VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZIKOS FAKULTETAS

RADIOFIZIKOS KATEDRA

MARIA RAZGUTE

IŠMANIOSIOS VIDAUS APŠVIETIMO SISTEMOS, PAREMTOS CIRKADINIAIS RITMAIS, PROJEKTAVIMAS

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos bakalauro studijų programos
baigiamasis darbas

Studentas:	Maria Razgute
Darbo vadovas:	dr. Česlovas Pavasaris
Recenzentas:	dr. Romualdas Rimeika
Katedros vedėjas:	prof. Jūras Banys

Vilnius, 2016

Turinys

1. Įvadas 4
2. Darbo teorija 5
2.1 Šviesa ir spalvos 5
2.1.1 Spinduliniai, fotoniniai ir šviesiniai dydžiai 5
2.1.2 Šviesos spektras ir spalva 5
2.2 Balti šviestukai 12
2.2.1 Konversijos fosfore šviestukai 12
2.2.2 Balti šviestukai gauti spalvos maišymo būdu 13
2.2.3 Vienalusčiai puslaidininkiniai baltos šviesos šaltiniai 15
2.2.4 Daugialusčiai puslaidininkiniai baltos šviesos šaltiniai 16
2.3 Cirkadiniai ritmai 17
2.3.1 Mėlynos šviesos įtaka žmogaus cirkadiniams ritmams 17
2.3.2 Dirbtinis biologinės dienos koregavimas 18
2.4 Šviestukų valdymas 19
2.4.1 Impulso pločio moduliacija 19
2.4.2 Sistemos ryšys su išoriniais įrenginiais 19
3. Darbo rezultatai 20
3.1 Įrenginio projektavimas 20
3.1.1 Įrenginio schema 20
3.1.2 Bluetooth Low Energy modulis 20
3.1.3 Prototipas 21
3.2 Matavimų rezultatai 22
4. Darbo išvados 23
5. Literatūros sąrašas 24
6. Summary 25

Priedas 1 26

Priedas 2 26

1. Įvadas

Iki dvispalvio konversijos fosfore balto šviestuko pristatyto 1997 metais, kietakūnis apšvietimas neturėjo didelių perspektyvų vidaus apšvietimo srityje. Aišku, tada tai vis dar buvo labai prasta atmaina kitiems šviesos šaltiniams, nes dėl dvispalvių šviestukų ypatybių buvo neįmanoma pasiekti pakankamai aukštos spalvų atgavos.

Baltiems šviestukams patobulėjus, labai išryškėjo kiti kietakūnio apšvietimo pranašumai kaip pagrindinio vidaus apšvietimo šaltinio. Šviestukai, palyginus su kitais šviesos šaltiniais, ilgiau tarnauja, suvartoja labai mažai energijos bei leidžia gan tiksliai reguliuoti, kokių bangų ilgių šviesą bus spinduliuojama (taip atsikratant nenaudingų apšvietimo atveju IR bei UV bangų).

Kietakūnis apšvietimas turi dar vieną didelį pranašumą – jis yra lengvai valdomas skaitmeniškai, taigi dažnai naudojamas smart home (angl. išmanieji namai) tipo sistemose. Išmaniuoju yra tipiškai vadinamas elektroninis įrenginys (arba įrenginių tinklas), dažniausiai sujungtas su kitais įrenginiais arba tinklais per tam tikrą bevielį protokolą (Bluetooth, WiFi, etc.) kuris gali iki tam tikro lygio veikti interaktyviai ir autonomiškai.

Šio darbo tikslas – suprojektuoti išmaniosios vidaus apšvietimo sistemos prototipą. Remiantis optikos teorija nustatyti optimalias šviesos šaltinio charakteristikas. Susipažinti su žmogaus cirkadinių ritmų bei šviesos jiems poveikio tyrimais ir sukurti algoritmą, kuris galėtų apskaičiuoti tinkama šviesdienį priklausomai nuo vartotojo poreikių. Rasti būda valdyti apšvietimo sistema nuotolinių būdų. Sukonstravus prototipą, palyginti sistemos veikimo rezultatus su pageidautinais.

2. Darbo teorija

2.1 Šviesa ir spalvos

2.1.1 Spinduliniai, fotoniniai ir šviesiniai dydžiai

Elektromagnetinei spinduliuotei aprašyti visų pirmą reikia prisiminti pagrindinius jos dydžius bei jų matavimų vienetus.

Lentelė 2.1.1 Spinduliniai, fotoniniai ir šviesiniai dydžiai ir vienetai

Dydis / Rūšis	Spinduliniai	Fotoniniai	Šviesiniai
Srautas	Spinduliuotės srautas $\Phi_{\mathrm{e}}[\mathrm{W}]$	Fotonų srautas $\Phi_{\mathrm{p}}[\mathrm{s}^{-1}]$	Šviesos srautas $\Phi_{\mathrm{v}}[\mathrm{lm}]$
Našumas	Spindulinis našumas $\eta_{\mathrm{e}}[\%]$	Fotoninis našumas $\eta_{\mathrm{p}}[\mathrm{W}^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-1}]$	Šviesinis našumas $\eta_{\mathrm{v}}\left[\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}}\right]$
Intensyvumas (stipris)	Spindulinis intensyvumas $I_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{sr}}\right]$	Fotoninis intensyvumas $I_{\mathrm{p}}[\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{sr}^{-1}]$	Šviesinis intensyvumas $I_{\mathrm{v}}[\mathrm{cd}]$
Skaistis (šviesis)	Spindulinis skaistis $L_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{sr}\cdot\mathrm{m}^2}\right]$	Fotoninis skaistis $L_{\mathrm{p}}[\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{sr}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}]$	Skaistis $L_{\mathrm{v}}\left[\frac{\mathrm{cd}}{\mathrm{m}^2}\right]$
Išspindis	Spindulinis išspindis $M_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$	Fotoninis išspindis $M_{\mathrm{p}}[\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}]$	Šviesinis išspindis $M_{\mathrm{v}}\left[\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{m}^2}\right]$
Apšvieta (srauto tankis)	Spindulinė apšvieta $E_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$	Fotoninė apšvieta $E_{\mathrm{p}}[\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}]$	Apšvieta $E_{\mathrm{v}}[\mathrm{lx}]$
Spinduliuotės kiekis	Spinduliuotės energija $Q_{\mathrm{e}}[\mathrm{J}]$	Fotonų skaičius N_{p}	Šviesinė energija $Q_{\mathrm{v}}[\mathrm{lm}\cdot\mathrm{s}]$
Ekspozicija	Spindulinė ekspozicija $H_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^2}\right]$	Fotoninė ekspozicija $H_{\mathrm{p}}[\mathrm{m}^{-2}]$	Šviesinė ekspozicija $H_{\mathrm{v}}[\mathrm{lx}\cdot\mathrm{s}]$

2.1.2 Šviesos spektras ir spalva

Regimoji šviesa – tai elektromagnetinė spinduliuotė, kurią žmogus jaučia akimis. CIE (tarptautinė apšvietimo komisija) yra apibrėžusi, kad tokios spinduliuotės bangos ilgiai yra nuo 380 iki 780 nm. Regimoji šviesa kartu su IR ir UV spinduliuotėmis sudaro optinę spinduliuotę.

Optinė spinduliuotė, kurią generuoja šaltinis arba atspindi koks nors paviršius, turi tam tikrą spektrinę galią (spektrą) $S(\lambda)$. Žmogaus akis reaguoja į šviesos spektro sudėtį, t.y. mes suvokiame šviesos šaltinių ir daiktų, atspindinčių šviesą, spalvas. Spalvų suvokimas yra sudėtingas reiškinys, todėl kolorimetrijoje naudojami supaprastinti fizikiniai modeliai, leidžiantis įvertinti spalvas remiantis tik spinduliuotės spektru, neduoda pilnutinio įvertinimo.

Lentelė 2.1.2 Monochromatinės šviosos bangos ilgiai, dažniai ir spalva

Bangos ilgis λ /nm	Dažnis f / THz	Spalva
nuo 380 iki 455	nuo 660 iki 790	violetinė
nuo 455 iki 485	nuo 620 iki 660	mėlyna
nuo 485 iki 515	nuo 580 iki 620	žaliai mėlyna
nuo 515 iki 560	nuo 535 iki 580	žalia
nuo 560 iki 570	nuo 525 iki 535	žaliai geltona
nuo 570 iki 600	nuo 500 iki 525	geltona
nuo 600 iki 622	nuo 480 iki 500	oranžinė
nuo 622 iki 780	nuo 380 iki 480	raudona

Monochromatinės spalvos nurodytos lentelėje 2.1.2 yra grynos (pačios sodriausios). Pažymėtina, kad gryna purpurinė spalva neturi monochromatinio atitikmens. Ją gauname sumaišę grynas raudoną ir violetinę spalvas.

Spalvinės regos ypatybė yra tą, kad bet kurią spalvą gali atitikti be galo daug skirtingų spektrų. Tačiau kiekvienas spektras gali būti charakterizuojamas tik viena tam tikra spalva, kuri priedo nėra jo unikali charakteristika. Šaltiniai, kurie atrodo vienos spalvos, tačiau jų generuojamos spinduliuotės spektras skiriasi, vadinami metametriniais.

