

Kompiuterizuota puslaidininkinė kvadrichromatinė bendrojo apšvietimo lempa

A. Žukauskas, K. Breivė, Z. Bliznikas, G. Kurilčik, A. Novičkovas

Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, Vilniaus universitetas,

Saulėtekio al. 9, LT-01513 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2336015, el. p. zenius.bliznikas@ff.vu.lt

R. Vaicekuskas

Matematikos ir informatikos fakultetas, Vilniaus universitetas,

Naugarduko g. 24, LT-03225 Vilnius, Lietuva

R. Gaška, M. S. Shur

Sensor Electronic Technology, Inc.,

1195 Atlas Road, Columbia, SC 29209, USA

Įvadas

Apie 20 procentų pasaulyje pagamintos elektros energijos sunaudojama apšvietimui, bet tik nedidelė šio milžiniško energijos kiekio dalis paverčiama šviesa. Tai paaiškinama tuo, kad plačiausiai šiuo metu naudojamų šaltinių šviesinis našumas yra mažas. Šviesinis našumas (*Luminous efficiency*) η_v išreiškia šaltinio gebėjimą maitinimui sunaudotą galią P paversti regimosios šviesos srautu Φ_v (lm/W):

$$\eta_v = \Phi_v / P. \quad (1)$$

Sprendžiant šią problemą ieškoma naujų apšvietimo technologijų, kurios užtikrintų didesnę šaltinių šviesinį našumą ir kartu efektyviau būtų panaudojama elektros energija. Viena perspektyviausių apšvietimo technologijų – šviesos šaltinių sudarymas iš didelio skaisčio šviesos diodų – puslaidininkinių spinduolių (PS). Palyginimui 1 lentelėje pateikti svarbiausi šiuo metu plačiausiai naudojamų šviesos šaltinių techniniai duomenys [1, 2, 3].

1 lentelė. Šviesos šaltinių techniniai duomenys

Šaltinio tipas, vartojama galia, W	Φ_v (lm)	η_v (lm/W)	Darbo trukmė (tūkst. h)
Kaitrinė lempa, 60	865	14,4	1
Halogeninė lempa, 50	590	11,8	2
Fluorescencinė trifosforo lempa, 32	2850	84	24
Kompaktinė fluorescencinė lempa, 15	900	51	10
Metalo halidų lempa, 400	36000	60	20
Indukcinė lempa, 55	3500	64	100
Didelio slėgio Na lempa, 250	28000	108	24
Oranžinis PS, 1	66	63	100
Žalias PS, 1	30	25	100
Baltosios šviesos PS, 5	120	30	100

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad PS parametrai yra vieni iš geriausių. Reikia pasakyti, kad rezervų mažinti tradicinių šviesos šaltinių kainą ir didinti jų našumą jau nėra. Tuo tarpu PS našumas nuolat auga. Jų spindulinis našumas (*Radiant efficiency*), išreiškiantis šaltinio gebėjimą maitinimui sunaudotą galią P paversti spinduliuotės galia Φ_e , gali siekti fizikinę ribą, o tai atitinka apie 300 lm/W baltosios šviesos šviesinį našumą. Plėtojantis masinei gamybai PS sukuriama šviesos srauto vieneto kaina nuolat mažėja.

Optoelektronikos rinkoje jau yra visų regimosios šviesos sričių didelio skaisčio AlGaAs, AlGaInP ir AlInGaN PS, spinduliuojančių iki 100 lm iš lusto. Jie taikomi daugelyje sričių: gaminant signalinius ženklus, spalvotuosius lauko vaizduoklius, optines matavimo priemones ir t. t.

Pastaruoju metu didelio skaisčio PS vis plačiau skverbiasi į bendrąją apšvietimą (*General lighting*). Be jau minėtų pranašumų, tokiam tikslui skirti baltosios šviesos šaltiniai turi pasižymėti gera spalvine atgava (*Color rendering*) ir stabiliomis, plačiame diapazone reguliuojamomis srauto stiprio ir spalvinės temperatūros vertėmis.

Darbo tikslas

Šiuo metu žinomos kelios baltosios šviesos sukūrimo su šviesos diodais technologijos pasižymi skirtingais pranašumais, tačiau turi panašių trūkumų, kurie išryškėja keičiant PS temperatūrai bei senėjant jų sudedamųjų dalių medžiagoms. Šie reiškiniai sukelia neleistinus spalvinės temperatūros ir srauto stiprio pokyčius, kuriuos būtina panaikinti [4]. Tai galima padaryti, kai šviesos šaltinis susideda iš kelių savarankiškų pirminių vienspalvių PS grupių, o baltoji šviesa gaunama atitinkamomis proporcijomis maišant jų srautus. Didžiausias taip sudaryto šaltinio pranašumas – galimybė, keičiant pirminių vienspalvių PS grupių srautus, valdyti bendrojo šviesos srauto stiprį ir spalvinę temperatūrą.

Šio darbo tikslas – sukurti kompiuterizuotą valdomos spalvinės temperatūros ir valdomo srauto puslaidininkinę didelės galios bendrojo apšvietimo lempą.

