

MOGUĆNOSTI LABORATORIJE U OPTIČKOJ KARAKTERIZACIJI LED IZVORA SVETLOSTI

*Dragan Dramlić**, *Predrag Milutinović**, *Zoran Velikić**
Marko Popović*, *Stefan Dramlić**, *Tatjana Marjanović***

* Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku, Laboratorija za fiziku atmosfere i optičku metrologiju, 11080 Beograd, Pregrevica 118, P.O.Box 68, Srbija

** M - ELEKTRO D.o.o., 11070 Novi Beograd
Jurija Gagarina 271, Srbija

Rezime:

Svedoci smo da LED tehnologije uzimaju sve više maha i po nekim parametrima skoro da su ravnopravni sa konvencionalnim svetlosnim izvorima. O LED svetlosnim izvorima dosta je napisano i rečeno, ne samo na našim Savetovanjima i okruglim stolovima, već uopšte. Izrečene su mnoge pohvale ali i pokude na njihov račun. LED izvori svetlosti, koji su već pronašli svoje mesto u dekorativnom, pejzažnom i enterijerskom osvetljenju, sve više «prete» da zauzimu mesto i u javnom osvetljenju.

S obzirom na to, mi smo u Laboratoriji izvršili određena merenja pojedinih karakteristika nekoliko slučajno izabranih uzoraka LED izvora. Takođe smo obavili i seriju merenja u okviru razvoja LED semaforiskog uređaja.

U radu su navedeni dobijeni rezultati, kao i mogućnosti Laboratorije u fotometrijskim, radiometrijskim i svetlotehničkim ispitivanjima LED svetlosnih izvora.

UVOD

Od 18. veka, kada je izmišljena sijalica, nijedna tehnologija koja se direktno koristi za osvetljenje nije uspela da toliko uzdrma tržište kao tehnologija LED izvora. Upotreba LED izvora u osvetljenju je do pre nekoliko godina bila skoro nemoguća, zbog veoma male količine svetlosti koje su LED izvori bile u stanju da proizvedu. Tokom zadnjih godina, LED tehnologija je napravila ogroman iskorak, realizujući nove proizvode, kako za dekorativno, pejzažno, enterijersko, a naročito za javno osvetljenje.

ŠTA SU LED IZVORI SVETLOSTI I KAKO RADE?

LED (*Light Emiting Diode*) izvor svetlosti je u suštini PN spoj koji radi na principu odavanja energije emitovanjem fotona kada se u diodi izvrši rekonbinacija slobodnog elektrona i šupljine, odnosno kada slobodni elektron pređe iz provodne u valentnu zonu. Talasna dužina emitovanog fotona zavisi od energetskog procepa poluprovodničkog materijala od koga je LED dioda napravljena.

Svetlosne diode, koje emituju vidljivu svetlost, se prave od materijala sa energetskim procepom između 1,7 V i 3,5 V. Najčešće se koriste galijum fosfid (GaP, $E_g = 2.3V$, zelena boja) i galijum arsenid (GaAs, $E_g = 2V$, nijansa crvene boje). Za emisiju svetla u infra-crvenom delu spektra, svetlosne diode se prave od galijum arsenida (GaAs). LED dioda emituje nekoherentnu svetlost, što znači da emitovani fotoni imaju različite talasne dužine, faze i polarizacije. Da bi LED dioda emitovala svetlost, kao što je rečeno, u njoj se mora izazvati rekonbinacija slobodnih nosilaca. To se postiže direktnom polarizacijom pomoću spoljnog izvora za napajanje. Tada se stvara struja direktne polarizacije i glavni

nosioći menjaju stranu, nakon čega se rekonbinuju sa većinskim nosiocima suprotne strane kao i kod obične diode. Prema tome dioda će jače da svetli, ako je struja direktne polarizacije veća. Da bi emitovani fotoni izašli u okolinu kao svetlost, sloj LED diode blizu prozora mora biti, veoma tanak.

