

ŠIAULIŲ UNIVERSITETO
GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETO
FIZIKOS KATEDRA

Andrius Leskovas

ŠVIESOS DIODO NAŠUMO IR VEIKSMINGUMO ĮVERTINIMAS

Bakalauro darbas
Optometrijos bakalauro studijų programa

Vadovas dr. Žilvinas Norgėla

Šiauliai, 2012

Anotacija

Darbo apimtis 39 puslapiai. Jame pateiktos 24 iliustracijos ir 6 lentelės. Darbas susideda iš įvado, 7 skyrių, išvadų, literatūros sąrašo ir 7 priedų.

Darbas susideda iš dviejų pagrindinių dalių: teorinės ir eksperimentinės. Teorinėje dalyje aprašoma kaip žmogus supranta šviesą ir spalvas, aptariami pagrindiniai fotometriniai ir radiometriniai dydžiai.

Antroje dalyje (eksperimente) – nustatomos ir įvertinamos pagrindinės šviesos diodo charakteristikos, t.y. jo veiksmingumas ir našumas, prie skirtingų darbo režimų.

Annotation

The project consist of 39 pages. In general it contains 24 illustrations and 6 tables. There are an introduction, 7 sections, conclusion, references and 7 additions.

The project consists of two main parts: a theoretical and experimental. The theoretical part describes how the human eye understands light and colors, covers the main photometric and radiometric quantities.

In the second part (experimental) - LED characteristics, i.e. efficacy and efficiency, of the different operating modes, are identified and measured up.

Turinys

Įvadas	4
1. ŽMOGAUS REGA	5
1.1 Žmogaus regos sistema.....	5
1.2 Regos fiziologija.....	6
1.3 Spalvinis suvokimas.....	7
1.4 Spalvos pojūtis.....	8
2. BALTOS ŠVIESOS ŠALTINIAI IR JŲ KLASIFIKACIJA	10
3. PAGRINDINIAI RADIOMETRINIAI DYDŽIAI	12
3.1 Energinė galia arba energinis srautas Φ_e	12
3.2 Erdvinis kampas.....	12
3.3 Energinis stipris.....	13
3.4 Energinis šviesis.....	14
3.5 Spektrinis spinduliuotės srautas $\Phi_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės intensyvumas $I_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės skaitis $L_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės šviesis $M_\lambda(\lambda)$	15
4. FOTOMETRINIAI DYDŽIAI	17
5. RYŠYS TARP FOTOMETRINIŲ IR RADIOMETRINIŲ DYDŽIŲ	20
6. ŠVIESOS ŠALTINIŲ NAŠUMAS IR VEIKSMINGUMAS	21
7. EKSPERIMENTINIS ŠVIESOS DIODO NAŠUMO IR VEIKSMINGUMO ĮVERTINIMAS	27
7.1 Eksperimento aprašymas.....	27
7.2 Matavimo rezultatai ir jų analizė.....	31
Išvados	37
Literatūros sąrašas	38
PRIEDAI	40

Ivadas

Natūrali šviesa suteikia gyviesiems organizmams gyvybingumo, o jos trūkumas gali sutrikdyti emocinę pusiausvyrą, todėl nemaža dalis žmonių vėlyvą rudenį ir žiemą kenčia dėl sezoninio emocinio sutrikimo. Natūralaus apšvietimo stoka rudens – žiemos periodu sąlygoja pablogėjusią žmonių sveikatą. Natūralus apšvietimas patalpose ypač reikšmingas, nes stimuliuoja fiziologinius procesus ir veikia nervų sistemą. Per akis ir vegetacinę sistemą jis padeda palaikyti ryšį su aplinka ir skatina gyvybinius procesus. Todėl nepakankamą natūralų patalpų apšvietimą būtina kompensuoti dirbtiniu, tačiau jis kiek įmanoma turi būti artimesnis natūraliam. Šiam tikslui vis daugiau yra kuriama naujų šviesos šaltinių, kurių spektras būtų artimas natūralaus apšvietumo spektrui.

Sukurti nauji šviesos šaltiniai, kurių skleidžiama šviesa artima natūraliam apšvietimui, naudingi tuo, kad jie sukurti taip, kad pritaikyti taupyti elektros energiją. Tai ypač svarbu, kadangi elektros energijos ištekliai yra riboti, o jų paklausa nuolat didėja, todėl yra kaip niekad svarbu surasti būdų, kaip naudoti elektros energiją efektyviai. Taigi vienas iš taupymo būdų galėtų būti tinkamas šviesos šaltinių parinkimas.

Kadangi, elektros energijos ištekliai yra gana riboti, yra stengiamasi kuo daugiau energijos gauti iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Vienas iš tokių šaltinių yra Saulės energija, kuri gaunama saulės baterijoms sugeriant saulės šviesą ir paverčiant ją elektros energija.

Kuriami nauji šviesos šaltiniai, kuriamos naujos medžiagos jiems gaminti, tobulinamos konstrukcijos, siekiant padidinti jų efektyvumą. Atliekami laboratoriniai tyrimai.

Tikslas: Eksperimentiškai nustatyti šviesos diodo našumą ir veiksmingumą.

Uždaviniai:

1. Susipažinti su dirbtinių šviesos šaltinių įvairove;
2. Aptarti dydžius – apibūdinančius šviesos šaltinius ir šviesos šaltinių spektrus, bei jų kiekybinius parametrus;
3. Įvertinti įvairių darbo režimų įtaką šviesos diodo spektrinėms charakteristikoms.
4. Susipažinti su šviesos šaltinių našumo ir veiksmingumo įvertinimo metodais.