Spinduolių parinkimas

Sudarius šviesos šaltinį iš n pirminių vienspalvių PS grupių su skirtingomis srauto galios spektrinio pasiskirstymo (GSP) (*Spectral power distribution, SPD*) funkcijomis $\Phi_i(\lambda)$, baltosios šviesos GSP funkcija $\Phi(\lambda)$ formuojama sudedant minėtų grupių reguliuojamos trukmės ir pastovios amplitudės impulsinius srautus, t. y.

$$\Phi(\lambda) = k \sum_{i=1}^n q_i \Phi_i(\lambda); \quad (2)$$

čia k – šviesio reguliavimo koeficientas, $0 \leq k \leq 1$, $q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$ – impulsų pločio koeficientai (pvz., i – tosios grupės srautui $q_i = t_i/T_K$; čia t_i – i -tojo srauto impulso trukmė, T_K – impulsų periodas). Suprantama, kad impulsų pasikartojimo dažnis yra pakankamai didelis, kad srauto periodas T_K būtų daug mažesnis už regos inercijos trukmę.

Taip sudaryto šaltinio konkrečias spalvinės temperatūros T_C , bendrojo spalvinės atgavos rodiklio R_a ir šviesos veiksmingumo K vertes lemia skirtingų spalvų PS grupių skaičius n , jų GSP funkcijos $\Phi_i(\lambda)$ ir atskiros grupės srauto dalies q_i santykinis dydis bendrajame sraute.

Siekiant iš spalvotų PS sudaryti baltosios šviesos šaltinį su optimaliu bendrosios spalvinės atgavos rodiklio R_a ir šviesos veiksmingumo K deriniu, pagal [1, 5] aprašytą metodiką buvo atlikti teoriniai dydžių tarpusavio priklausomybės skaičiavimai, kai šaltinis sudaromas iš trijų, keturių ir penkių PS su skirtingomis GSP funkcijomis. Skaičiavimų rezultatai pateikti 2 lentelėje. Čia grupių PS spalvos pažymėtos raidėmis: B – mėlyna, C – žaliai mėlyna (ciano), G – žalia, YG – geltonai žalia, R – raudona.

2 lentelė. Bendrojo spalvinės atgavos rodiklio R_a ir šviesinio veiksmingumo K priklausomybė nuo pirminių PS skaičiaus grupių skaičiaus n ir jų GSP funkcijų smailių bangos ilgių λ_p , kai šaltinio spalvinė temperatūra $T_C = 4870$ K

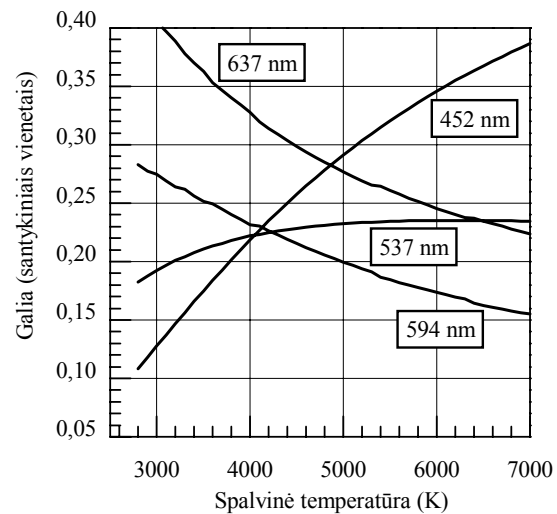
n	R_a	K (lm/W)	GSP funkcijos smailės bangos ilgis λ_p (nm)				
			B	C	G	YG	R
3	85	366	459	-	537	-	604
4	98	332	454	509	-	561	619
5	99	324	448	493	531	572	623

Didžiausia rodiklio R_a vertė pasiekama, kai šaltinis sudaromas iš penkių pirminių spinduolių ($R_a = 99$, o $K = 324$ lm/W). Naudojant keturias skirtingų PS grupes pasiekama beveik ta pati $R_a = 98$ vertė, esant didesnei $K = 332$ lm/W vertei. Tuo tarpu trispalvės lempos didžiausia R_a vertė tesiekia 85 ir todėl bendrajam apšvietimui ji naudojama ribotai. Taigi priimtinos dydžių R_a ir K vertės yra pasiekiamos kvadrachromatiniame šaltinyje, t. y. šaltinyje, kuris sudarytas iš keturių pirminių PS grupių, kurių GSP funkcijų smailių bangos ilgiai yra 448 nm, 493 nm, 572 nm ir 623 nm.