Tanak PN spoj dopušta izlazak fotona u okolinu, a češljasta anoda stvara ravnomernu gustinu struje direktne polarizacije na celom PN spoju, što omogućuje ravnomernu sjajnost diode. Zbog većeg energetskeg procepa u odnosu na silicijum, svetlosne diode imaju veći pad napona kod direktne polarizacije. Što se tiče brzine odziva, LED diode su sporije od standardnih dioda zbog veće kapacitivnosti PN spoja čije su dimenzije veće da bi svetleća površina bila dovoljno velika. LED diode se primenjuju kao izvor svetlosti čija je efikasnost, definisana kao odnos energije emitovane svetlosti i uložene električne energije, višestruko veća u odnosu na sijalice sa užarenim vlaknom.

PREDNOSTI I NEDOSTATCI LED IZVORA SVETLOSTI

LED izvori svetlosti, kao što je poznato, zamenjuju inkandescentne i fluorescentne izvore svetlosti koje proizvode «belu i obojenu svetlost».

Kao što i sve, tako i LED izvori svetlosti imaju svoje prednosti i nedostatke. Kao osnovne prednosti mogu se navesti:

- Emituju svetlost u željenoj boji,
- Ne zahtevaju ugradnju spoljašnjeg reflektora,
- Radi sa niskim naponom (nema opasnosti od električnog udara),
- Veoma dug vek trajanja,
- Hladni izvori (bez značajnijeg odavanja toplote),
- Dobra zaptivenost,
- Minijaturne dimenzije.

Ove prednosti LED izvora svetlosti omogućili su nove primene kao što je primena u vlažnim sredinama, u spoljnom osvetljenju (za osvetljenje vrtova, delova fasada, ...), zatim LED izvori kao deo nameštaja, potpuna sloboda u kreiranju svetiljki novih oblika, mogućnost promene boje ambijenta itd. Trenutno se na poboljšanju LED izvora svetla radi u smislu povećanja svetlosne iskoristivosti (sa približno 100 lm/W na oko 200 lm/W), zatim na "poboljšanju" tzv. bele boje kao i na smanjenju njihove cene.

Kao što je rečeno LED izvori svetla, imaju i svoje nedostatke kao što su:

- LED tehnologija je mnogo skuplja zbog prateće elektronske opreme (lm/dolar),
- Radne karakteristike veoma zavise od temperature okoline, i lako može da dođe do pregrevanja, što izaziva njihovo oštećenje,
- Neophodno je obezbediti odgovarajuće hlađenje, kako bi se osigurao dugi vek, što je naročito važno u saobraćajnim i vojnim primenama, kada se u velikom rasponu temperature okoline zahteva dugotrajan i pouzdan rad uređaja sa ovakvim izvorom svetla.

RELEVANTNI STANDARDI

Problematika LED izvora svetlosti, relativno je dobro standardizovana. U nastavku je dat popis relevantnih standarda do kojih su autori došli.

1. IEC 61347-2-13, *Lamp controlgear – Part 2-13: Particular requirements for d.c. or a.c. supplied electronic control gear for LED modules*

2. IEC 62031, *LED modules for general lighting – Safety requirements*

3. IEC 62384:2006/A1:2009 DC or AC supplied electronic control gear for LED modules - Performance requirements
4. IEC 62386-210 ed1.0 (2011-04) Digital addressable lighting interface - Part 210: Particular requirements for control gear - Sequencer (device type 9)
5. [CIE 127-2007](#): Measurement of LEDs
6. IEC 60825-1: Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements (IEC 60825-1 2007 Revizija IEC EN 60825-1:1998-05), (IEC EN 60825-1/A11:1999-01 Bezbednost laserskih proizvoda)
7. IEC 60410:1973, *Sampling plans and procedures for inspection by attributes*
8. IEC 61000-3-2:2000, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16 A$ per phase)*
9. IEC 61547, *Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements*

ŠTA LABORATORIJA MOŽE?

Laboratorija za fiziku atmosfere i optičku metrologiju nalazi se u sastavu Centra za eksperimentalnu fiziku Instituta za fiziku. Dosadašnje angažovanje saradnika Laboratorije pretežno je bilo na razvoju i primeni najnovijih mernih metoda u oblasti radiometrije, fotometrije i svetlotehničkih merenja. Pored toga saradnici Laboratorije su dugogodišnji članovi u stručnim komisijama profesionalnih udruženja iz ove oblasti. Budućnost Laboratorije usmerena je kako na dalji razvoj i primenu najnovijih mernih metoda u ovoj oblasti, tako i pre svega na pružanju usluga korisnicima iz domena rada laboratorije.

