko Dokić