2 lentelėje pateikti rezultatai kvadrachromatinei ($n = 4$) ir kvintichromatinei ($n = 5$) lempoms kol kas negali būti praktiškai panaudoti, nes rinkoje nėra našių geltonai

žalios spektro srities PS, o kitų spektro sričių spinduolių GSP smailės bangos ilgių pasirinkimas yra ribotas. Todėl projektuojamas baltosios šviesos šaltinis buvo optimizuotas panaudojant rinkoje esančius PS. Modeliavimo sistemoje buvo panaudoti didelės galios LUXEON™ LXHL serijos PS, kurie yra gaminami septyniems skirtingiems bangos ilgiams [6]. Nustatyta, kad šiuo atveju didžiausia rodiklio R_a vertė pasiekama, kai kvadrachromatinis šaltinis sudarytas iš raudonos (R) spalvos MD1D ($\lambda_p = 637$ nm), geltonos (Y) spalvos ML1D ($\lambda_p = 594$ nm), žalios (G) spalvos LM5C ($\lambda_p = 537$ nm) ir mėlynos (B) spalvos LR5C ($\lambda_p = 452$ nm) spinduolių.

Kvadrachromatinio šaltinio spalvinė temperatūra T_C priklauso nuo vienspalvių PS santykinės srauto vertės bendrajame sraute. Apskaičiuotosios atskirų PS grupių srauto galių priklausomybės nuo spalvinės temperatūros pateiktos 1 pav.



1 pav. Pirminių spinduolių srautų galių priklausomybės nuo šaltinio spalvinės temperatūros grafikai. Prie grafikų nurodyti PS grupių GSP funkcijų smailių bangos ilgiai

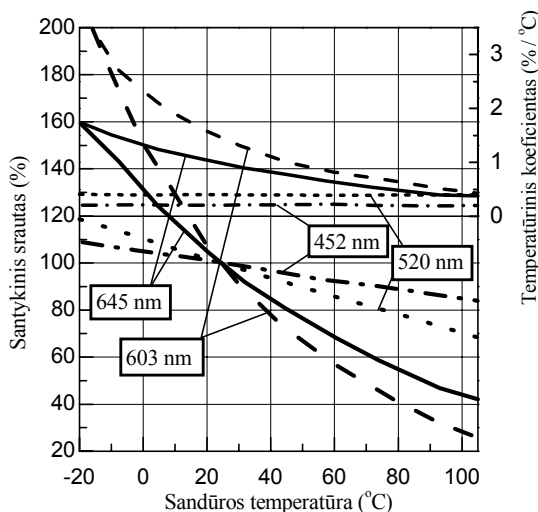
Pateikti grafikai rodo, kokius santykinis srautus priklausomai nuo reikiamos spalvinės temperatūros turi sukurti pirminių PS grupės. Naudojantis šiais rezultatais, apskaičiuojamas spalvotų PS skaičius grupėje ir nustatomi jų srautų valdymo impulsų pločio koeficientai q_1, q_2, q_3 ir q_4 .

Srauto parametrų stabilumas

Puslaidininkinio šviesos šaltinio atskirų PS grupių GSP funkcijos eksploatacijos metu skirtingai kinta keičiantis sandūros temperatūrai ir senėjant juos sudarančioms medžiagoms. Dėl šių reiškinų keičiasi srauto stipris, atsiranda spalvinės temperatūros ir spalvinių koordinatinių poslinkių. Bendrojo apšvietimo atveju dėl to keičiasi apšvieta ir iškraipomos apšviečiamų objektų spalvos.

Lempas spalvinių koordinatinių temperatūriniam dreiviui įvertinti buvo panaudoti gamintojo pateikti PS srautų ir GPS funkcijų smailių bangos ilgių priklausomybės nuo temperatūros duomenys. Tipinės PS srautų priklausomybės

nuo sandūros temperatūros pateiktos 2 pav. (apatinės kreivės) [6]. Matyti, kad temperatūros kitimui jautriausi yra geltoni ($\lambda_p=594$ nm) ML1D spindulių. Sandūros temperatūrai pasiekus $t=60$ °C, jų srautas sudaro tik 56 % srauto, kurį jie spinduliuoja, kai sandūros temperatūra yra $t=25$ °C. Mažiausiai nuo temperatūros priklauso mėlynų ($\lambda_p=452$ nm) LR5C spindulių srautas. Nurodytomis sąlygomis jų srautas sumažėja tik 3 %. Viršutinės kreivės 2 pav. vaizduoja mūsų apskaičiuotus srautų temperatūrinius koeficientus.



2 pav. Spindulių santykinio srauto (apatinės kreivės) ir jų temperatūrinių koeficientų absoliučių verčių (viršutinės kreivės) priklausomybės nuo sandūros temperatūros grafikai. Prie grafikų nurodyti PS GSP funkcijų smailių bangos ilgiai

Gamintojo pateiktos GSP funkcijos smailės bangos ilgio λ_p temperatūrinio koeficiento vertės yra didžiausios geltoniems PS (0,09 nm/K), o mažiausia – žaliems ir mėlyniams PS (0,04 nm/K).

Vertinant šaltinio spalvos ir spalvinės temperatūros priklausomybę nuo sandūros temperatūros, esant PS sandūros temperatūrai $t=25$ °C, o spalvinei temperatūrai $T_C=5800$ K, buvo apskaičiuotos šaltinio spalvos koordinatės. Po to, atsižvelgus į srauto ir λ_p priklausomybę nuo sandūros temperatūros, buvo įvertintos šaltinio spalvinės koordinatės ir spalvinė temperatūra, kai sandūros temperatūra $t=60$ °C.