Laboratorija raspolaže kvalitetnom opremom kao što je **Spectra Prichard Photometer** sa prizmom (koji omogućava merenje sjajnosti, ravnomernosti osvetljenosti sistemom tačaka, ravnomernosti osvetljenosti sistemom prizme, nivoa osvetljenosti, inteziteta svetlosti, temperature boje, hromatskih koordinata, refleksije i transparentije), **Spectroradiometer System EGG 550/555** u talasnom opsegu od 200 nm do 1200 nm za snimanje spektralne raspodele sijalica i svetiljki. Laboratorija poseduje etalon sjajnosti kao i veći broj fotometrijskih klupa od kojih je najduža 4 m, nosač fotometrijske klupe, dva optička stola sa mermernim radnim površinama, izvor jednosmernog električnog napona, digitalni merač jačine električne struje i napona "**Kitley**" sa šest digita, garnitura spektralno neselektivnih apsorpcionih filtara. Takođe poseduje softver za automatsko snimanje i predstavljanje krivih kao i izračunavanje ukupnog fluksa i inteziteta svetlosti, izokandelnog dijagrama, zonalnog dijagrama i stepen iskorišćenja svetiljke. Laboratorija poseduje i ostalu neophodnu prateću opremu kao i računarske akvizicione sisteme kojima se mogu automatizovati neki vidovi laboratorijskih aktivnosti. Na raspolaganju su i savremeni računari (uključujući i prenosive) sa paketima za statističku i grafičku obradu rezultata eksperimentalnog rada.

Laboratorija je nabavila i sledeću neophodnu opremu:

- * **Fotometrijske sijalice - sekundarni etaloni jedinice svetlosne jačine**
- Osram, tip: Wi 41/G, 6A, 31V, E 27

* **Etaloni otpornosti nazivnih vrednosti** 0,001 Ω ; 0,01 Ω ; 0,1 Ω , klase tačnosti 0,02

* **Stabilisani izvor jednosmerne struje**

- stabilnost reda 0,0001,
- struja od 0 A do 50 A,
- napon od 0 V do 60 V,
- plivajuca masa.

* **Visokokvalitetani luksmetari:**

A) Illuminance Meter LMT B 520 :

- display range 0.0001 lx (last digit) to 600 000 lx,
- 4-digit display (0-7999) with dimmer for brightness control,
- V.24-(RS 232-) Interface,
- analog output ,
- ranging auto/manual, or remote programmable,
- approx. 2.5 readings/s,
- power supply for 230 V, 50-60 Hz,
- photometer head P 30 SC0, 30 mm dia. light sensitive surface,
- very fine $V(\lambda)$ -approximation, cos-correction,
- 3 m connection cable, power cable with Euro plug,
- calibration, traceable to PTB standard, with LMT calibration certificate,
- individual test report for $V(\lambda)$ -approximation and cos-correction,
- class A and L according to DIN 5032 part 7.

B) Illuminance Meter LMT POCKET LUX 2 A:

- 4½-digit LED display,
- analog output 0-2 V,
- separate photometer head P 10 FC0 with 2 m connection cable,
- light sensitive surface 10 mm dia., fine $V(\lambda)$ -approximation and cos-correction,
- adapter for photometer head,
- battery pack,
- carrying case,
- calibration, traceable to PTB standard, with LMT calibration certificate,
- individual test report for $V(\lambda)$ -approximation and cos-correction,
- class B according to DIN 5032 part 7.

* **LMT Photocurrent Meter I 1000**

- display range 1×10^{-11} A (last digit) to 1.5×10^{-2} A,
- 4½-digit display,
- BCD output, analog output,
- ranging auto/manual or remote programmable,
- approx. 5 readings/s, integration time approx. 20 ms,
- 4-digit attenuator, disconnectible, dark current compensation,
- power supply for thermostatic stabilized LMT photometer heads,
- power supply for 230 V, 50-60 Hz in 19-inch 3 HU case.