Skaistinis spalvų įvertinimas remiasi mūsų regos savybę maišyti spalvas. Daugumą spalvų galima gauti maišant siauro spektro raudoną, žalią ir mėlyną pirminius jaudiklius (veiksmes). T.y. tam tikrą veikmės C kiekį galima imituoti maišant veikmes su tam tikrais R, G ir B sandais:

$$C(\mathrm{C}) = R[\mathrm{R}] + G[\mathrm{G}] + B[\mathrm{B}] \quad (2.1.1);$$

Tokio spalvų maišymo ypatybė yra tą, kad sumaišius dviejų (arba daugiau) veikmių kiekį C_1 ir C_2 gautų atitinkamai naudojant sandus R_1, G_1 bei B_1 ir R_2, G_2 bei B_2, gautos veikmės C_3 kiekis lygus:

$$C_3(\mathrm{C}_3) = C_1(\mathrm{C}_1) + C_2(\mathrm{C}_2) = (R_1 + R_2)[\mathrm{R}] + (G_1 + G_2)[\mathrm{G}] + (B_1 + B_2)[\mathrm{B}] \quad (2.1.2);$$

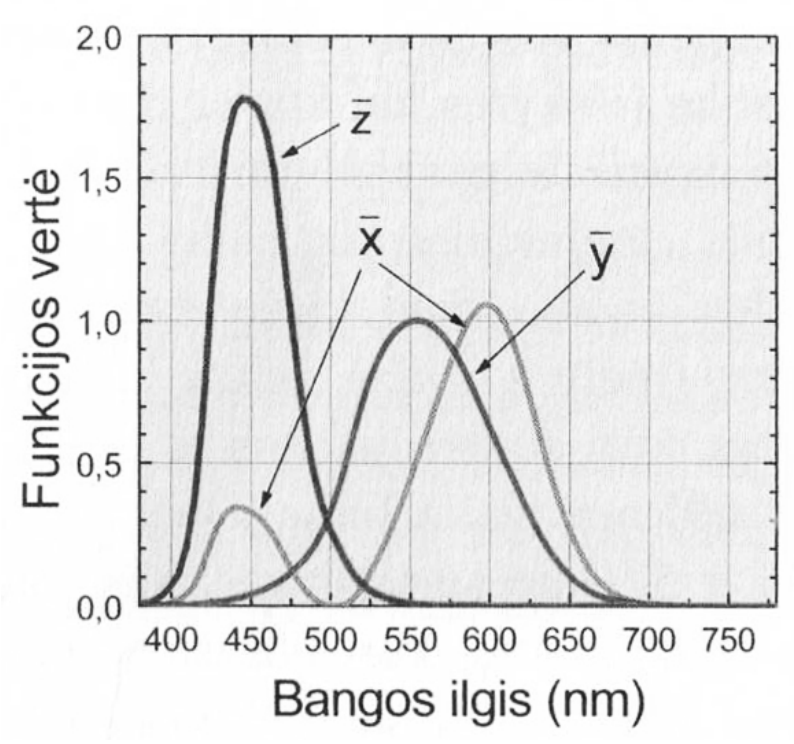
[R], [G] ir [B] veikmių naudojimas turi viena rimtą trūkumą – kai kurioms spalvoms gauti tenka imti neigiamą kurio nors sando vertę. Kitaip tariant, realus spalvos sutapimas gaunamas tik tada, kai viena iš pirminių veikmių sumaišoma su imituojama veikmę. Šio nepatogumo galima išvengti pasinaudojus CIE (1931) kolorimetrinę sistemą. Joje trys pirminės veikmės [X] [Y] [Z] nebėra realios – jos neatitinka jokios realios spalvos bei turi po vieną arba po du neigiamus *R, G* ir/arba *B* sandus. CIE (1931) sistemoje bet koks spalvinės veikmės kiekis gali būti aprašytas trimis vienodos energijos veikmėmis su teigiamais triveiksmiais (eng. tristimulus) sandais *X*, *Y* ir *Z*:

$$C(\mathrm{C}) = X[\mathrm{X}] + Y[\mathrm{Y}] + Z[\mathrm{Z}] \quad (2.1.3);$$

Triveiksmiai sandai yra randami pasinaudojus šviesos spektrinių galios skirstinių S(lmbd):

$$X = k \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) \mathrm{d}\lambda \ ,$$
$$Y = k \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) \mathrm{d}\lambda \ , \quad (2.1.4)$$
$$Z = k \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) \mathrm{d}\lambda \ .$$

Čia *k* – normavimo daugiklis, $\bar{x}, \bar{y}$ ir $\bar{z}$ – CIE (1931) spalvų atitikties funkcijos (eng. colour matching functions). Funkcija $\bar{y}(\lambda)$ yra tapati funkcijai $V(\lambda)$ (šviesos veiksmingumo funkcija) ir turi smailę ties 555 nm. Funkcija $\bar{x}(\lambda)$ turi dvi smailes – ties 599 nm ir ties 442 nm. Funkcija $\bar{z}(\lambda)$ turi smailę ties 446 nm. Šios funkcijos yra apibrėžtos 2°regos kampui. 10°regos kampui spalvų atitiktinės funkcijos yra apibrėžtos CIE (1964).



Pav 2.1.1 CIE (1931) spalvų atitikties funkcijos

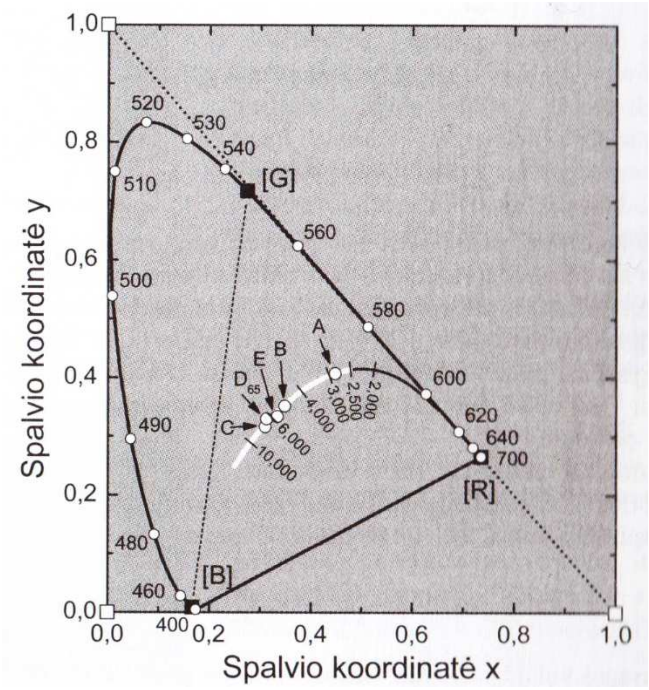
Kadangi funkcija $\bar{y}(\lambda)$ yra tapati funkcijai $V(\lambda)$, iš lygties

$$\Phi_{\mathrm{v}} = 683\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \times \int_{380}^{780} V(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (2.1.5)$$

matome, jog triveiksmis sandas Y yra lygus generuojamam/atspindėtam šviesos srautui Φ_{v}. Sandai X ir Z irgi yra integraliniai ir susieti su spektrinių galios skirstinių. Spalvos apibudinimui gi patogiau naudoti nedimensinį dydį – spalvį (eng. chromacity), kuris nepriklauso nuo normavimo daugiklio k ir aprašomas koordinatėmis:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y. \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

Koordinatė z yra priklausoma, taigi spalviui apibudinti užtenka dviejų koordinačių (x, y). Tai leidžia atvaizduoti spalvius Dekarto koordinačių plokštumoje, kitaip tariant spalvių diagramoje.



Pav. 2.1.2 CIE (1931) spalvių diagrama (spalvotai diagramai žr. priedą 1)

CIE (1931) spalvių diagrama yra parodyta pav. 2.1.2. Baltais kvadratėliais žymi veikmės [X] koordinatės (1, 0), veikmės [Y] – (0, 1) ir [Z] – (0, 0). Monochrominių spalvių geometrinė vieta yra pasagos formos lankas. Pasagos galus junkia styga, kuri yra sodrių purpurinių spalvių geometrinė vieta (purpurinė linija). Pasaga ir styga juosia sritį, kuri talpina visų realių spalvių koordinates. Ši sritis taip pat yra XYZ trikampio viduje.

Juodais kvadratėliais yra pažymėta standartinių veiksmių [R] (700 nm), [G] (546,1 nm) ir [B] (435,8 nm) spalviai. RGB trikampio viduje yra spalviai, kuriuos galima atgaminti maišant teigiamus [R], [G] ir [B] sandus.

CIE (1931) diagrama leidžia apskaičiuoti šaltinio, gauto maišant n šaltinių, turinčių spektrinius galios skirstinius $S_i(\lambda)$, triveiksmius sandus X_i, Y_i ir Z_i bei spindulinius srautus Φ_{ei} (čia $i = 1, 2, ..., n$), spalvio koordinates. Suminio šaltinio srautas Φ_e ir spalvio koordinatės (x, y) yra atitinkamai:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^{n} \Phi_{ei} \qquad (2.1.7)$$

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^{n} X_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} X_i + Y_i + Z_i \\ y = \sum_{i=1}^{n} Y_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} X_i + Y_i + Z_i \end{cases} \qquad (2.1.8)$$

Čia pirminių šaltinių triveiksmiai sandai randami iš (2.1.4) formulių.(2.1.8) lygčių sistema tinka bet kokiam šaltinių skaičiui.

Pav. 2.1.2 dar galima pastebėti lanką, pavaizduotą pasagos viduje. Jis žymi geometrinę vietą spalvio taškų, atitinkančių juodojo kūno spinduliuotę esant įvairioms temperatūroms. *T* temperatūros juodojo kūno spinduliuotės spektrą aprašo Planko formulė:

$$S_{\mathrm{BB}}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_{\mathrm{B}} T) - 1} \quad (2.1.9)$$

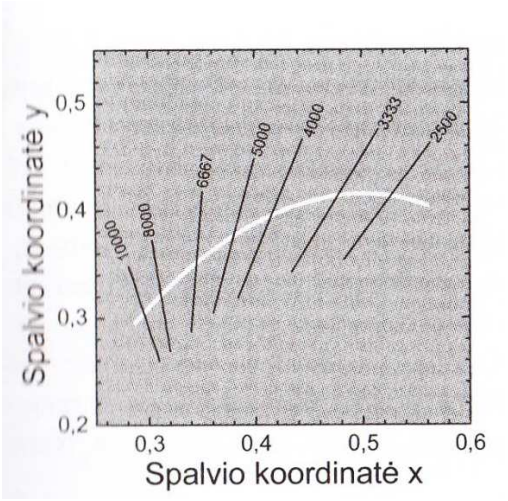
čia k_{B} = 1,3806505 . 10-23 J/K – Planko konstanta. Atitinkamai, šis lankas vadinamas Planko lanku. Nuo maždaug *T* = 2500 K, Planko lankas ir nedidelė sritis apie jį atitinka baltos šviesos spalvius. Jei baltos šviesos šaltinio spalvis yra ant Planko lanko, sakoma, kad šį spalvį atitinkanti juodojo kūno temperatūra yra *šaltinio spalvinė temperatūra*.