Kvadrachromatinio šaltinio atveju apskaičiuoti spalvinės temperatūros ir spalvinių koordinatėms poslinkio priklausomybės nuo temperatūros rezultatai pateikti 3 lentelėje. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad dėl GSP funkcijų smailių bangų ilgių pokyčių spalvinė temperatūra T_C keičiasi mažiau nei 1 %, o spalvinių koordinatėms poslinkiai $\Delta uv=0,00054$ yra nedideli. Bendrojo apšvietimo atveju tai akimi nepastebimi pokyčiai.

Tuo tarpu sumažėjus PS srauto galiai, kai sandūros temperatūra $t=60$ °C, spalvinė temperatūra keičiasi beveik 55 %, o spalvinių koordinatėms poslinkiai siekia 0,0274.

Bendrojo apšvietimo atveju tai neleistini pokyčiai, kurie sukelia neleistinus apšvietos iškraipymus.

3 lentelė. Spalvinės temperatūros T_C ir spalvinių uv koordinatėms poslinkio Δuv vertės pasikeitus sandūros temperatūrai t nuo 25 °C iki 60 °C

	T_C (K)	Δuv^*
Pradinės parametrų vertės, $t=25$	5800	0
Parametrų vertės, kai vertinamas tik srauto stiprio sumažėjimas, $t=60$ °C	8974	0,0274
Parametrų vertės, kai vertinamas tik λ_p poslinkis, $t=60$ °C	5752	0,00054
Parametrų vertės, kai vertinamas srauto stiprio sumažėjimas ir λ_p poslinkis, $t=60$ °C	8842	0,0275

*Poslinkiai Δuv apskaičiuoti naudojantis 1960 m. TAK lygiakonstraste Luv sistema

Taigi, siekiant eksploatacijos metu turėti pastovaus srauto ir pastovios spalvinės temperatūros šaltinį, pakanka valdyti tik PS srautų stiprius.

Toliau aprašoma baltosios šviesos keičiamos spalvinės temperatūros ir keičiamo srauto stiprio kvadrachromatinė lempa, kurios GSP funkcija yra formuojama adityviai maišant anksčiau minėtų spalvų PS grupių impulsinius srautus. Lempos parametrai yra stabilizuojami skaitmeniniu grįžtamoju ryšiu [4] palaikant pastovius reikiamo stiprio atskirų PS grupių srautus.

Lempos konstrukcija ir elektronika

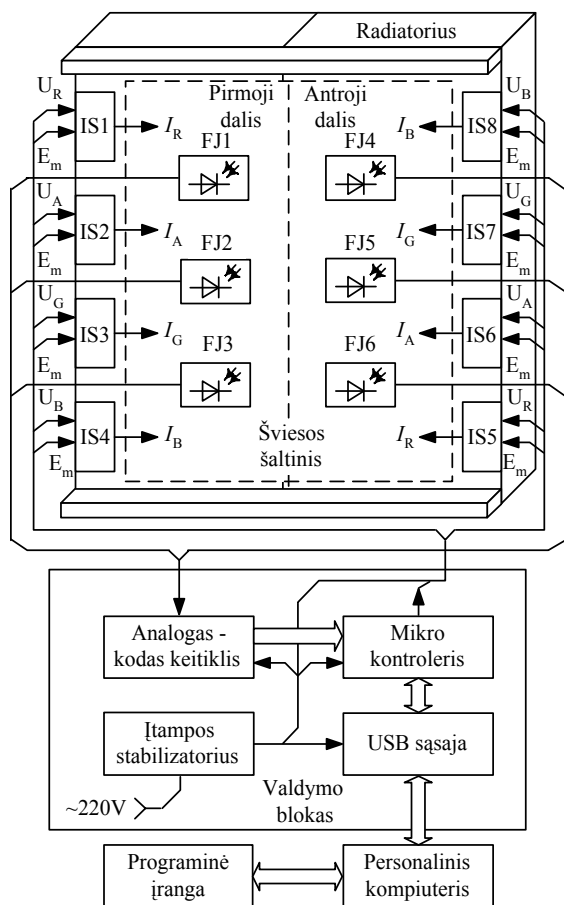
Lempos sandaros schema parodyta 3 pav. Lempą sudaro šviesos šaltinis ir valdymo blokas.

Šaltinio paskirtis – generuoti duotos spalvinės temperatūros ir duoto stiprio impulsinės šviesos srautą. Valdymo bloko paskirtis – sukurti šviesos šaltinio valdymo elektrinius signalus, kontroliuoti individualius PS grupių srautus ir palaikyti juos pastovius.