* **Fotoćelija za goniofotometar**

- Photometer head with Si-photoelements,
- 30 mm dia. light sensitive surface,
- $V(\lambda)$ -approximation, cos-correction, thermostatic stabilization,

- special splash-proofed housing (degree of protection IP 65) with polished glass dome,
- 3 m connection cable with plug,
- calibration, traceable to PTB standard, with LMT calibration certificate,
- individual test report for $V(\lambda)$ -approximation and cos-correction,
- $V(\lambda)$ -approximation very fine, $f_1 \leq 0.8 \%$, sensitivity 15-28 nA/lx,

*** Spektrofotometar DU 720 proizvođač BECKMAN Coulter, USA:**

- opseg talasnih dužina: 190 do 1100 nm,
- preciznost: ± 1 nm,
- automatska kalibracija talasnih dužina,
- automatsko ili manuelno čuvanje talasnih dužina,
- brzina skeniranja od 100 do 4500 nm/min, u zavisnosti od odabrane rezolucije,
- rezolucija talasnih dužina: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 nm.

PRIMERI IZ RADA LABORATORIJE

Laboratorija je imala značajan broj merenja i provedenih optičkih karakterizacija LED semaforских uređaja za potrebe proizvođača kao i tumačenja usklađenosti dobijenih rezultata sa odgovarajućim standardima. Takođe su vršena merenja i značajnog broja pojedinih LED svetiljki. U tim ispitivanjima pretežno se merilo:

- jačina svetlosti,
- distribucija jačine svetlosti,
- uniformnost jačine osvetljenja jedinice površine,
- maksimalni fantomni signal,
- boja signalnog svetla,
- izračunavanje hromatskih koordinate,
- spektralna raspodela snage zračenja po talasnim dužinama,
- transparentija,
- polarni dijagram,
- određivanje dominantne talasne dužine
- grafičko prikazivanje u standardnom CIE hromatskom dijagramu

U Tabeli 1. dat je primer izračunavanja hromatskih koordinata za jedan konkretan crveni LED izvor svetlosti dok je na Slici 1. taj rezultat i grafički i prestavljen u CIE hromatskom dijagramu. Na ostalim slikama prikazani su neki konkretni rezultati iz aktivnosti Laboratorije.

Tabela 1.

(λ) [nm]	$I_0(\lambda)$	$X(\lambda)$	$Y(\lambda)$	$Z(\lambda)$	$I_0(\lambda)X(\lambda)$	$I_0(\lambda)Y(\lambda)$	$I_0(\lambda)Z(\lambda)$
380	2.0000	0.0002	0.0000	0.0007	0.0004	0.0000	0.0014
390	0.0000	0.0024	0.0003	0.0105	0.0000	0.0000	0.0000
400	1.0000	0.0190	0.0020	0.0860	0.0190	0.0020	0.0860
410	3.0000	0.0847	0.0088	0.3894	0.2541	0.0264	1.1682
420	2.0000	0.2045	0.0214	0.9725	0.4090	0.0428	1.9450
430	4.0000	0.3147	0.0387	1.5535	1.2588	0.1548	6.2140
440	3.0000	0.3837	0.0621	1.9673	1.1511	0.1863	5.9019
450	3.0000	0.3707	0.0895	1.9948	1.1121	0.2685	5.9844
460	3.0000	0.3023	0.1282	1.7454	0.9069	0.3846	5.2362