Tyrimo metodai: literatūros analizė, eksperimentas, modeliavimas.

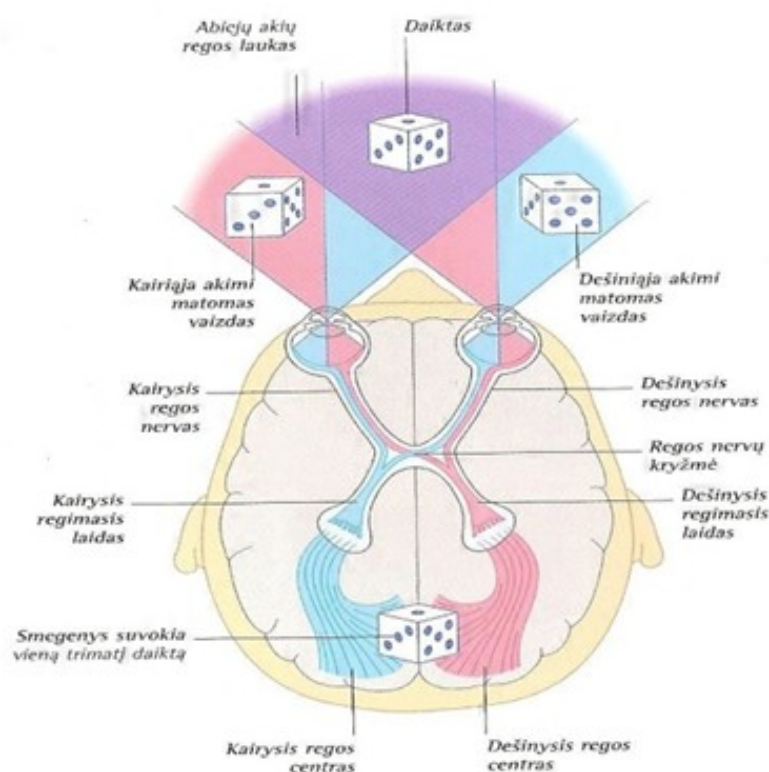
1. ŽMOGAUS REGA

Žmogaus rega yra vienas iš svarbiausių jutimo organų, kuris teikia daugiausia informacijos apie aplinką. Regėjimas sėkmingai padeda žmogui orientuotis aplinkoje, bei įvertinti visus tris matmenis: plotį, aukštį ir gylį, todėl žmogus gali aiškiai suvokti, kuris daiktas yra arčiau, o kuris – toliau. Gebėdamas suvokti trimatį vaizdą, žmogus kontroliuoja ir reguliuoja savo judesius, suvokia meno kūrinius, stebi gamtos pasikeitimus. Tačiau ne daugelis suvokiame, kaip fiziologiniai procesai paveikia tai, ką mes matome ir kaip matome.

1.1 Žmogaus regos sistema

Žmogaus regos sistema susideda iš dviejų pagrindinių komponentų: akies (duomenų priėmimo daviklis) ir smegenų (procesorius), kurie tarpusavyje sujungti nervu.

Žmogaus regos sistema dirba taip:



1.1 pav. Žmogaus regos sistema [1]

- Akies lęšiukas sufokusuoja šviesos energiją ant tinklainės, esančios akies dugne;
- Jutikliai reaguoja į šviesos energiją per elektrocheminę reakciją, kuri pasiunčia nervinį impulsą regos nervu;

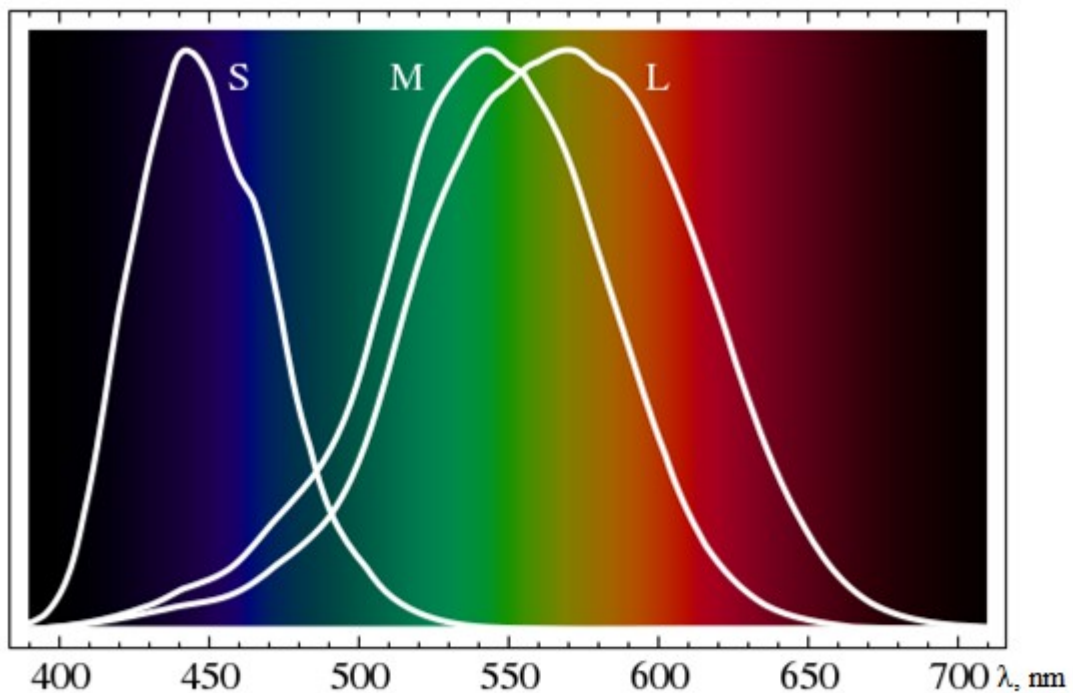
- Nerviniai impulsai išeina iš akių per regos nervus ir susitinka regos nervų kryžmėje.
- Nervų kryžmėje susieina skaidulos iš kiekvienos vidinės akies tinklainės dalies, todėl abi smegenų pusės gauna informaciją iš abiejų akių.
- Toliau impulsai sklinda regimaisiais laidais į tam tikras galvos smegenų sritis, esančias užpakalinėje jų dalyje (regos centrus), kur suformuojamas trimatis matyto daikto vaizdas (1.1 pav.) [2].