Kadangi realių šaltinių (tokių kaip fluorescencinių lempų arba baltų šviestukų) spalvio koordinatės nėra tiksliai ant Planko lanko, juos paprastai apibūdina *koreliuotąją spalvinę temperatūrą* (CCT).

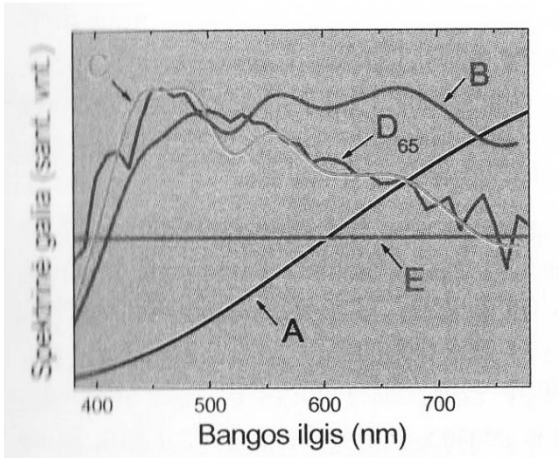
Vienodą koreliuotąją spalvinę temperatūrą turinčių spalvių koordinatės yra ant tiesių, kertančių Planko lanką:

$$(y - y_T) = t_T(x - x_T) \quad (2.1.10)$$

Čia x_{T} ir y_{T} – taško, kuriame izotemperatūrinė tiesė kerta planko lanką koordinatės, o t_{T} – izotemperatūrinės tiesės polinkis. Šie dydžiai yra randami iš lentelių.



Pav. 2.1.3 Planko lanko segmentas ir izotemperatūrinės linijos



Pav. 2.1.4 Standartinių šviesmenų spektrai

CIE (1931) spalvių diagramoje (pav 2.1.2) pažymėti taškai A, B, C, D_{65} atitinkantys standartinius šviesmenimis. A atitinka juodojo kūno, kurio T = 2856 K, spektrą (realaus volframinio spinduolio, atitinkančio šį šviesmenį, temperatūra yra kiek žemesnė). B ir C yra kilę iš saulės spektro modeliavimo, naudojant juodojo kūno spinduolį ir optinių filtrų rinkinį. D65 yra gautas suvidurkinus realius dangaus šviesos spektrus. E (pavaizduotas tik pav. 2.1.4), kurio spalvinės koordinatės (0,3333, 0,3333). Šio šviesmens pirminių sandų ([X], [Y], [Z]) dalinės energijos yra vienodos.

Praktiniais tikslais dažniausiai yra naudojamas D_{65}, iš kurio yra gaunami „dienos šviesos“ standartiniai šviesmenys temperatūrų ruože nuo 4000 K iki 25000 K.

Lentelė 2.1.3 Standartiniai šviesmenys

Standartinis šviesmuo	Spalvio koordinatės	Atitikmuo ir spalvinė temperatūra
A	0,4476, 0,4074	Juodasis kūnas 2856 K (volframas ties 2790 K)
B	0,3484, 0,3516	Tiesioginė saulės šviesa (*CCT* = 4870 K)
C	0,3101, 0,3262	Saulės šviesa apsiniaukus (*CCT* = 6770 K)
D_{65}	0,3128, 0,3292	Dienos šviesa (*CCT* = 6504 K)
E	0,3333, 0,3333	Ekvienergetinis taškas, $S(\lambda) = \text{const}$

2.2 Balti šviestukai

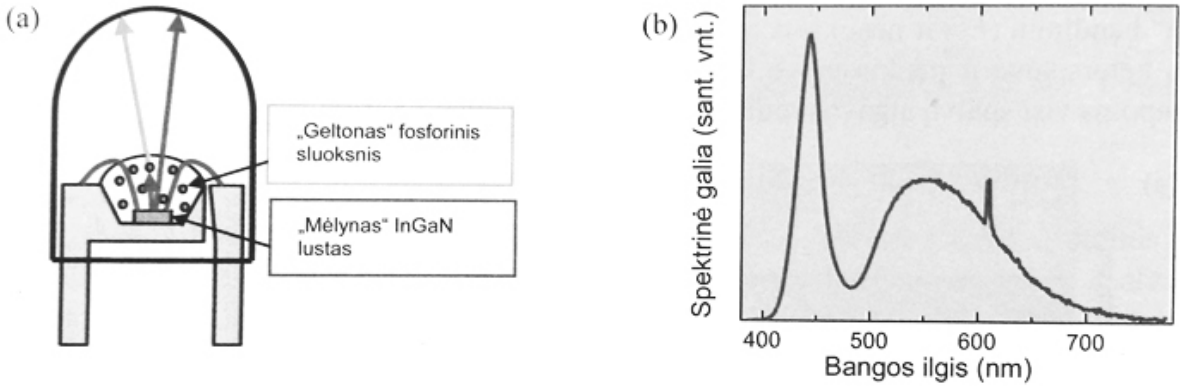
Yra kelios baltų šviestukų rūšys: konversijos fosfore, spalvų maišymo, vienalusčiai bei daugialusčiai puslaidininkiai. Į šį sąrašą taip pat galima įtraukti ir sudėtinę kietakūnę lempą.

Šiame darbe labiausiai įdomūs tokie šviestukų parametrai kaip baltos šviesos veiksmingumas $K = \left[\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}}\right]$ ir bendrasis spalvų atgavos rodiklis R_{a}.

2.2.1 Konversijos fosfore šviestukai

Paprasčiausi baltos spalvos šviestukai – tai šviestukai, kuriuose naudojama dalinė arba visiška trumpabangės spinduliuotės konversija fosfore (fosforo mišinyje). Jie yra kompaktiški, patogus naudoti, tačiau turintis savų trūkumų, paveldėtų iš fluorescencinės lempos, nes jie yra jos kietakūniai atitikmenys:

- Dalis energijos neišvengiamai prarandama konversijos vyksmo metu;
- Labai sunku pasiekti aukštą spalvų atgavą.



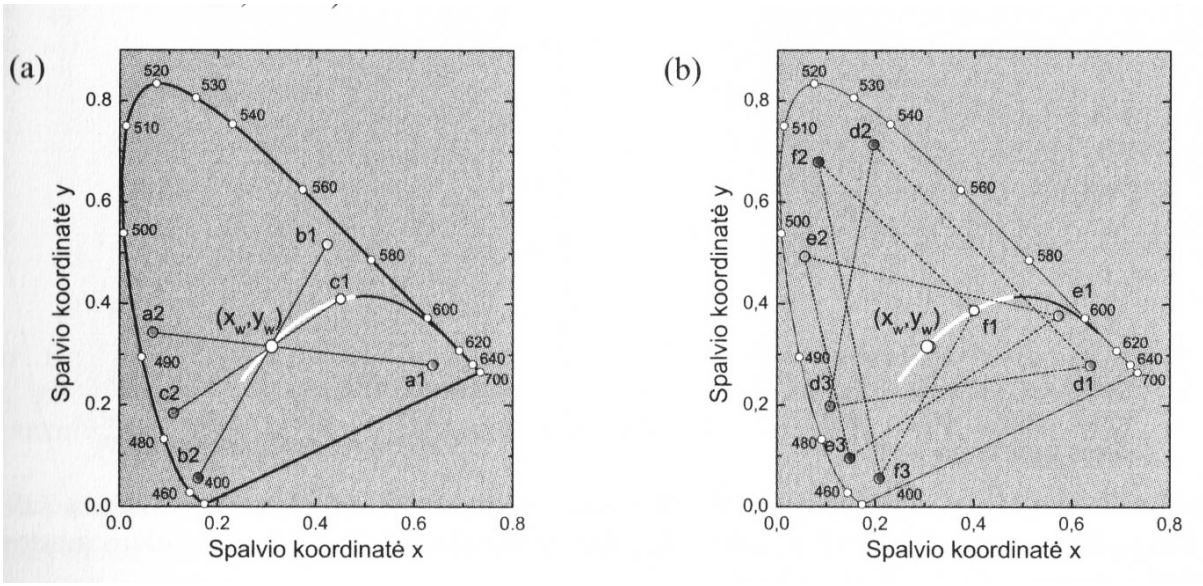
Pav. 2.2.1 Balto dalinės konversijos fosfore a) šviestuko konstrukcija ir b) spektrinis galios skirstinys

Labiausiai paplitę yra balti dvispalviai šviestukai, kurį sudaro pats mėlynas šviestukas (InGaN puslaidininkinis lūstas) ir fosforo sluoksnis (YAG:CE3+), kuriame dalis mėlynos šviesos verčiama į geltoną. Tokio šviestuko konstrukcija bei jo spektrinis galios skirstinys pavaizduoti pav. 2.2.1.

2.2.2 Balti šviestukai gauti spalvos maišymo būdu

Remiantis CIE (1931) spalvų diagramą, baltą šviesą galima gauti maišant kelių pirminių šaltinių generuojamą spinduliuotę. Šaltinių spalvio koordinačių taškai turi būti tam tikru būdu išdėstyti aplink pasirinktą „baltą“ tašką ant Planko lanko. Kurią dalį visuminio srauto turi sudaryti kiekvieno pirminio šaltinio srautas nustato spalvų maišymo lygtys (pvz. 2.1.8).

Dviejų pirminių šaltinių atvejų „baltas“ taškas turi būti ant atkarpos, jungiančios tų šaltinių spalvio taškus, trijų ir daugiau – srityje, kurią apriboja šaltinių spalvių taškus jungiančios atkarpos. Spalvų maišymo principas numato, kad pasirinktą baltą spalvį, kurio koordinatės (x_w, y_w), galima gauti naudojant begalę pirminių šaltinių kombinacijų. Paveikslas 2.2.2 parodo kelis tokius galimus derinius dviem ir trims tokiems šaltiniams.