470	1.0000	0.1956	0.1852	1.3176	0.1956	0.1852	1.3176
480	5.0000	0.0805	0.2536	0.7721	0.4025	1.2680	3.8605
490	2.0000	0.0162	0.3391	0.4153	0.0324	0.6782	0.8306
500	1.0000	0.0038	0.4608	0.2185	0.0038	0.4608	0.2185
510	3.0000	0.0375	0.6067	0.1120	0.1125	1.8201	0.3360
520	4.0000	0.1177	0.7618	0.0607	0.4708	3.0472	0.2428
530	1.0000	0.2365	0.8752	0.0305	0.2365	0.8752	0.0305
540	1.0000	0.3768	0.9620	0.0137	0.3768	0.9620	0.0137
550	8.0000	0.5298	0.9918	0.0040	4.2384	7.9344	0.0320
560	4.0000	0.7052	0.9973	0.0000	2.8208	3.9892	0.0000
570	8.0000	0.8787	0.9556	0.0000	7.0296	7.6448	0.0000
580	10.0000	1.0142	0.8689	0.0000	10.1420	8.6890	0.0000
590	36.0000	1.1185	0.7774	0.0000	40.2660	27.9864	0.0000
600	106.0000	1.1240	0.6583	0.0000	119.1440	69.7798	0.0000
610	295.0000	1.0305	0.5280	0.0000	303.9975	155.7600	0.0000
620	844.0000	0.8563	0.3981	0.0000	722.7172	335.9964	0.0000
630	2359.0000	0.6475	0.2835	0.0000	1527.4525	668.7765	0.0000
640	2917.0000	0.4316	0.1798	0.0000	1258.9772	524.4766	0.0000
650	505.0000	0.2683	0.1076	0.0000	135.4915	54.3380	0.0000
660	77.0000	0.1526	0.0603	0.0000	11.7502	4.6431	0.0000
670	19.0000	0.0813	0.0318	0.0000	1.5447	0.6042	0.0000
680	7.0000	0.0409	0.0159	0.0000	0.2863	0.1113	0.0000
690	2.0000	0.0199	0.0077	0.0000	0.0398	0.0154	0.0000
700	1.0000	0.0096	0.0037	0.0000	0.0096	0.0037	0.0000
710	3.0000	0.0046	0.0018	0.0000	0.0138	0.0054	0.0000
720	2.0000	0.0022	0.0008	0.0000	0.0044	0.0016	0.0000
730	3.0000	0.0010	0.0004	0.0000	0.0030	0.0012	0.0000
740	3.0000	0.0005	0.0002	0.0000	0.0015	0.0006	0.0000
750	3.0000	0.0003	0.0001	0.0000	0.0009	0.0003	0.0000
760	1.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
770	1.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
780	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda); \sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda); \sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)$					4152.873	1881.120	33.4193
$\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)$					6067.4130		

$$X = \frac{\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda)}{\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda)}{\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)} \quad (2)$$

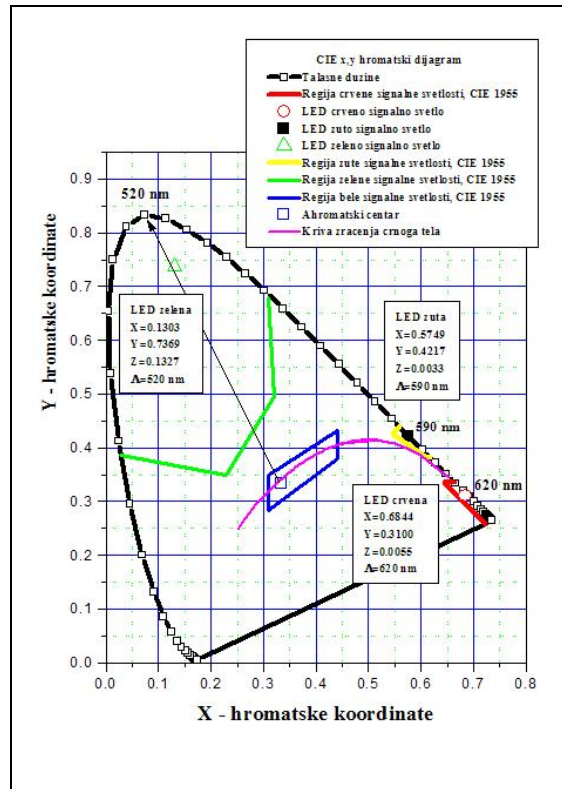
$$Z = \frac{\sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)}{\sum I_0(\Lambda) X(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Y(\Lambda) + \sum I_0(\Lambda) Z(\Lambda)} \quad (3)$$

Zamenom izračunatih vrednosti u relacije (1), (2) i (3) respektivno, dobijaju se vrednosti hromatskih koordinata za crvenu boju:

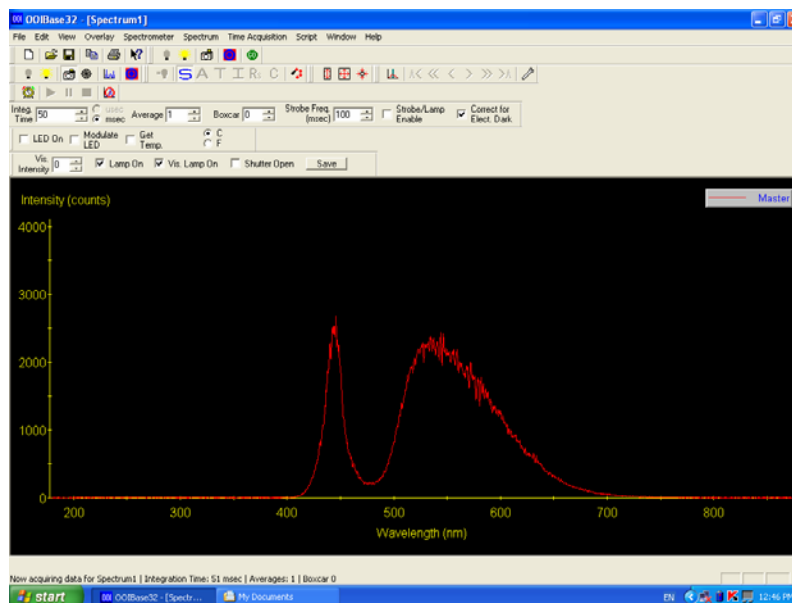
$$X = 0.6844$$

$$Y = 0.3100$$

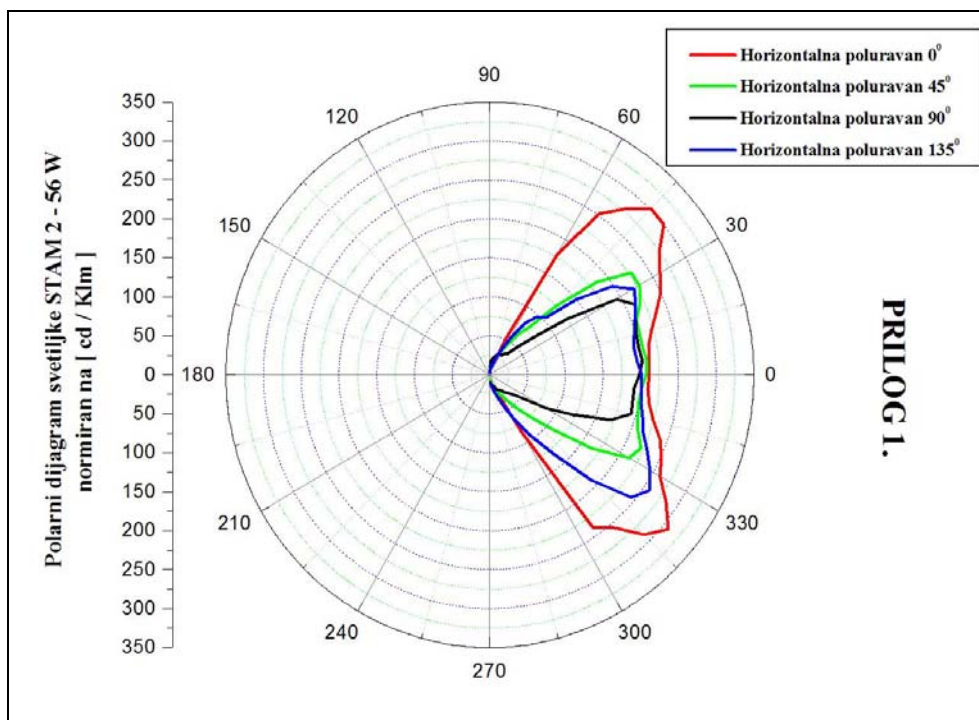
$$Z = 0.0055$$



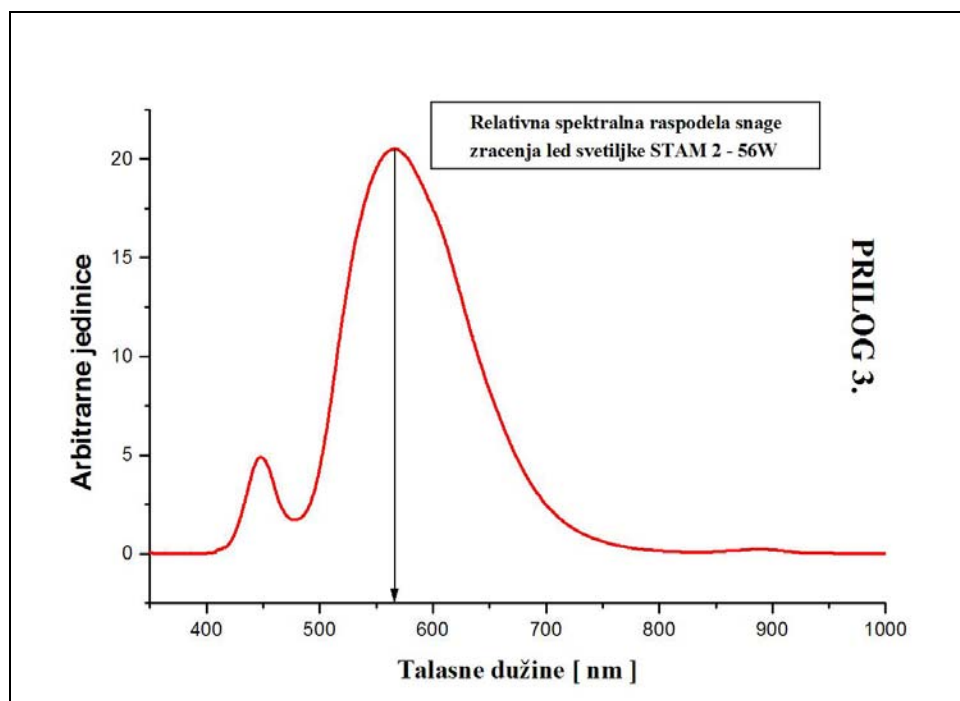
Slika1. Prestavljanje dobijenih (merjenih, izračunatih) hromatskih koordinata boja u CIE hromatskom dijagramu



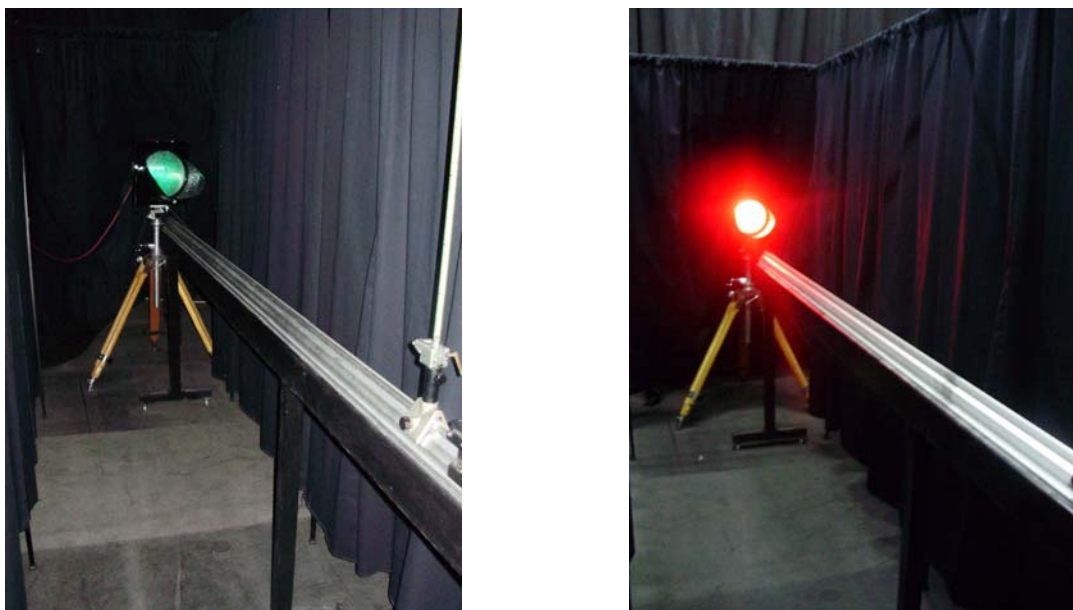
Slika 2. Slika monitora prilikom snimanja spektralne raspodele LED izvora svetlosti