1.2 Regos fiziologija

Akis turi dviejų rūšių fotoreceptorius, kurie reguodami į šviesą per elektrocheminį procesą paverčia ją nerviniais impulsais. Šie fotoreceptoriai vadinami kolbelėmis ir lazdelėmis. Iš viso tinklainėje yra 120 mln. lazdelių ir 6 mln. kolbelių. Dauguma kolbelių susitelkusios centrinėje duobutėje, ryškiausio matymo centre. Tačiau toje duobutėje lazdelių nėra, jos išplitusios periferinėje tinklainės dalyje. Išoriniame lazdelės segmente yra regėjimo pigmentas, kuris absorbuoja tam tikro ilgio šviesos bangas, o lazdelių pigmentas, rodopsinas absorbuoja visas matomas šviesos bangas, t.y. absorbcijos maksimumas yra 500 nm srityje. Kolbelės turi tris pigmentus: ilgųjų bangų, vidutinių bangų ir trumpųjų bangų. Ilgųjų bangų pigmento absorbcijos maksimumas yra 656 nm srityje, vidutinio bangų pigmento absorbcijos maksimumas yra 535 nm srityje, o trumpųjų bangų pigmento absorbcijos maksimumas yra 420 nm srityje. Tačiau vienoje kolbelėje būna tik vienas iš trijų minėtų pigmentų. Pavyzdžiui, apšvietus tinklainę 450 nm bangos ilgio šviesa, ją absorbuoja visų trijų kolbelių pigmentai, tačiau skirtingai (1.2 pav.).

Taigi, kolbelės skirtos šviesiniam regėjimui, kai apšvietimas yra ryškus. Jam būdingas geras regėjimo aštrumas ir greitas vaizdo vertinimas, kintant regimajam vaizdui. Trys skirtingo pigmento turinčių kolbelių rūšys sudaro spalvinio regėjimo pagrindą. Kolbelių sistema neveikia esant silpnam apšvietimui. Nuo lazdelių priklauso prieblandinis regėjimas. Šiam regėjimui būdingas mažas regėjimo aštrumas ir lėtas vaizdo vertinimas. Šis regėjimas yra nespalvinis – achromatinis.

Fotonų, lazdelių ir kolbelių pigmento sąveikos metu pakinta receptoriaus membranų Na^+ laidumas. 11-cis-retinalis yra šviesai jautri regėjimo pigmento dalis, kuri veikiant šviesai virsta izomeru. Tai vienintelis nuo šviesos priklausantis procesas tinklainėje.



1.2 pav. Žmogaus regėjimo pigmentų absorbcijos kreivė [3]

Fotoreceptorių išorinio segmento membranuose yra Na^+ kanalai. Šie kanalai valdomi antrinio signalo tarpininko ciklinio guanozinmonofosfato (cGMP), kurio koncentracija priklauso nuo apšvietimo: didelė tamsoje, bei maža šviesoje.

Tamsoje fotoreceptoriaus membranos Na^+ jonų kanalai yra atviri, membraninis potencialas dėl didelio Na^+ jonų srauto į ląstelę depoliarizuojasi ir lieka apie 40 mV. Kai fotoreceptorius yra apšviečiamas, susidaręs metarodopsinas II aktyvina fotoreceptoriaus membranos G baltymą transduciną, kuris aktyvina cGMP fosfodiesterazę, kuri hidrolizuoja cGMP į 5' -GMF. Tai sukelia cGMP koncentracijos mažėjimą, todėl Na^+ kanalai užsidaro, o membraninio potencialo mažėjimas artėja prie K^+ pusiausvyros potencialo. Dalyvaujant antriniam signalo perdavikliams, signalas stiprinamas [4].

1.3 Spalvinis suvokimas

Žmogus kaip šviesą, elektromagnetines bangas junta tik nuo 380 iki 780 nm bangos ilgio. Tam tikrais atvejais žmogus sugeba matyti net ir 950 nm ir 302 nm ilgio bangas. Iš to matyti, kokiam siauram ilgio intervalui žmogaus akis yra jautri. Mes nematome radijo bangų, pradedant kilometrinių ilgio ir baigiant metrinėmis, centimetrinėmis, milimetrinėmis bangomis. Taip pat nematome ultravioletinių, rentgeno, gama spindulių. Yra tik siauras 400 ir 800 nm bangos ilgio tarpas, kuris veikia mūsų akį.