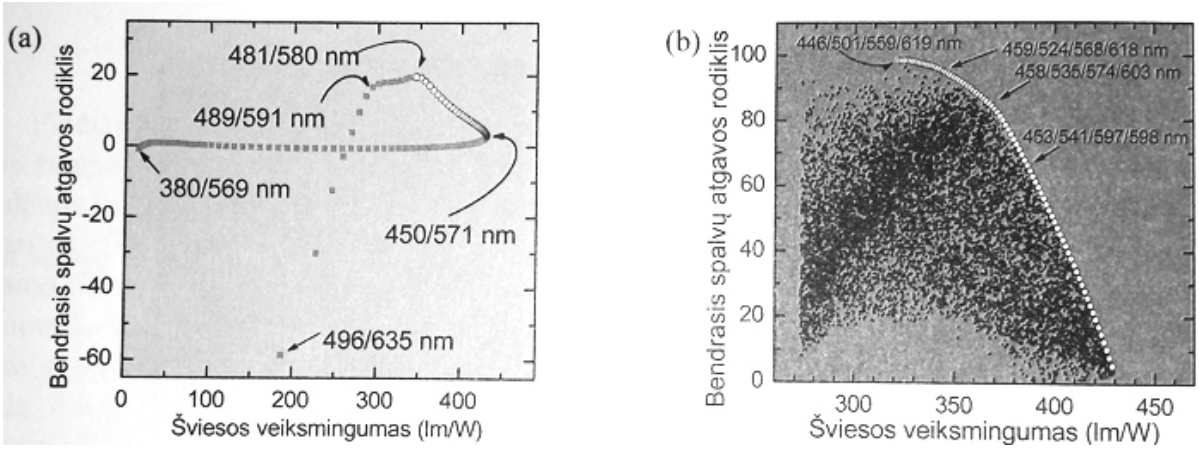
Pav. 2.2.2 Baltos šviesos gavimas CIE (1931) spalvių diagramoje naudojant įvairius dviejų (a) ir trijų (b) pirminių šaltinių derinius

Pav. 2.2.2 a) parodo, kad baltą galima gauti iš raudono ir žaliai mėlyno šaltinių (atkarpa a1a2), geltono ir mėlyno (b1b2), kitokio spalvio balto ir žydro (c1c2). Pav. 2.2.2 b) pateikia tokius pavyzdžius: trikampis su viršūnių koordinatėmis atitinkančias raudono, žalio ir žydro šaltinių spalvius (d1d2d3), oranžinio, žaliai mėlyno ir mėlyno (e1e2e3) bei kitokio spalvio balto, žaliai mėlyno ir violetinio (f1f2f3).

Daugiau negu trijų pirminių šaltinių atveju galimi ne tik įvairūs pirminių spalvų rinkiniai, bet ir įvairūs dalinių srautų deriniai pasirinktam spalvų rinkiniui, nes kintamųjų skaičius spalvų maišymo lygčių sistemoje ima viršyti lygčių skaičių.

Parenkant pirminius šaltinius baltam šviestukui, labai svarbu atsižvelgti į baltos šviesos veiksmingumą ir spalvų atgavimo rodiklį. Paveikslas 2.2.3 a) parodo visus galimus taškus (K, R_a) erdvėje dichrominei baltai lempai, kurios koreliuotoji spalvinė temperatūra yra 4870 K. Tarp maksimalaus veiksmingumo taško (mėlyno (450 nm) ir žaliai geltono (571 nm) šaltinių derinys) ir geriausios spalvų atgavos taško (mėlyno (481 nm) ir geltono (580 nm) šaltinių derinys) esantys taškai (pažymėti baltais skrituliukais) atitinka (K, R_a) skirstinio optimalią ribą. Optimalioje riboje maišytos baltos spalvos veiksmingumas yra atvirkščiai proporcingas spalvų atgavai.

Analogiškas skirstinys gali būti pavaizduotas ir daugiau šaltinių turinčiai lempai. Paveikslas 2.2.3 b) atvaizduoja tetrachrominės lempos (K, R_a) skirstinį. Kaip aiškiai matosi, toks skirstinys turi daug daugiau taškų priklausančių optimaliai ribai.



Pav. 2.2.3 Šviesos veiksmingumo ir bendrojo spalvų atgavos rodiklio erdvės baltos šviesos šaltiniams (*CCT* = 4870 K), a) dichrominiam ir b) tetrachrominiam

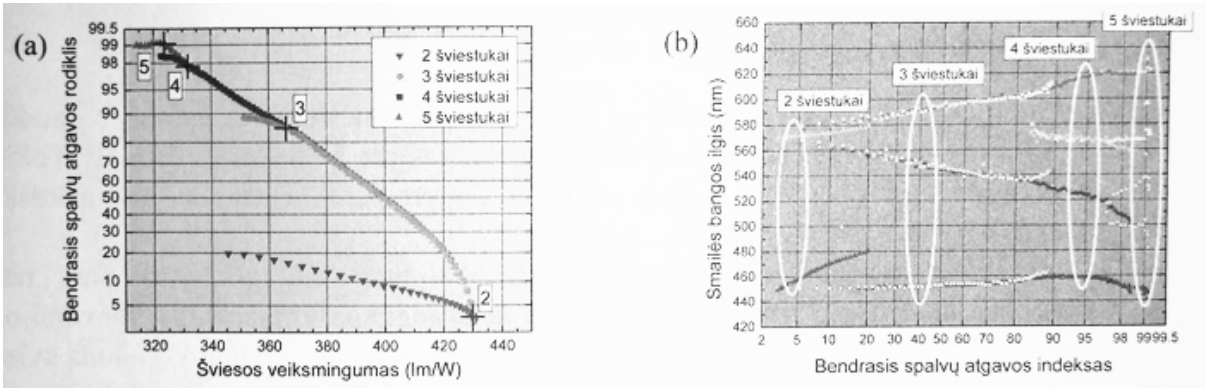
Bendru atveju optimalios ribos (K, R_a) fazinėje erdvėje radimo uždavinys bet kokiam pirminių šaltinių skaičiui n gali būti formuluojamas kaip tokios funkcijos globalaus maksimumo radimas:

$$F_\sigma(S_1, S_2, \ldots, S_n, \Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_n) = \sigma K + (1-\sigma) R_\mathrm{a}, \quad (2.2.1)$$

Čia S_i ir Φ yra atitinkamai i-tojo pirminio šaltinio spektrinis galios skirstinys ir dalinis srautas, o σ $(0 < \sigma \leq 1)$ – svoris, kuris nustato norimą kompromisą tarp šviesos veiksmingumo ir spalvų atgavos.

Baltos šviesos , maišytos iš dviejų, trijų, keturių ir penkių pirminių šaltinių spinduliuotės, optimalios (K, R_a) yra palygintos 2.2.4 pav. a) dalyje. Kaip matosi, jos visos persikloja, todėl,

pasirinkus kompromisą tarp šviesos veiksmingumo ir spalvų atgavos rodiklio, galima pamatyti, kokio minimalaus šviestuku skaičiaus prireiks.



Pav 2.2.4 a) Baltų *CCT* = 4870 K šviesos šaltinių optimalios (K, R_a) skirstinių ribos, b) ribas atitinkantys šviestukų spektro juosto smailių bangos ilgiai

2.2.4 pav. b) dalyje taškais yra pažymėti pirminių šaltinių bangos ilgiai, atitinkantys optimalias ribas, pavaizduotas a) dalyje. Kaip ir iš 2.2.4 a), iš 2.2.4 b) matyti, kaip ties R_a = 5 dichrominė spalvų sistema transformuojasi į trichrominę, pastaroji nuo R_a = 85 pradeda nusileisti tetrachrominei, o norint pasiekti R_a = 99 reikalinga pentachrominė sistema. Kaip aišku, pentachrominė sistema gali tenkinti labai aukštus apšvietimo kokybės reikalavimus.

Vertėtų paminėti, kad realių šviesos šaltinių atveju tikriausiai bus pasiekta geresnė spalvų atgava, nes jų spektro juosta yra platesnė.

2.2.3 Vienalusčiai puslaidininkiniai baltos šviesos šaltiniai

Egzistuoja kelios technologijos, leidžiančios viename puslaidininkiniame luste generuoti spinduliuotę, kurios spektras sudarytas iš kelių tam tikro bangos ilgio juostų, ir tokiu būdu gauti baltą šviesą. Šių, dažniausiai dvispalvių, šviestukų pranašumas yra monolitinė konstrukcija, nereikalaujanti išorinio bangos ilgio keitiklio.

Vienalusčiams baltiems šviestukams priskiriami:

- šviestukai su keliais aktyviaisiais injekcinės elektroliuminescencijos sluoksniais

  Trūkumai: nedidelis našumas, spalvis priklauso nuo maitinimo srovės stiprio;

- šviestukai, kuriuose nauduojama daline mėlynos šviesos konversija tam tikroje lusto dalyje

  Trūkumai: maža spalvų atgava, mažas našumas.

2.2.4 Daugialusčiai puslaidininkiniai baltos šviesos šaltiniai

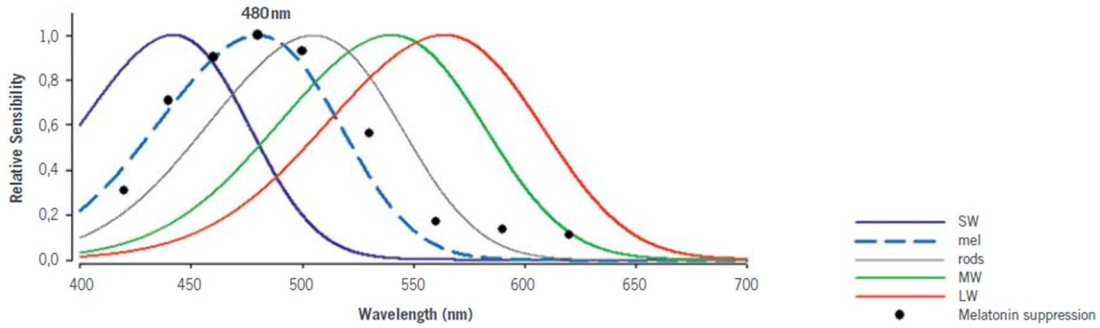
Daugiaspalviai baltos šviesos šaltiniai, sudaryti iš nepriklausomai maitinamų pirminių spalvotų šviestukų, atveria universalaus apšvietimo valdymo galimybes. Keičiant pirminių šviestukų generuojamus dalinius srautus, galima tenkinti individualius ir kintamus poreikius apšvietimo kokybinių ir kiekybinių parametrų atžvilgių. Trichrominiai šaltiniai leidžia kaitaliuoti koreliuotąją spalvinę temperatūrą ir juos temdinti, nekeičiant spalvio, o tetrachrominiai ir aukštesnės eilės šaltiniai – papildomai realizuoti įvairius kompromisus tarp šviesos veiksmingumo, lempos našumo ir spalvų atgavos.