Slika 3. Polarni dijagram snimane LED svetiljke



Slika 4. Relativna spektralna raspodela snage zračenja snimane LED svetiljke



Slika 5. Detalj iz optičke laboratorije prilikom snimanja prostorne distribucije jačine svetlosti

UMESTO ZAKLJUČKA (Aktuelna pitanja):

Radi postizanja energetske efikasnosti u oblasti osvetljenja, polaže se danas naročita pažnja inicijativama za čuvanje energije na međunarodnom planu. Iz tog razloga nacionalni i regionalni programi čuvanja energije se zasnivaju na efikasnosti i kvalitetu osvetljenja. Nezamenljiva dnevna svetlost je orijentir u zahtevu za postizanje bezbednih uslova rada. Iz tog razloga razmatraju se uticaji cene instalacije veštačkog osvetljenja na efikasnost osvetljenja i bezbednos, kao i na očuvanje okoline i potsticaj da veštačko osvetljenje zadovolji neke minimume kvaliteta u slučajevima kad nema dovoljno ili nema uopšte dnevnog osvetljenja.

Kada se realizuje električna instalacija osvetljenja, može se zaključiti da projektanti nemaju nimalo lak zadatak jer je imperativ zahtev da budu zadovoljeni svi parametri koji karakterizuju kvalitet osvetljenja.

Ukoliko na primer, pri projektovanju odabiramo izvore svetlosti "SSL i LED" fotometrije, kolorometriju i raspoznavanje boja, primena obuhvata i upravljanje svetlošću, i zagađivanje (okoline) svetlošću. Uz sve to bela boja svetlosti odgovara dnevnoj svetlosti (žutoj) i pri njoj danju vidimo. Međutim, godine utiču na osetljivost oka i preciznost viđenja kod starijih, te za vizuelno opažanje zahtev mora biti dobro postavljen kroz projekat. Najnovija tehnologija osvetljenja danas nam omogućava da čuvamo energiju bez štetnosti po dobro osvetljenje. Preporuke sa međunarodne konferencije održane u Beču 2010 "**Kvalitet osvetljenja i energetska efikasnost**" u skladu sa Međunarodnom agencijom za energiju (*International Energy Agency-IEA*) imaju za cilj smanjenje energije namenjene osvetljenju za koju se računa da iznosi **19%** od svetske potrošnje.

Usklađivanje se postiže izborom efikasnijih svetiljki. Poznato je da pre izbora opreme za osvetljenje treba je i ispitati, analizirati i upoznati, a na tržištu i prepoznati.

LITERATURA

- [1] P. Milutinović, M. Popović, S. Janković
Automatizacija metrološke laboratorije za snimanje svetlosnih karakteristika rasvetnih tela, "Osvetljenje 1997", Vrnjačka banja, 1997
- [2] P. Milutinović, S. Janković, M. Popović
Svetlosne karakteristike naših svetiljki, "Osvetljenje 1999", Beograd, 1999.
- [3] D. Dramlić, P. Milutinović, Z. Velikić, M. Popović, S. Janković, S. Dramlić
Koncepcija razvoja laboratorije za optičku metrologiju, "Osvetljenje 2006", Prolom Banja, 2006.
- [4] D. Dramlić, Z. Velikić, P. Milutinović, S. Dramlić
U Institutu za fiziku akreditovana laboratorija za etaloniranje luksmetara i luminansmetara, "Osvetljenje 2010", Divčibare, 2010.
- [5] Srpski standard SRPS N.AO.845:1995, Osvetljenje - Termini i definicije Zračenje - Veličine i jedinice, koji je identičan međunarodnom rečniku osvetljenja CIE (Commission Internationale d`Eclairage), publikacija CIE **17.4:1987** (International Lighting Vocabulary).