Vavilovo apskaičiavimais, šviesinis slenkstis prieblandoje yra lygus vidutiniškai 25 kvantams, o atskirais atvejais – 8 kvantams. Gechto duomenimis, prietemos slenkstis reikalauja 5 – 7 kvantų, tuo tarpu gi Van der Veldenas teigia, kad slenkstinis dydis atitinka iš vis du kvantus. Kaip matome, tinklainės elementai labai jautrūs šviesai.

Kad būtų juntama kuri nors spalva, reikia, kad akies tinklainę veiktų ne visos saulės spektro spindulinės bangos, bet tik kai kurios iš jų, arba jei veikia visos, tai ne tokiu santykiu, koks yra saulės šviesoje. Kai saulės šviesa, praėjusi pro stiklinę prizmę, pakliūva į ekraną, matome visas spektro spalvas, kurių kiekviena pasižymi bangos ilgiu:

Bangos ilgis (nm), spalva:

- 780-605 raudona
- 605-590 oranžinė
- 590-560 geltona
- 560-500 žalia
- 500-470 žydra
- 470-430 mėlyna
- 430-380 violetinė

Spalviniai jutimai sudaro dvi grupes. Į vieną grupę įeina visos pilkos spalvos, pradedant balta ir baigiant juoda. Tai achromatinės spalvos. Spalvos viena nuo kitos skiriasi pagal spalvos toną, sotumą (sotį) ir šviesumą (ryškumą). Iš spalvos tono skiriame spalvą nuo tokio pat šviesumo pilkos spalvos. Achromatinės spalvos nepasižymi spalviniu tonu. Juo mažiau prie spalvos yra prisimaišiusios baltos ar pilkos spalvos, tuo sotesnė chromatinė spalva ir juo vienesnio bangų ilgio spalvinis tonas, tuo jis sotesnis.

Akies jautrumas įvairioms spektro spalvoms nėra labai pastovus dalykas. Ryškiausia spektro spalva yra geltona – ties 555 nm. Siusiaurinus regimąjį lauką iki 1,5°, t. y. iki tinklainės fovea centralis ribos, ir esant šviesiniai adaptacijai, maksimalaus matomumo vieta spektre pasislenka prie 565 nm bangos. Prietemoje matomumo maksimumas pasislenka prie 510 nm, t.y. į žaliają spektro dalį. Raudonoji – oranžinė spektro dalis prietemoje atrodo tamsesnė, kaip dieną, o žalioji – mėlynoji spektro dalis palyginti šviesesnė [5].

1.4 Spalvos pojūtis

Jeigu apšvietimo spektrinė sudėtis kinta, tai kinta ir atspindėta nuo objekto šviesa. Saulės šviesos spektrinė sudėtis kinta per dieną. Vėlyvos popietės saulės šviesos spektrinėje sudėtyje

yra daugiau ilgųjų šviesos bangų nei vidurdienio saulės šviesos spektre, kartu per dieną kis ir atsispindėjusios nuo objekto šviesos spektrinė sudėtis. Įprasto patalpų apšvietimo – kaitinimo lemputės – šviesos spektrinė sudėtis skiriasi nuo saulės šviesos spektrinės sudėties. Patalpų apšvietimo spektrui būdinga mažiau trumpųjų bangų. Aišku, kad įnešus daiktus iš lauko į namą, pasikeičia nuo jų atsispindėjusi šviesa. Nors šviesos spektras, pasiekiantis mūsų akis, kinta, paprastai nepastebime jokių mūsų suvokiamų objektų spalvų pakitimų: žolės stiebas beveik visada atrodo žalias, knygos puslapis ar popieriaus lapas – baltas ir pan. Konstantiškumas (angl. color constancy) – tai pavadinimas, duotas reiškiniui, kuriam vykstant stebėtojo suvokiama objekto spalva lieka pastovi, nors apšvietimo, apšviečiančio objektą, spektrinė sudėtis kinta, taip pat kinta tiriamojo žmogaus akis pasiekianti nuo objekto paviršiaus atsispindėjusi šviesa. Spalvų suvokimo konstantiškumas padeda stabiliai suvokti aplinką. Jei spalvinis suvokimas kistų kintant šviesai, pasiekiančiai mūsų akis, žmonės beviltiškai susipainiotų aplinkoje, negalėtų atpažinti ir atskirti įprastų objektų. Spalvų suvokimo konstantiškumas leidžia atpažinti objektus nepriklausomai nuo to, koks yra dienos laikas ir ar jie yra lauke, ar patalpose, lapuočių miške ar atviroje vietoje. Spalvinio regėjimo funkcijos yra aptikti ir išskirti aplinkoje esančius objektus, o spalvų suvokimo konstantiškumas yra procesas, kuris užtikrina objektų savybių pastovumą, t. y. kompensuoja natūralaus apšvietimo pakitimus per parą. Ši savybė padeda neklystamai atpažinti objektus [6].