Esminis daugialusčių šviesos šaltinių pranašumas prieš konversijos fosfore šaltinius – didesnis našumas.

2.3 Cirkadiniai ritmai

Cirkadiniai ritmai - tai periodiniai įvairių biologinių procesų, susijusių su dienos-nakties ciklu, intensyvumo svyravimai. Cirkadinių ritmu periodas dažniausiai yra artimas 24 valandoms.

2.3.1 Mėlynos šviesos įtaka žmogaus cirkadiniams ritmams

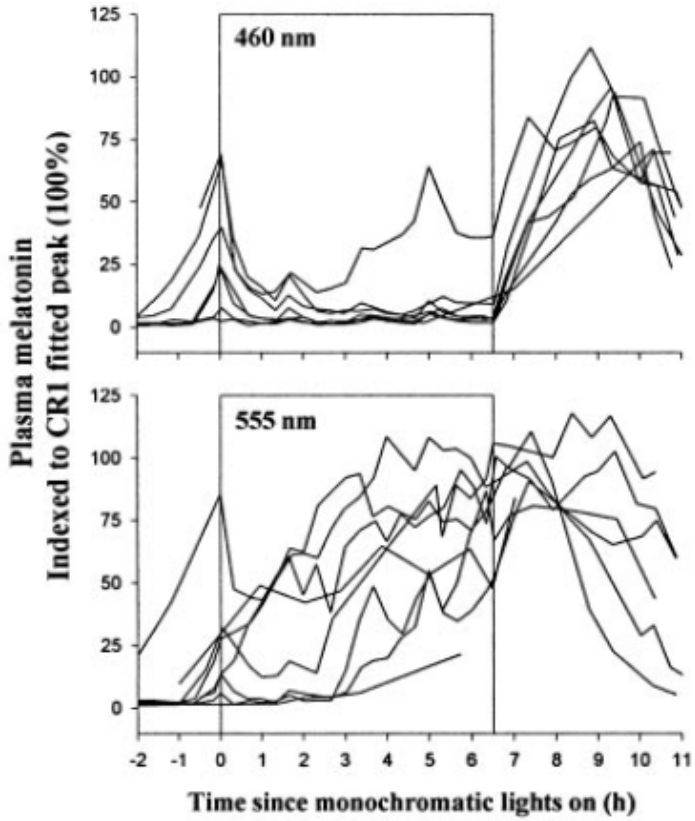


Pav. 2.3.1 Akies receptorių jautrumas į skirtingus bangos ilgius: brukšniotą liniją pažymėti receptoriai yra atsakingi už melatonino išskirymo slopinimą

Paskutiniai tyrimai rodo, kad žmogaus (ir ne tik) akis, be tiesiogiai atsakingų už rėgą receptorių, turi atskirus receptorius, atsakingus už biologinės dienos derinimą. Eksperimentų metu paaiškėjo, kad net daugelio aklų žmonių atvejų buvo pastebėta organizmo reakciją į tam tikrų bangos ilgių spinduliuotę.

Biologinius ritmus mūsų organizme reguliuoja baltymas melatoninas. Kai jo išskyrimas yra slopinamas, žmogus yra žvalus. Tačiau jeigu slopinti melatonino išsirymą nakties metų, bus stebimi įvairūs miego sutrikimai ir kitos susijusios sveikatos problemos.

Už melatoniną atsakingų receptorių absorbcijos pikas yra maždaug ties 479 nm bangos ilgiu (mėlyna).



Pav. 2.3.2 Tyriamųju melatonino lygis 2 valandas prieš, 4 valandas po ir 6,5 valandas monochromatinės spinduliuotės poveikio metu

2.3.2 Dirbtinis biologinės dienos koregavimas

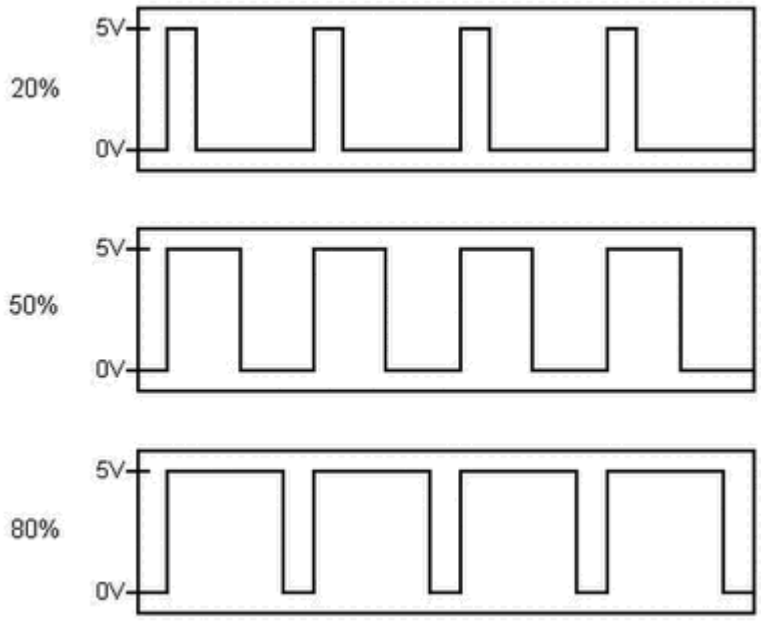
Mėlynosios spinduliuotės poveikio melatonino išskyrimui tyrimai aiškiai parodo, kad norėdami paveikti žmogaus biologinį laikrodį, turime reguliuoti ne tik jį supančios šviesos intensyvumą, bet ir jos spektrą. Standartinių atveju, vidaus apšvietimas turėtų būti panašus į naturalų šviesdienį, tačiau jeigu vartotojas turi nestandartinę dienotvarkę (pvz. darbas naktį arba pamainomis), toks variantas netiks. Bendriausiu atveju, aukščiausia apšvietimo spalvinę temperatūra (~6500 K) turėtu sutapti su vartotojo „vidurdieniu“, o apie tris valandas prieš miega ji jau turi būti nusileidus maždaug iki 3500 K.

Naktinis apšvietimas, jeigu jis yra, turėtu visiškai neturėti mėlynosios komponentės (~1900 K).

2.4 Šviestukų valdymas

2.4.1 Impulso pločio moduliacija

LED šviesos srautas gali būti reguliuojamas keliais įvairiais būdais. Dažniausiai tam tikslui yra naudojama impulso pločio moduliacija. Ji yra vykdoma įjungiant ir išjungiant elektros srovę kelis kartus per sekundę. Kadangi šviesos diodo (kitaip, negu, pavyzdžiui, kaitrinės lemputės) persijungimo laikas yra labai trumpas, jo šviesa moduliuojama tokiu pat dažniu, kokiu kinta srovė. Jeigu moduliacijos dažnis yra pakankamai aukštas ($f > 70$ Hz), žmogaus akis nebegali pastebėti mirksėjimo ir suvokia LED švytėjimą kaip nuolatinį, kurio ryškis priklauso nuo to, kokią dalį laiko diodas yra įjungtas.



Pav.2 Impulso pločio moduliacijos panaudojimo pavyzdys

Impulso pločio moduliacija yra labai patogu naudoti skaitmeninėje elektronikoje, nes paduodamo signalo amplitudė išlieka vienoda.

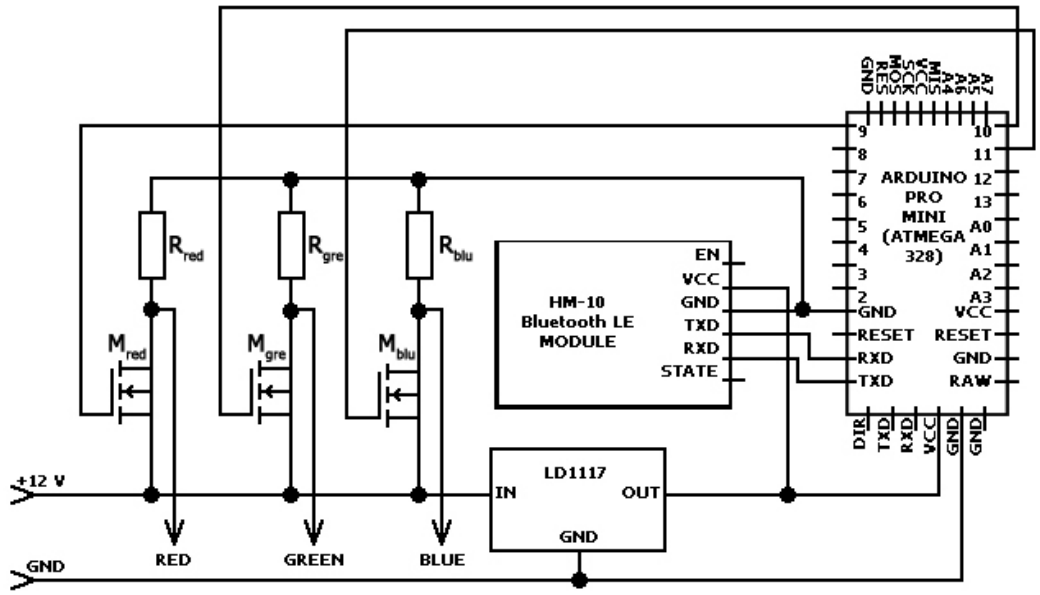
2.4.2 Sistemos ryšys su išoriniais įrenginiais

Vienas iš išmaniosios sistemos bruožų yra galimybė „bendrauti“ su kitais įrenginiais per bevielį protokolą. Apšvietimo valdymo atveju tai ypač patogu, nes tokiu atveju jis gali būti valdomas iš bet kurios kambario/namo vietos.