Šaltinį sudaro keturių anksčiau minėtų spalvų didelės galios LUXEON™ LXHL serijos PS grupės. Siekiant tolygiau maišyti spalvas, jos išskirstytos į šešis vienodus klasterius, kurie sumontuoti ant (100x40) cm² ploto radiatoriaus. Kiekvieną klasterį sudaro du mėlynos spalvos, du žalios spalvos, dešimt geltonos spalvos ir du raudonos spalvos PS. Kiekviename klasteryje sumontuoti Burr Brown OPT101 tipo fototjutikliai FJ1, FJ2, ..., FJ6, kurie matuoja PS srautą. Srauto impulsų pasikartojimo dažnis yra 300 Hz.

Vienspalvių šviesos diodų grupės yra maitinamos iš atskirų srovės valdiklių IS1÷IS4 ir IS6÷IS8, kurie sumontuoti radiatorių kraštuose. Bendra didžiausioji visų keturių PS grupių vartojama srovė yra 2 ($I_R+I_A+I_G+I_B$) = 9,8 A.

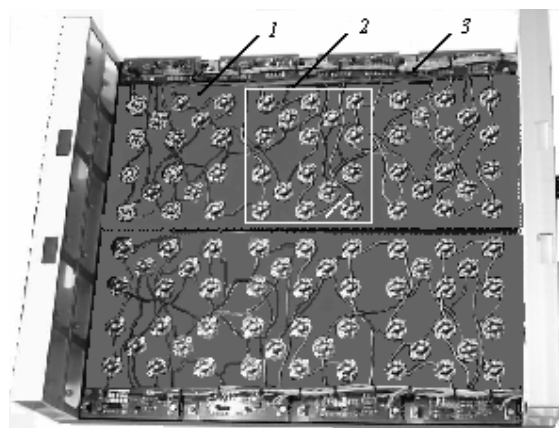
Valdymo bloką sudaro mikrokontroleris, analoginis kodinis keitiklis ir USB sąsaja. Mikrokontroleris ir analoginis kodinis keitiklis sukurtas panaudojus Analog Devices ADuC812 tipo mikroprocesorinį maketavimo rinkinį. Srauto parametrai valdomi ir stabilizuojami 10 skilčių skaitmeninės elektronikos grandinėmis. Valdymo blokas sujungtas su kompiuteriu per DevaSys USB I2CIO tipo universalios nuoseklios sąsajos modulį.



3 pav. Lempos sandaros schema: E_m – srovės valdiklių maitinimo įtampa; U_R , U_A , U_G ir U_B bei I_R , I_A , I_G ir I_B – atitinkamai vienspalvių PS grupių valdymo impulsai bei PS grupėms tiekiamos srovės

Valdymo bloke taip pat yra sumontuoti lempos elektronikos grandinių ir PS maitinimo įtampas stabilizatoriai.

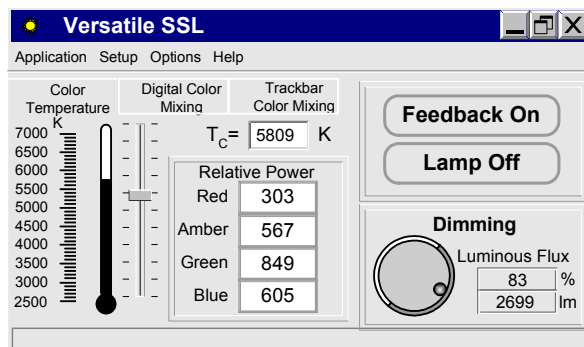
PS ir srovės valdiklių išdėstymo vaizdas pateiktas 4 pav.



4 pav. Šviesos diodų ir srovės valdiklių išdėstymo ant radiatoriaus vaizdas: 1 – radiatorius; 2 – atskiras šviesos diodų klasteris; 3 – srovės valdiklis

Veikimo aprašymas

Šviesos šaltinio srauto stipris ir spalvinė temperatūra nustatomi, kontroliuojami ir laikui bėgant palaikomi pastovūs kompiuteriu, kuriame Windows terpėje veikia specialiai šiam tikslui Delphi kalba sukurta programa. Programos vartotojo grafinė sąsaja pavaizduota 5 pav.



5 pav. Programos vartotojo grafinės sąsajos langas

Programos vartotojo lange šaltinio spalvinė temperatūra ir srauto stipris nustatomi reguliatoriais „Color Temperature“ ir „Dimming“. Langeliuose „Relative Power“ parodomi nustatyta temperatūrą T_C atitinkantys santykiniai PS grupių srautai. Langelyje „Dimming“ parodomas nustatytas šviesos srautas ir jo vertė procentais nuo didžiausios pasiekiamos 3000 lm vertės. Taip pat yra galimybė formuoti šaltinio šviesos srautą individualiai keičiant ir atskirų PS grupių „Red“, „Amber“, „Green“ ir „Blue“ santykinės srautų galias.

Nustačius reikiamą šaltinio spalvinę temperatūrą ir šviesos srautą, formuojamos vienspalvių PS grupių srautų impulsų pločio koeficientų q_1 , q_2 , q_3 ir q_4 (1 pav.) bei šviesio koeficiento k vertės, kurios per nuoseklią sąsają perduodamos į valdymo bloko mikrokontrolerį. Mikrokontroleryje pagal šias vertes formuojamos periodinės atskirų PS grupių valdymo impulsų sekos, kurios, patekusios į atitinkamus srovės valdiklius, nustato srovės impulsų I_R , I_A , I_G ir I_B trukmes.