2. BALTOS ŠVIESOS ŠALTINIAI IR JŲ KLASIFIKACIJA

Skirtumas tarp šviesos šaltinių ir apšvietimo prietaisų

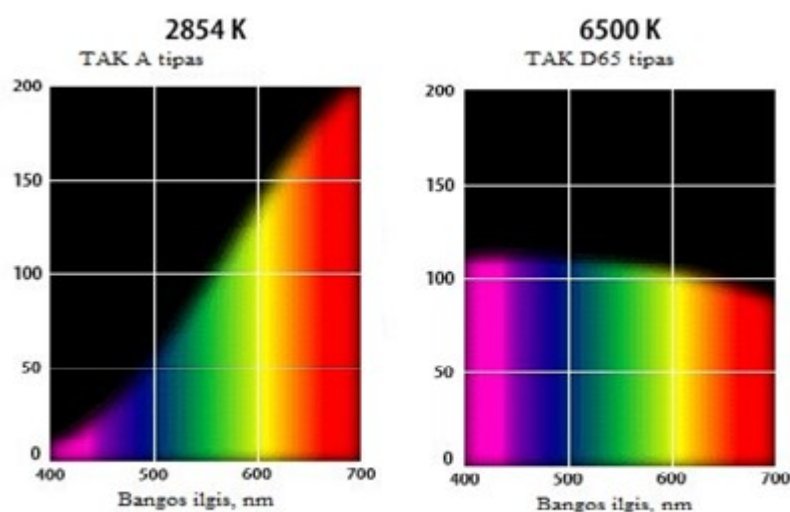
Šviesos šaltinis skleidžia spinduliuotę, kurią galima charakterizuoti spektrine kreive. Kiekvieno šviesos šaltinio bangos ilgis nusako šviesos energijos pasiskirstymą. Santykinė energija parodo, kiek energijos yra tam tikrame bangos ilgyje.

CIE (Tarptautinė Apšvietimo Komisija (TAK)) susistemino įvairių baltos šviesos šaltinių spektrines charakteristikas ir suskirstė juos į tam tikrus tipus.

Buitiniai apšvietimo prietaisai

Šiais laikais apšvietimo prietaisai naudojami visur: namuose, biuruose, bet kur lauke. Kadangi prietaisų yra daug ir visokių – TAK suskirstė juos į 4 pagrindinius tipus:

- A tipas – tai kaitrinių ar volframinių lempučių šviesos šaltiniai (kurių koreliuota spalvinė temperatūra yra 2856 K) (2.1 pav.);
- F tipas (dar vadinamas F2, F02, Fcw, CWF, CWF2) – tai šaltos baltos spalvos šviesą

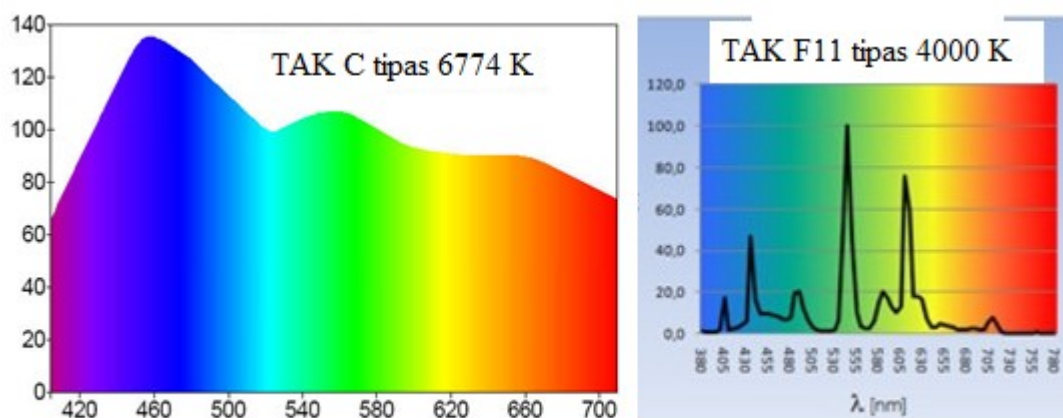


2.1 pav. A ir D65 tipo šaltinių spektrai [7]

skleidžiantys šaltiniai (fluorescencinės lempos). Dar skirstomi nuo F1 iki F12, pagal naudojamą dujas ir padengimą fosforu. Dažniausiai naudojami yra F2, F7, F12. Dažnai naudojami biuruose (2.2 pav.);

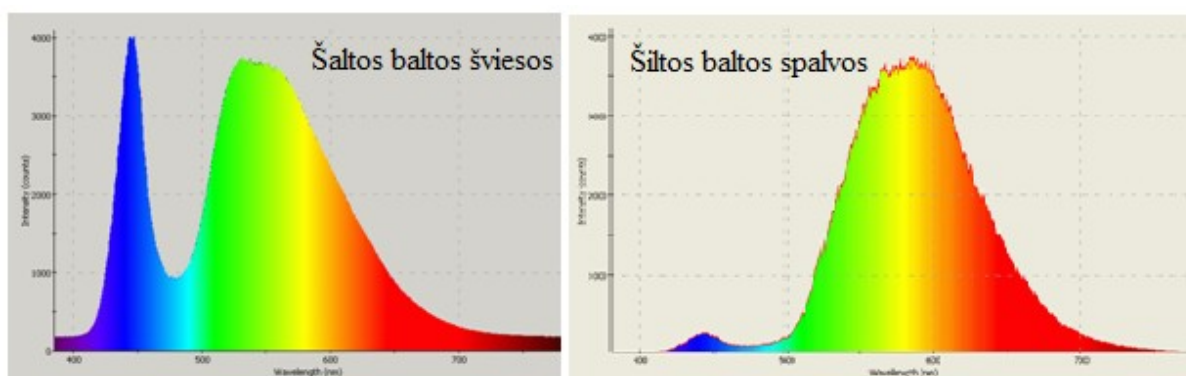
- D65 tipas – tai dažniausiai naudojamo tipo apšvietimo prietaisai, kurių šviesa prilygsta vidudienio šviesai (6500 K) (2.1 pav.);
- C tipas – šiaurės dangaus dienos šviesa (6774 K) (2.2 pav.) .