3. Darbo rezultatai

3.1 Įrenginio projektavimas

3.1.1 Įrenginio schema

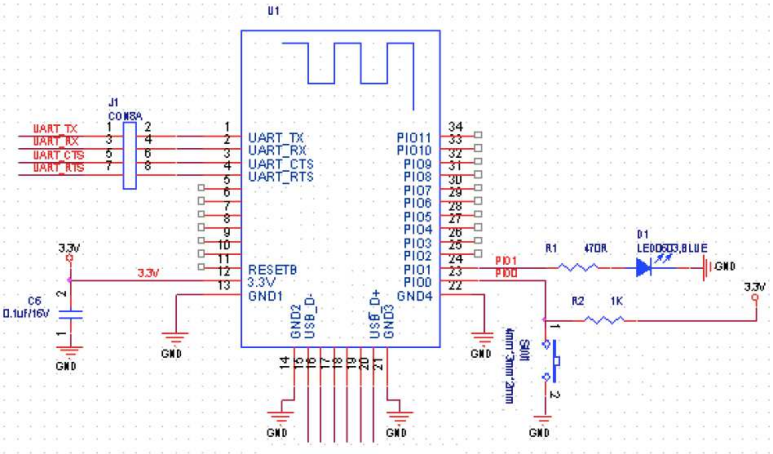


Pav. 3.1.1 Įrenginio elektrinė schema

Įrenginio prototipe kaip šviesos šaltinis yra panaudota daugialūsčių šviestukų trichrominė (RGB) juosta.

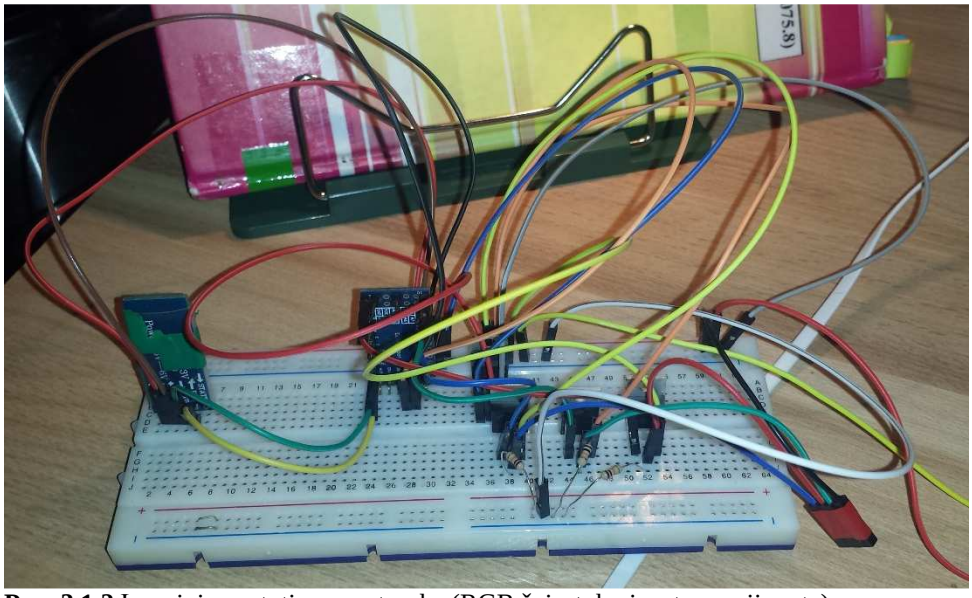
3.1.2 Bluetooth Low Energy modulis

Bluetooth LE (Bluetooth 4.0) buvo pasirinktas kaip prototipo valdymo protokolas. Jo pagrindinis pranašumas – palyginus mažas energijos vartojimas. Bluetooth LE modulio (HM-10) ryšys su valdymo plokšte vyksta per Serial interfeisą.

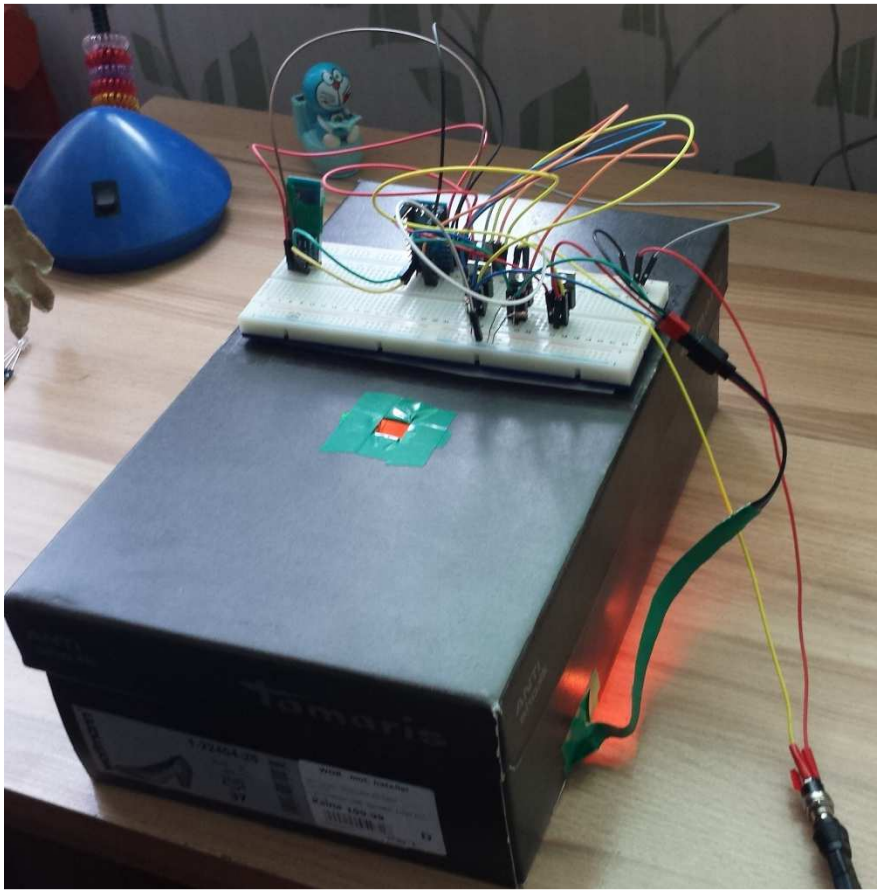


Pav. 3.1.2 HM-10 schema

3.1.3 Prototipas



Pav. 3.1.2 Įrenginio prototipas nuotrauka (RGB šviestukų juosta neprijungta)



Pav. 3.1.3 Įrenginio maketo nuotrauka (RGB šviestukų juosta prijungta)

3.2 Matavimų rezultatai

Matavimams atlikti buvo naudojama programinė įranga, leidžianti nustatyti apšvietimo CCT. Po to gautas CCT buvo palyginamas su užprogramuotų naudojant lentelę, pateikta priedę 2, kuri parodo tam tikro spalvių šviesos temperatūrų spalvių šešioliktainį atitikmenį.

Matavimai buvo atlikti įvairiais programos veikimo momentais (biologiniais „rytę“, „vidurdienį“, „vakarę“ ir „naktį“. Taip pat buvo palygintos vertės gautos suvedant pageidaujama šviesos temperatūra rankinių būdų ir siunčiant duomenis per BLE interfeisą, bei įrašius ją tiesiogiai į programos kodą.

Lentelė 3.2.1 Matavimai

Biologinės paros laikas	**Užprogramuotos vertės**	**Vertės, gautus veikiant kodui**	**Per BLE interfeisą įvestos vertės**
Rytas	3500 K	3755 K	3751 K
Vidurdienis	6500 K	6792 K	6785 K
Vakaras	2700 K	3001 K	2999 K
Naktis	1900 K	2120 K	2130 K

4. Darbo išvados

1. Darbo metu buvo įsitikinta, kad trichrominiai šaltiniai prastai tinka kaip pagrindinis vidaus apšvietimo šaltinis. Teisingai spalvų atgavai bei *CCT* reikalingi daugiau pirminių šaltinių turintys šviestukai.
2. Nepaisant trichrominių šviestukų netinkamumo, kietakūniai šviestukai yra labai gera atmaina kitoms apšvietimo rūšims biologinės dienos koregavimo atveju.

5. Literatūros sąrašas

1. Charity M.: Blackbody colour datafile - http://www.vendian.org/mncharity/dir3/blackbody/UnstableURLs/bbr_color.html
2. Bailes H. J., Lucas R. J.: Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light (lmax 479 nm) supporting activation of Gq/11 and Gi/o signalling cascades – Proceedings of Royal Society 280: 20122987, 2013
3. Brainard G. C., Czeisler C. A., Lockley S. W.: High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light – Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism 88(9) 2003
4. Burkard Wördenweber, Jörg Wallaschek, Peter Boyce, Donald D. Hoffman: Automotive Lighting and Human Vision – "Springer", Berlin, 2007, pp. 27-28
5. Dreamland SMD5050 RGB Datasheet: http://www.tweaking4all.com/wp-content/uploads/2014/01/5050LED.pdf
6. Freedman MS, Lucas RJ, Soni B, von Schantz M, Munoz M, David-Gray Z, Foster R : Regulation of mammalian circadian behavior by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors. Science 284 (5413): pp. 502–504
7. Jeanne F. Duffy, M.B.A., Ph.D., Charles A. Czeisler, Ph.D., M.D.: Effect of Light on Human Circadian Physiology – Sleep Med Clin. 2009 June; 4(2): pp. 165–177.
8. LD1117 Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator datasheet
9. Provencio I: Melanopsin, the photopigment of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells - Wiley Interdisciplinary Reviews: Membrane Transport and Signaling 1 (2) 2012 pp. 228–237
10. Tamulaitis G., Juška G.: Energija taupančios puslaidininkinės technologijos – „Progreus“, Vilnius 2008
11. Tomoaki Kozaki, Shingo Kitamura, Yuichi, Keita Ishibashi, Hiroki Noguchi, Akira Yasukouchi: Effect of Color Temperature of Light Sources on Slow-wave Sleep – Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science
12. Shubert E. F.: Light-emitting diodes – Cambridge University Press, Cambridge, 2003 p. 233
13. Žukauskas A.: Puslaidininkiniai šviestukai – „Progreus“, Vilnius 2008 pp. 9-41, 121-149, 202-229