Tas pats mikrokontroleris yra panaudotas ir skaitmeninio grįžtamojo ryšio grandinėje, kuri stabilizuoja šviesos srauto parametrus. Tai daroma taip. Kontrolinio kadro metu, kuris pasirinktais laiko intervalais (nuo 1 s iki 1 h) įterpiamas į valdymo impulsų generavimo ciklą, 20 μ s laikui paeiliui uždegamos visos vienspalvių PS grupės. Kiekvienos spalvos PS degimo metu fotojutikliais FJ1, FJ2, ..., FJ6 išmatuojamas vidutinis tos spalvos sando šviesos srautas. Po to tam pačiam laikui yra kartu uždegami dviejų pasirinktų spalvų PS ir jų degimo metu išmatuojamas suminis abiejų sandų šviesos srautas.

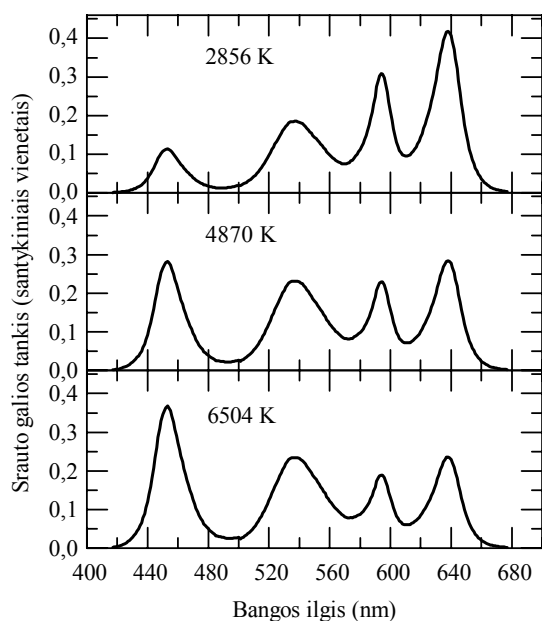
Šitai išmatavus šviesos srautus, skaičiavimais pašalinama foninė apšvieta ir apskaičiuojami faktiniai atskirų spalvų PS grupių srautai. Faktinės srautų vertės palyginamos su lempos kalibravimo metu programoje įrašytomis vertėmis. Atsiradę PS srautų pokyčiai koreguojami keičiant srautų impulsų pločio koeficientų q_1 , q_2 , q_3 ir q_4 vertes, kurios nustato srovės impulsų I_R , I_A , I_G ir I_B trukmes.

Bandytųjų metu nustatyta, kad nepriklausomai nuo pirminių PS grupių srautų pokyčių, pasirinkta spalvinė temperatūra ir šviesos srautas ilgalaikės eksploatacijos metu yra išlaikomi pastovi $\pm 5\%$ paklaida. Toks nedidelis ir lėtas šviesos srauto parametrų nestabilumas bendrajam apšvietimui yra priimtinas.

Pagrindinės lempos charakteristikos

Šiame skyrelyje pateikiamos kai kurios pagrindinės apskaičiuotos arba išmatuotos kvadrichromatinės lempos charakteristikos.

Remiantis apskaičiuotomis spinduolių srautų galių priklausomybėmis nuo spalvinės temperatūros T_C ir pirminių PS GSP funkcijomis, spalvinių temperatūrų intervale nuo 2856 K iki 6504 K yra apskaičiuotos šaltinio srauto GPS funkcijos. GPS funkcijos, kai šaltinio spalvinė temperatūra yra 2856 K, 4870 K ir 6504 K, pavaizduotos 6 pav.



6 pav. Kvadrichromatinės lempos šaltinio srauto galios tankio spektrinės pasiskirstymo funkcijos, esant skirtingoms spalvinėms temperatūroms

Šaltinio šviesos kokybę įvertinta keturiolikos standartinių spalvų, kurios naudojamos TAK 1995 m. rekomenduojamoje metodikoje, atgava. Apskaičiuotos keturiolikos specialiųjų spalvinės atgavos rodiklių R vertės pateiktos 4 lentelėje. Lentelėje matyti, kad daugumos specialiųjų rodiklių vertės viršija 80 taškų. Tai liudija, kad daugumos spalvų atgava yra labai kokybiška.

Kai kurioms spalvoms rodiklių vertės yra mažesnės dėl to, kad parinkti pirminių PS GSP funkcijų smailių bangos ilgiai nėra optimalūs. Pagrindinis pagamintos lempos GSP funkcijos skirtumas nuo optimaliojo varianto yra tas, kad žalių ir geltonų PS GSP funkcijų smailių bangos ilgiai yra paslinkti ilgujų bangų link. Tai lemia žemesnės specialiųjų spalvinės atgavos rodiklių vertes ryškiai geltonai žaliai ir ryškiai geltonai spalvoms. Dėl šio poslinkio lempos GSP funkcijoje susidariusi mažesnio srauto stiprio sritis (ties maždaug 500 nm bangos ilgiu) ir lemia mažesnes specialiųjų rodiklių vertes ryškiai mėlynai spalvai.