Tyrėjai, kuriems reikia šviesos šaltinio, artimo dienos šviesos spektrui, dažniausiai renkasi TAK D65 tipo apšvietimą (2.1 pav.) [8].



2.2 pav. C ir F11 tipo šviesos šaltinių spektrai [9][10]

Dabar dažnai naudojami ir šviesos diodai. Pagal skleidžiamą šviesą jie skirstomi į šaltos baltos šviesos ir šiltos baltos šviesos (2.3 pav.).



2.3 pav. Šaltos ir baltos spalvos šviesos diodų spektrai [11][12]

3. PAGRINDINIAI RADIOMETRINIAI DYDŽIAI

Visi optinių matavimų būdai ir parametrai gali būti skirstomi į dvi sritis: radiometriją ir fotometriją. Fotometrijoje matavimai atliekami atsižvelgiant į savitą žmogaus akies reakciją į elektromagnetines bangas, t. y. atsižvelgiant į akies jautrį elektromagnetiniame spektre. Radiometrija nagrinėja parametrus, kurie nusako energijos kiekį per laiką

$$P = \frac{E}{t} \quad (3.1)$$

(galia, nusakoma vatais), išspinduliuota šviesos šaltinio ar krintančio į tam tikrą plotą. Pagal TAK standartus radiometriniai dydžiai žymimi indeksu „e” (energija) (pvz.: energinis srautas Φ_e). O radiometriniai dydžiai, duoti kaip bangos ilgio funkcija, yra žymimi indeksu λ (pvz.: spektrinis spinduliuotės srautas $\Phi_\lambda(\lambda)$).

Paprastai, diferencialiniai dydžiai $d\lambda$, dA ir $d\Omega$ gali būti keičiami $\Delta\lambda$, ΔA ir $\Delta\Omega$ atitinkamais kiekiais. Dėl šios priežasties, kad šie intervalai ar pokyčiai yra labai maži, radiometriniai vienetai gali būti laikomi konstantomis [13].

3.1 Energinė galia arba energinis srautas Φ_e

Energinis srautas Φ_e apibrėžiamas kaip visas šaltinio (kaitrinės lempos, šviesos diodo ir pan.) išspinduliuotas elektromagnetinių bangų srautas. Energinis srautas matuojamas vatais (W). Visi kiti radiometriniai dydžiai yra apibrėžiami (nusakomi) per energinį srautą. Jeigu šviesos šaltinio skleidžiama spinduliuotė visomis kryptimis yra tolygi, tai toks šviesos šaltinis vadinamas izotropiniu.

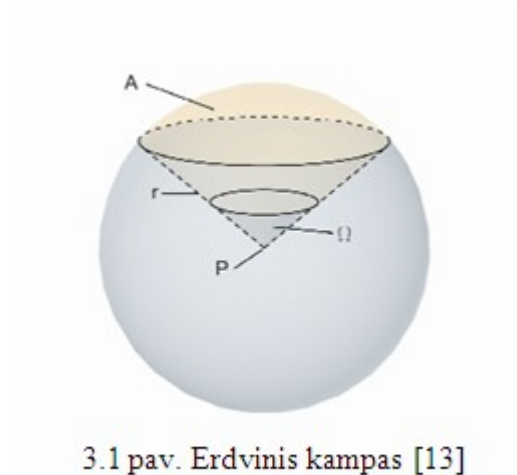
Energinis srautas nusako išspinduliuotą elektromagnetinių bangų srautą, bet neduoda jokios informacijos apie spektrinį jų pasiskirstymą ir spinduliavimo kryptį [13].

3.2 Erdvinis kampas

Erdvinio kampo Ω geometrinę prasmę galima susieti su stebėtojo matymo lauku. Jeigu mes įsivaizduotume, kad stebėtojas yra taške P ir mato sferinio paviršiaus plotą A, tai erdvinis kampas Ω gali būti išreikštas:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}, \quad (3.2)$$

kur r – sferos kreivumo spindulys (3.1 pav.).



3.1 pav. Erdvinis kampas [13]

Kadangi sritis A yra proporcinga r^2 , erdvinis kampas nepriklauso nuo spindulių padėties parinkimo.

Jeigu mes norėtume skaičiuoti per kūgį, parodytą 3.1 paveiksle, tai sritis A būtų sferos skliautas. Kaip bebūtų, erdvinis kampas nebūtinai yra apibrėžiamas kaip kūgio dalis. Sritis A gali būti bet kokios formos paviršius.

Nors Ω yra reliatyvus dydis, jį nuskayti naudojamas dydis steradianas (sr). Pilnas stebėtojo matymo laukas apima visą sferos paviršių, kuris nusakomas $4\pi r^2$, o tai mums duoda erdvinį kampą

$$\Omega_{\text{visas}} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ sr} = 12,57 \text{ sr.} \quad (3.3)$$