6. Summary

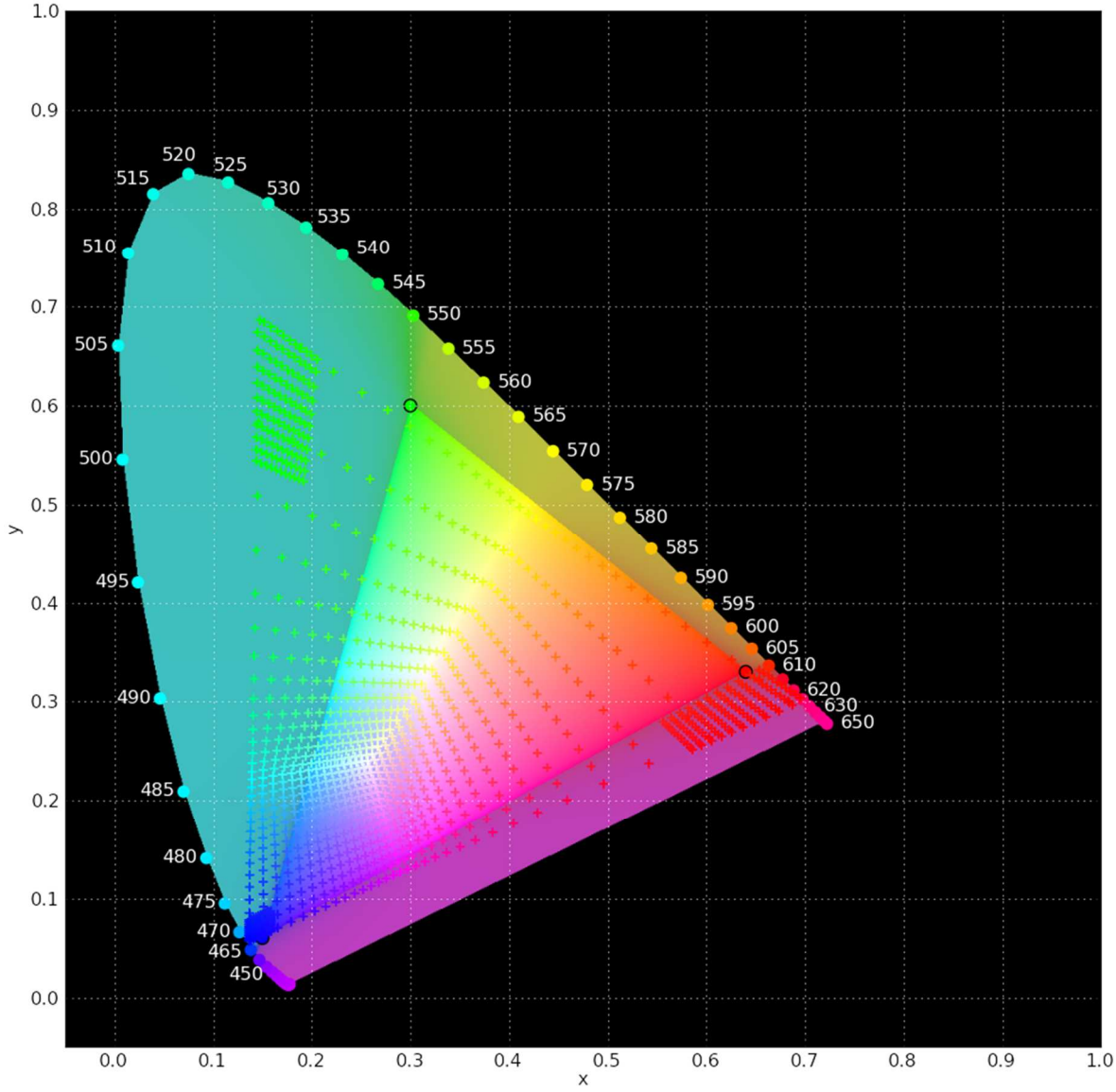
SMART CIRCADIAN RHYTHM BASED INDOOR LIGHTING SYSTEM
Maria Razgute

The purpose of this thesis is to design and test circadian rhythm based indoor lighting system prototype, which would be controlled via wireless protocol. Bluetooth Low Energy was chosen as such protocol.

The device is based on Arduino Pro Mini prototyping board, which is programmed to produce drive each band of RGB lighting differently, according to the time of the day, so lighting as similar as outdoor lighting could be achieved. A dedicated software was used to measure accurateness of the light temperature produced by device versus the one that was programmed.

A prototype turned out to be relatively cheap device, which could be used as an indoor light source, when accuracy of the colour is not necessary. To produce a device, which could fully substitute contemporary indoor lighting, RGB light emitting diodes are not suitable.

Priedas 1


1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
y
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
x
520
525
515
530
535
510
540
545
550
505
555
560
565
500
570
575
580
585
495
590
595
600
605
610
620
490
630
650
485
480
475
470
465
450

Priedas 2

1000 K	2deg	0.6499	0.3474	2.472e+06	1.0000	0.0337	0.0000	255	51	0	#ff3300
1000 K	10deg	0.6472	0.3506	2.525e+06	1.0000	0.0401	0.0000	255	56	0	#ff3800
1100 K	2deg	0.6361	0.3594	2.112e+07	1.0000	0.0592	0.0000	255	69	0	#ff4500
1100 K	10deg	0.6348	0.3612	2.162e+07	1.0000	0.0631	0.0000	255	71	0	#ff4700
1200 K	2deg	0.6226	0.3703	1.282e+08	1.0000	0.0846	0.0000	255	82	0	#ff5200
1200 K	10deg	0.6225	0.3710	1.314e+08	1.0000	0.0860	0.0000	255	83	0	#ff5300
1300 K	2deg	0.6095	0.3801	5.959e+08	1.0000	0.1096	0.0000	255	93	0	#ff5d00
1300 K	10deg	0.6104	0.3797	6.118e+08	1.0000	0.1085	0.0000	255	93	0	#ff5d00
1400 K	2deg	0.5966	0.3887	2.243e+09	1.0000	0.1341	0.0000	255	102	0	#ff6600
1400 K	10deg	0.5983	0.3874	2.306e+09	1.0000	0.1303	0.0000	255	101	0	#ff6500
1500 K	2deg	0.5841	0.3962	7.121e+09	1.0000	0.1578	0.0000	255	111	0	#ff6f00
1500 K	10deg	0.5864	0.3940	7.333e+09	1.0000	0.1515	0.0000	255	109	0	#ff6d00
1600 K	2deg	0.5720	0.4025	1.967e+10	1.0000	0.1806	0.0000	255	118	0	#ff7600
1600 K	10deg	0.5747	0.3996	2.028e+10	1.0000	0.1718	0.0000	255	115	0	#ff7300
1700 K	2deg	0.5601	0.4076	4.839e+10	1.0000	0.2025	0.0000	255	124	0	#ff7c00
1700 K	10deg	0.5632	0.4041	4.999e+10	1.0000	0.1912	0.0000	255	121	0	#ff7900
1800 K	2deg	0.5486	0.4118	1.081e+11	1.0000	0.2235	0.0000	255	130	0	#ff8200
1800 K	10deg	0.5519	0.4077	1.118e+11	1.0000	0.2097	0.0000	255	126	0	#ff7e00
1900 K	2deg	0.5375	0.4150	2.224e+11	1.0000	0.2434	0.0000	255	135	0	#ff8700
1900 K	10deg	0.5408	0.4104	2.305e+11	1.0000	0.2272	0.0000	255	131	0	#ff8300
2000 K	2deg	0.5267	0.4173	4.268e+11	1.0000	0.2647	0.0033	255	141	11	#ff8d0b
2000 K	10deg	0.5300	0.4123	4.431e+11	1.0000	0.2484	0.0061	255	137	18	#ff8912
2100 K	2deg	0.5162	0.4188	7.710e+11	1.0000	0.2889	0.0120	255	146	29	#ff921d
2100 K	10deg	0.5195	0.4134	8.018e+11	1.0000	0.2709	0.0153	255	142	33	#ff8e21
2200 K	2deg	0.5062	0.4196	1.322e+12	1.0000	0.3126	0.0219	255	152	41	#ff9829
2200 K	10deg	0.5093	0.4139	1.377e+12	1.0000	0.2930	0.0257	255	147	44	#ff932c
2300 K	2deg	0.4965	0.4198	2.166e+12	1.0000	0.3360	0.0331	255	157	51	#ff9d33
2300 K	10deg	0.4995	0.4138	2.260e+12	1.0000	0.3149	0.0373	255	152	54	#ff9836
2400 K	2deg	0.4872	0.4194	3.408e+12	1.0000	0.3589	0.0454	255	162	60	#ffa23c
2400 K	10deg	0.4900	0.4132	3.563e+12	1.0000	0.3364	0.0501	255	157	63	#ff9d3f
2500 K	2deg	0.4782	0.4186	5.178e+12	1.0000	0.3814	0.0588	255	166	69	#ffa645
2500 K	10deg	0.4808	0.4122	5.422e+12	1.0000	0.3577	0.0640	255	161	72	#ffa148
2600 K	2deg	0.4696	0.4173	7.624e+12	1.0000	0.4034	0.0734	255	170	77	#ffaa4d
2600 K	10deg	0.4720	0.4108	7.996e+12	1.0000	0.3786	0.0790	255	165	79	#ffa54f
2700 K	2deg	0.4614	0.4158	1.092e+13	1.0000	0.4250	0.0889	255	174	84	#ffae54
2700 K	10deg	0.4636	0.4091	1.147e+13	1.0000	0.3992	0.0950	255	169	87	#ffa957
2800 K	2deg	0.4535	0.4139	1.524e+13	1.0000	0.4461	0.1054	255	178	91	#ffb25b
2800 K	10deg	0.4555	0.4071	1.604e+13	1.0000	0.4195	0.1119	255	173	94	#ffad5e
2900 K	2deg	0.4460	0.4118	2.081e+13	1.0000	0.4668	0.1229	255	182	98	#ffb662
2900 K	10deg	0.4478	0.4050	2.193e+13	1.0000	0.4394	0.1297	255	177	101	#ffb165
3000 K	2deg	0.4388	0.4095	2.784e+13	1.0000	0.4870	0.1411	255	185	105	#ffb969
3000 K	10deg	0.4404	0.4026	2.939e+13	1.0000	0.4589	0.1483	255	180	107	#ffb46b
3100 K	2deg	0.4320	0.4070	3.657e+13	1.0000	0.5067	0.1602	255	189	111	#ffbd6f
3100 K	10deg	0.4333	0.4002	3.866e+13	1.0000	0.4781	0.1677	255	184	114	#ffb872
3200 K	2deg	0.4254	0.4044	4.725e+13	1.0000	0.5259	0.1800	255	192	118	#ffc076
3200 K	10deg	0.4266	0.3976	5.002e+13	1.0000	0.4970	0.1879	255	187	120	#ffbb78
3300 K	2deg	0.4192	0.4018	6.012e+13	1.0000	0.5447	0.2005	255	195	124	#ffc37c
3300 K	10deg	0.4202	0.3950	6.374e+13	1.0000	0.5155	0.2087	255	190	126	#ffbe7e
3400 K	2deg	0.4132	0.3990	7.545e+13	1.0000	0.5630	0.2216	255	198	130	#ffc682
3400 K	10deg	0.4140	0.3923	8.010e+13	1.0000	0.5336	0.2301	255	193	132	#ffc184
3500 K	2deg	0.4075	0.3962	9.349e+13	1.0000	0.5809	0.2433	255	201	135	#ffc987
3500 K	10deg	0.4082	0.3895	9.939e+13	1.0000	0.5515	0.2520	255	196	137	#ffc489
3600 K	2deg	0.4021	0.3934	1.145e+14	1.0000	0.5983	0.2655	255	203	141	#ffcb8d
3600 K	10deg	0.4026	0.3868	1.219e+14	1.0000	0.5689	0.2745	255	199	143	#ffc78f
3700 K	2deg	0.3969	0.3905	1.387e+14	1.0000	0.6153	0.2881	255	206	146	#ffce92
3700 K	10deg	0.3973	0.3841	1.479e+14	1.0000	0.5860	0.2974	255	201	148	#ffc994
3800 K	2deg	0.3919	0.3877	1.665e+14	1.0000	0.6318	0.3112	255	208	151	#ffd097
3800 K	10deg	0.3922	0.3813	1.776e+14	1.0000	0.6028	0.3207	255	204	153	#ffcc99
3900 K	2deg	0.3872	0.3849	1.979e+14	1.0000	0.6480	0.3346	255	211	156	#ffd39c
3900 K	10deg	0.3873	0.3786	2.115e+14	1.0000	0.6193	0.3444	255	206	159	#ffce9f
4000 K	2deg	0.3827	0.3820	2.333e+14	1.0000	0.6636	0.3583	255	213	161	#ffd5a1
4000 K	10deg	0.3827	0.3759	2.496e+14	1.0000	0.6354	0.3684	255	209	163	#ffd1a3
4100 K	2deg	0.3784	0.3793	2.729e+14	1.0000	0.6789	0.3823	255	215	166	#ffd7a6
4100 K	10deg	0.3783	0.3733	2.923e+14	1.0000	0.6511	0.3927	255	211	168	#ffd3a8
4200 K	2deg	0.3743	0.3765	3.169e+14	1.0000	0.6938	0.4066	255	217	171	#ffd9ab
4200 K	10deg	0.3741	0.3707	3.397e+14	1.0000	0.6666	0.4172	255	213	173	#ffd5ad
4300 K	2deg	0.3704	0.3738	3.654e+14	1.0000	0.7083	0.4310	255	219	175	#ffdbaf
4300 K	10deg	0.3701	0.3681	3.922e+14	1.0000	0.6817	0.4419	255	215	177	#ffd7b1
4400 K	2deg	0.3666	0.3711	4.188e+14	1.0000	0.7223	0.4556	255	221	180	#ffddb4
4400 K	10deg	0.3662	0.3656	4.500e+14	1.0000	0.6966	0.4668	255	217	182	#ffd9b6
4500 K	2deg	0.3631	0.3685	4.771e+14	1.0000	0.7360	0.4803	255	223	184	#ffdfb8