Ypač tai pastebima esant aukštesnėms spalvinėms temperatūroms, kai trumpabangės spektro dalies indėlis yra didesnis.

4 lentelė. Specialiojo spalvinės atgavos rodiklio R vertės skirtingo tono ir sodrio spalvoms, esant skirtingai šaltinio spalvinei temperatūrai

Spalva	Rodiklis R		
	$T_C = 2856\text{K}$	$T_C = 4870\text{K}$	$T_C = 6504\text{K}$
Šviesiai pilkšvai raudona (Dark grayish red)	99,7	96,3	95,9
Tamsiai pilkšvai geltona (Dark grayish yellow)	94,3	87,7	86,2
Ryškiai geltonai žalia (Strong yellow green)	74,0	64,3	60,6
Gelsvai žalia (Moderate yellowish green)	90,2	87,7	87,7
Šviesiai melsvai žalia (Light bluish green)	96,0	90,0	88,7
Šviesiai mėlyna (Light blue)	89,4	77,0	74,1
Šviesiai violetinė (Light violet)	93,1	87,9	87,6
Šviesiai rausva purpurinė (Light reddish purple)	95,3	91,5	89,9
Ryškiai raudona (Strong red)	87,0	94,9	95,3
Ryškiai geltona (Strong yellow)	74,8	56,7	51,5
Ryškiai žalia (Strong green)	87,0	84,4	82,8
Ryškiai mėlyna (Strong blue)	60,0	42,4	37,1
Šviesiai gelsva rožinė (light yellowish pink)	98,6	95,3	94,4
Žalia alyvuogių (Moderate olive green)	82,4	77,5	75,6

Pirmų aštuonių specialiųjų spalvinės atgavos rodiklių vidurkis yra bendrasis spalvinės atgavos rodiklis R_a , kurio vertės yra pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. Bendrojo spalvinės atgavos rodiklio R_a vertės esant skirtingai šaltinio spalvinei temperatūrai T_C

Spalvinė temperatūra T_C (K)	Rodiklis R_a
2856	91,5
4780	85,3
6504	83,8

Tačiau iš 5 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad temperatūrų T_C diapazone nuo 2856 K iki 6504 K bendrasis spalvinės atgavos rodiklis R_a yra ne blogesnis už 83,8. Tai bendrajam apšvietimui priimtina spalvinė atgava, kuri pranoksta fluorescencinių trifosforo ir metalų halidų lempų spalvinę atgavą.

Išvados

Apibendrinus darbe pateiktus rezultatus, galima padaryti šias išvadas:

1. Atlikus teorinę šviesos šaltinio, sudaryto iš rinkoje esančių puslaidininkinių spinduolių derinių, analizę, nustatyta, kad, naudojant keturių skirtingų spalvų spinduolius, kurių GSP funkcijų smailių bangos ilgiai yra 637 nm, 594 nm, 537 nm ir 452 nm, galima sukurti pakankamai geros spalvinės atgavos $R_a > 83$ baltosios šviesos bendrojo apšvietimo šaltinį, kurio spalvinė temperatūra T_c gali būti keičiama nuo 2856 K iki 6504 K.

2. Naudojantis gautais rezultatais suprojektuota ir pagaminta kompiuterizuota puslaidininkinė kvadrachromatinė bendrojo apšvietimo lempa. Šaltinis sudarytas iš 72 vnt. 1 W ir 24 vnt. 5 W elektrinės galios LUXEON™ LXHL spinduolių. Didžiausias šaltinio šviesos srautas lygus 3000 lm.

3. Spalvinė temperatūra ir šviesos srautas nustatomi 10 skilčių elektronikos grandinėmis skaitmeniškai keičiant spinduolius maitinančios srovės impulsų, kurių pasikartojimo dažnis 300 Hz, trukmes. Šaltinyje panaudotas skaitmeninis grįžtamasis ryšys leidžia kompensuoti šviesos šaltinio srauto priklausomybę nuo temperatūros bei jo pokytį dėl senėjimo ir užtikrina stabilų šaltinio spalvinę temperatūrą ir šviesos srauto galią ne mažesne kaip $\pm 5\%$ paklaida.

Darbas atliktas remiant Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui (ES programos COST veikla Nr. 529 „Efektyvus apšvietimas 21-ajam amžiui“ ir programa MODELITA).