3.3 Energinis stipris

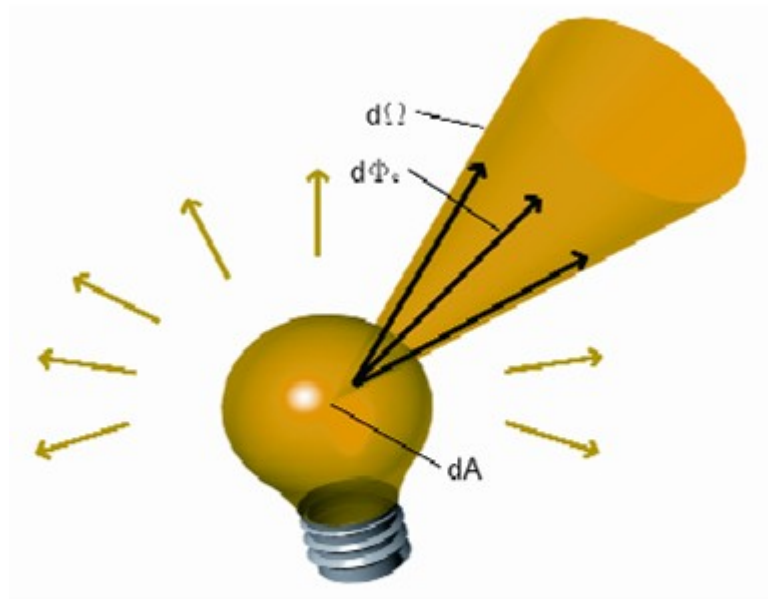
Energinis šviesos šaltinio stipris I_e apibrėžiamas kaip šaltinio energinis srautas išspinduliuotas tam tikra kryptimi, į erdvinį kampą. Šviesos šaltinio išspinduliuotas energinis srautas $d\Phi_e$ yra proporcingas erdvinio kampo $d\Omega$ ir energinio stiprio I_e sandaugai:

$$d\Phi_e = I_e d\Omega. \quad (3.4)$$

Visas šaltinio išspinduliuotas energinis srautas yra lygus integralui

$$\Phi_e = \int_{4\pi \text{ sr}} I_e d\Omega. \quad (3.5)$$

Energinio stiprio matavimo vienetas W/sr [13].



3.2 pav. Energinis stipris I_e [13]

3.4 Energinis šviesis

Energinis šviesis M_e , tai dydis apibūdinantis energinį srautą ploto vienetui, išspinduliuotą ar atsispindėjusį nuo kokio tai paviršiaus. Tiksliau, (diferencialinis) energinis srautas $d\Phi_e$, išspinduliuotas ar atspindėtas nuo paviršiaus dA , lygus

$$d\Phi_e = M_e dA. \quad (3.6)$$

Iš energinio spinduliavimo apibrėžimo seka, kad (diferencialinis) energinis šviesis dM_e , išspinduliuotas ar atspindėtas nuo paviršiaus į erdvinį kampą $d\Omega$, proporcingas energinio skaisčio ir erdvinio kampo sandaugai

$$dM_e = L_e \cos(\theta) d\Omega \quad (3.7)$$

Suintegruvę (3.6), gauname, kad šviesis visomis kryptimis

$$M_e = \int_{2\pi \text{ sr}} L_e \cos(\theta) d\Omega. \quad (3.8)$$

Suintegruota per erdvinį kampą, nuo 0 iki 2π steradinų, kur kampas θ - kampas tarp stebėjimo krypties ir paviršiaus normalės.

Energinio šviesio matavimo dydis W/m^2 . Kai kuriais atvejais $M_e = E_e$ [13].

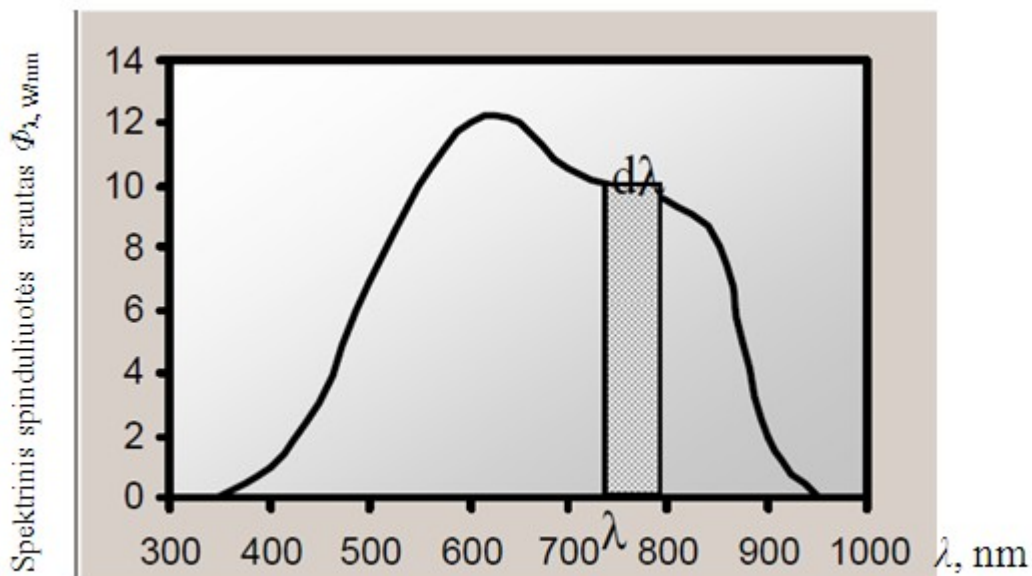
3.5 Spektrinis spinduliuotės srautas $\Phi_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės intensyvumas $I_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės skaistis $L_\lambda(\lambda)$, spektrinis spinduliuotės šviesis $M_\lambda(\lambda)$