4500 K	10deg	0.3625	0.3631	5.132e+14	1.0000	0.7111	0.4919	255	219	186	#ffdbba
4600 K	2deg	0.3596	0.3659	5.406e+14	1.0000	0.7494	0.5051	255	225	188	#ffe1bc
4600 K	10deg	0.3590	0.3607	5.820e+14	1.0000	0.7253	0.5170	255	221	190	#ffddbe
4700 K	2deg	0.3563	0.3634	6.093e+14	1.0000	0.7623	0.5299	255	226	192	#ffe2c0
4700 K	10deg	0.3557	0.3583	6.567e+14	1.0000	0.7392	0.5422	255	223	194	#ffdfc2
4800 K	2deg	0.3532	0.3609	6.835e+14	1.0000	0.7750	0.5548	255	228	196	#ffe4c4
4800 K	10deg	0.3524	0.3560	7.373e+14	1.0000	0.7528	0.5675	255	225	198	#ffe1c6
4900 K	2deg	0.3502	0.3585	7.632e+14	1.0000	0.7872	0.5797	255	229	200	#ffe5c8
4900 K	10deg	0.3494	0.3538	8.240e+14	1.0000	0.7661	0.5928	255	227	202	#ffe3ca
5000 K	2deg	0.3473	0.3561	8.485e+14	1.0000	0.7992	0.6045	255	231	204	#ffe7cc
5000 K	10deg	0.3464	0.3516	9.170e+14	1.0000	0.7792	0.6180	255	228	206	#ffe4ce
5100 K	2deg	0.3446	0.3538	9.396e+14	1.0000	0.8108	0.6293	255	232	208	#ffe8d0
5100 K	10deg	0.3436	0.3494	1.016e+15	1.0000	0.7919	0.6433	255	230	210	#ffe6d2
5200 K	2deg	0.3419	0.3516	1.036e+15	1.0000	0.8221	0.6541	255	234	211	#ffead3
5200 K	10deg	0.3409	0.3473	1.122e+15	1.0000	0.8044	0.6685	255	232	213	#ffe8d5
5300 K	2deg	0.3394	0.3494	1.139e+15	1.0000	0.8330	0.6787	255	235	215	#ffebd7
5300 K	10deg	0.3383	0.3453	1.234e+15	1.0000	0.8167	0.6937	255	233	217	#ffe9d9
5400 K	2deg	0.3369	0.3472	1.248e+15	1.0000	0.8437	0.7032	255	237	218	#ffedda
5400 K	10deg	0.3358	0.3433	1.353e+15	1.0000	0.8286	0.7187	255	235	220	#ffebdc
5500 K	2deg	0.3346	0.3451	1.363e+15	1.0000	0.8541	0.7277	255	238	222	#ffeede
5500 K	10deg	0.3334	0.3413	1.479e+15	1.0000	0.8403	0.7437	255	236	224	#ffece0
5600 K	2deg	0.3323	0.3431	1.484e+15	1.0000	0.8642	0.7519	255	239	225	#ffefe1
5600 K	10deg	0.3311	0.3394	1.611e+15	1.0000	0.8518	0.7686	255	238	227	#ffeee3
5700 K	2deg	0.3302	0.3411	1.611e+15	1.0000	0.8740	0.7760	255	240	228	#fff0e4
5700 K	10deg	0.3289	0.3376	1.750e+15	1.0000	0.8630	0.7933	255	239	230	#ffefe6
5800 K	2deg	0.3281	0.3392	1.744e+15	1.0000	0.8836	0.8000	255	241	231	#fff1e7
5800 K	10deg	0.3268	0.3358	1.896e+15	1.0000	0.8740	0.8179	255	240	233	#fff0e9
5900 K	2deg	0.3261	0.3373	1.883e+15	1.0000	0.8929	0.8238	255	243	234	#fff3ea
5900 K	10deg	0.3247	0.3341	2.049e+15	1.0000	0.8847	0.8424	255	242	236	#fff2ec
6000 K	2deg	0.3242	0.3355	2.028e+15	1.0000	0.9019	0.8473	255	244	237	#fff4ed
6000 K	10deg	0.3228	0.3324	2.208e+15	1.0000	0.8952	0.8666	255	243	239	#fff3ef
6100 K	2deg	0.3223	0.3337	2.179e+15	1.0000	0.9107	0.8707	255	245	240	#fff5f0
6100 K	10deg	0.3209	0.3307	2.374e+15	1.0000	0.9055	0.8907	255	244	242	#fff4f2
6200 K	2deg	0.3205	0.3319	2.337e+15	1.0000	0.9193	0.8939	255	246	243	#fff6f3
6200 K	10deg	0.3190	0.3291	2.548e+15	1.0000	0.9156	0.9147	255	245	245	#fff5f5
6300 K	2deg	0.3188	0.3302	2.500e+15	1.0000	0.9276	0.9168	255	247	245	#fff7f5
6300 K	10deg	0.3173	0.3275	2.728e+15	1.0000	0.9254	0.9384	255	246	248	#fff6f8
6400 K	2deg	0.3171	0.3286	2.669e+15	1.0000	0.9357	0.9396	255	248	248	#fff8f8
6400 K	10deg	0.3156	0.3260	2.914e+15	1.0000	0.9351	0.9619	255	248	251	#fff8fb
6500 K	2deg	0.3155	0.3270	2.845e+15	1.0000	0.9436	0.9621	255	249	251	#fff9fb
6500 K	10deg	0.3140	0.3245	3.108e+15	1.0000	0.9445	0.9853	255	249	253	#fff9fd
6600 K	2deg	0.3140	0.3254	3.026e+15	1.0000	0.9513	0.9844	255	249	253	#fff9fd
6600 K	10deg	0.3124	0.3231	3.308e+15	0.9917	0.9458	1.0000	254	249	255	#fef9ff
6700 K	2deg	0.3125	0.3238	3.214e+15	0.9937	0.9526	1.0000	254	250	255	#fefaff
6700 K	10deg	0.3109	0.3217	3.515e+15	0.9696	0.9336	1.0000	252	247	255	#fcf7ff
6800 K	2deg	0.3110	0.3224	3.407e+15	0.9726	0.9395	1.0000	252	248	255	#fcf8ff
6800 K	10deg	0.3094	0.3203	3.728e+15	0.9488	0.9219	1.0000	249	246	255	#f9f6ff
6900 K	2deg	0.3097	0.3209	3.606e+15	0.9526	0.9270	1.0000	250	247	255	#faf7ff
6900 K	10deg	0.3080	0.3190	3.948e+15	0.9290	0.9107	1.0000	247	245	255	#f7f5ff
7000 K	2deg	0.3083	0.3195	3.811e+15	0.9337	0.9150	1.0000	247	245	255	#f7f5ff
7000 K	10deg	0.3066	0.3177	4.174e+15	0.9102	0.9000	1.0000	245	243	255	#f5f3ff