Literatūra

1. **Žukauskas A., Shur M. S., Gaska R.** Introduction to Solid State Lighting. Wiley, New York, 2002.– 220 p. ISBN 0471215740.
2. **Power light source.** Luxeon™ III Emitter. Technical Data-sheet DS45. <http://www.luxeon.com/pdfs/DS45.PDF>
3. **Power light source.** Luxeon™ V Emitter. Technical Data DS34. <http://www.luxeon.com/pdfs/protected/DS34.PDF>
4. **Žukauskas A., Vaicekuskas R., Ivanauskas F., Kurilčik G., Bliznikas, Z., Breivė K., Krupič, J., Novičkovas A., Vitta P., Navickas A., Rastauskas V., Shur M. S., Gaška R.** Quadrichromatic white solid-state lamp with digital feedback // Proc. of SPIE.– Bellingham, WA, 2004.– Vol. 5187.– P. 185–198.
5. **Žukauskas A., Breivė K., Bliznikas Z., Novičkovas A., Vitta P., Vaicekuskas R., Navickas A., Shur M. S., Gaška R.** Puslaidininkinė lempa šviesos terapijai // Elektronika ir elektrotechnika.– Kaunas: Technologija, 2003 – Nr.5(47).– P.38–47.
6. **Power light source.** Luxeon™ Star Technical Datasheet DS23. <http://www.luxeon.com/pdfs/protected/DS23.PDF>

Pateikta spaudai 2004 10 27

A. Žukauskas, K. Breivė, Z. Bliznikas, G. Kurilčik, A. Novičkovas, R. Vaicekuskas, R. Gaška, M. S. Shur. Kompiuterizuota puslaidininkinė kvadrachromatinė bendrojo apšvietimo lempa // Elektronika ir elektrotechnika.- Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(57). – P. 74 – 79.

Aprašyta kompiuterizuota puslaidininkinė kvadrachromatinė keičiamos spalvinės temperatūros ir keičiamo srauto stiprio bendrojo apšvietimo lempa. Parodyta, kad sudarius šviesos šaltinį iš LUXEON™ LXHL serijos spinduolių, kurių galios spektrinio pasiskirstymo funkcijų smailių bangų ilgiai yra lygūs 637 nm, 594 nm, 537 nm ir 452 nm, galima pasiekti aukštą bendrojo spalvinės atgavos rodiklio vertes ($R_a > 83$) spalvinių temperatūrų diapazone nuo 2856 K iki 6504 K. Pagaminta 3000 lm šviesos srauto lempa, kurios spalvinė temperatūra ir šviesos srautas nustatomi, kontroliuojami ir palaikomi pastovūs programiniu būdu 10 skilčių elektronikos grandinėmis reguliuojant spinduolius maitinančios srovės impulsų, kurių pasikartojimo dažnis 300 Hz, trukmes. Panaudotas skaitmeninis grįžtamasis ryšys leidžia kompensuoti individualių spinduolių srautų priklausomybę nuo temperatūros bei srautų pokytį dėl senėjimo ir užtikrina stabilias šių parametrų vertes ne mažesne kaip $\pm 5\%$ paklaida. Il. 6, bibl. 6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

A. Žukauskas, K. Breivė, Z. Bliznikas, G. Kurilčik, A. Novičkovas, R. Vaicekuskas, R. Gaška, M. S. Shur. Semiconductor Quadrichromatic Lamp for General Lighting // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 1(57). – P. 74–79.

A computer controlled 3000-lm quadrichromatic semiconductor lamp for general lighting with variable colour temperature and digital feedback is described. An optimal combination of colour rendering and luminous efficacy was found by selection of commercially available semiconductor emitters. LUXEON™ LXHL series emitters with the peak wavelengths of the spectral power distribution functions at 673 nm, 594 nm, 537 nm and 452 nm, respectively, were shown to provide appreciable values of the general colour rendering index ($R_a > 83$) in the range of colour temperatures from 2856 K to 6504 K. The colour temperature and luminous flux of the lamp is controlled by computer by setting the durations of the light flux pulses for each group of primary emitters by a 10-bit digital circuit at a constant 300 Hz frequency of the pulses. The lamp contains a digital feedback circuit for the compensation of optical power variations of the primary-color LEDs with temperature and aging. Il. 6, bibl.6 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

А. Жукаускас, К. Брейвэ, З. Близникас, Г. Курилчик, А. Новичковас, Р. Вайцекаускас, Р. Гашка, М. С Шур. Программируемая полупроводниковая квадрихроматическая лампа для общего освещения // Электроника и электротехника. – Каунас: Технологія, 2005. – № 1(57). – С. 74 – 79.

Представлена полупроводниковая квадрихроматическая лампа с цифровой регулировкой цветовой температуры и потока света, предназначенная для общего освещения. Показано, что с набором цветных источников света, имеющих максимальное значение функции распределения мощности на длинах волн 637 nm, 594 nm, 537 nm и 452 nm, при потоке света до 3000 lm, можно обеспечить весьма приемлемое значение общего индекса цветопередачи R_a ($R_a > 83$) в диапазоне цветových температур от 2856 K до 6504 K. Цветовая температура лампы и поток света программируются и поддерживаются постоянными при помощи микроконтроллера с десятиразрядным управлением. Управление реализовано путем изменения длительности импульсов световых потоков цветных источников. Частота следования импульсов светового потока составляет 300 Hz. В лампе применена цифровая обратная связь, обеспечивающая независимость установленных значений потоков цветных излучателей от температуры и их старения. Ил. 6, библи. 6 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).