Visų pirma radiometriniai dydžiai apibūdina optinės spinduliuotės kiekybę, neatsižvelgiant į bangos ilgį (-ius). Tuo atveju, kai norima nusakyti ne tik visą tam tikro parametro dydį, o ir šviesos energijos pasiskirstymą spektre, naudojami atitinkami spektriniai parametrai. Spektrinis spinduliuotės srautas yra apibrėžiamas kaip šaltinio išspinduliuotas energijos, tenkančios tam tikram bangos ilgių intervalui $d\lambda$, funkcija nuo bangos ilgio. Tada šaltinio diferencialinis energinis srautas $d\Phi_e$, išspinduliuotas bangos ilgių intervale tarp λ ir $\lambda + d\lambda$ aprašomas taip:

$$d\Phi_e = \Phi_\lambda(\lambda)d\lambda. \quad (3.9)$$

Tokios funkcijos pavyzdys 3.3 paveiksle. Kadangi $d\lambda$ yra labai mažas dydis, tai spektrinį spinduliuotės srautą $\Phi_\lambda(\lambda)$ galime laikyti pastoviu dydžiu intervale tarp λ ir $\lambda + d\lambda$. Taigi, $\Phi_\lambda(\lambda)$ ir $d\lambda$ sandaug yra lygi kreivės $\Phi_\lambda(\lambda)$ ribojamam plotui intervale tarp λ ir $\lambda + d\lambda$. Šis plotas yra maža dalis viso išspinduliuoto energinio srauto Φ_e , kuri grafiškai nusako visas plotas, apribotas spektrinio spinduliuotės srauto kreive $\Phi_\lambda(\lambda)$. Matematiškai šis plotas nusakomas integralu

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda)d\lambda \quad (3.10)$$



3.3 pav. Ryšys tarp energinio srauto ir spektrinio spinduliuotės srauto [13]

Spektrinis spinduliuotės srautas matuojamas W/nm arba W/Å.

Kiti spektriniai radiometriniai dydžiai nusakomi atitinkamai, o jų matavimo dydžiai padauginami iš nm⁻¹ (pvz.: energinis šviesis M_e matuojamas W/m², o spektrinis spinduliuotės šviesis $M_\lambda(\lambda)$ matuojamas (W/m²)·nm⁻¹) [13].

Apskritai, radiaciniai dydžiai gali būti perskaičiuojami į atitinkamus spektrinius spinduliuotės dydžius integruojant juos reikiamame bangų intervale. Tarkime UVA spinduliuotė yra nuo $\lambda_1 = 315$ nm iki $\lambda_2 = 400$ nm. Perskaičiavimas iš spektrinio spinduliuotės šviesio į energinį šviesį atrodytų taip:

$$M_e = \int_{315 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} M_\lambda(\lambda) d\lambda. \quad (3.11)$$

4. FOTOMETRINIAI DYDŽIAI

Fotometrija – tai optikos mokslo dalis, kuri nagrinėja sąvokas ir dydžius, apibūdinančius optinio diapozono elektromagnetinių bangų spinduliavimą, jų sklidimą ir sąveiką su medžiagomis [14]. Elektromagnetinė banga, išspinduliuota iš šviesos šaltinio, plisdama erdvėje, perduoda energiją, kuri yra proporcinga elektrinio bei magnetinio laukų stiprių kvadratams. Elektromagnetinė banga plinta erdvėje ir apšviečia kūnus, kurių išsklaidyta energija pasiekusi akis sukelia šviesos pojūtį. Akies jautrumas priklauso nuo šviesos bangos ilgio todėl energetiniai dydžiai vertinti šviesumui yra nepatogūs. Kadangi fotometrijoje vertinama regėjimu juntama spinduliavimo energija, todėl yra naudojama fotometrinė intensyvumų matavimo vienetų sistema [15].

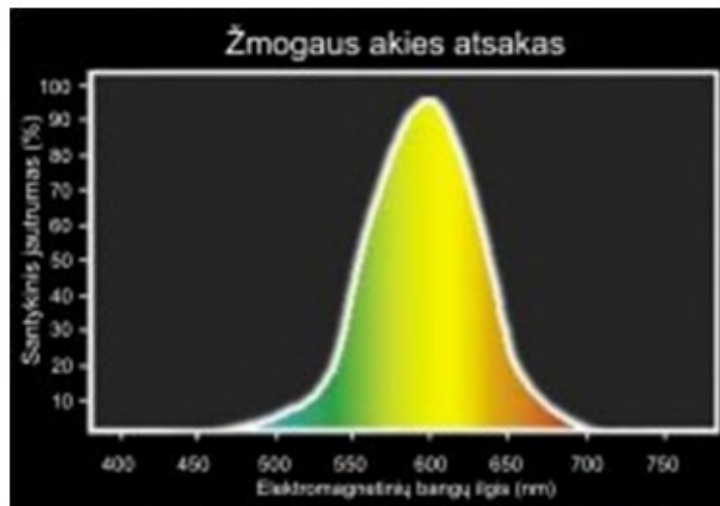
Akies jautris, t.y. fiziologinė reakcija į šviesą, kuri priklauso nuo šviesos bangos ilgio. Didžiausias jautris $V_{\max}(\lambda)$ esti, kai bangos ilgis $\lambda = 5,55 \times 10^{-7}$ m (geltonai žalia šviesa). 4.1 paveikslėlyje pateikta normalios žmogaus akies santykinio spektrinio jautrio funkcijos kreivė

$$V_{\text{sant}}(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_{\max}(\lambda)}, \quad (4.1)$$

kur

$$V(\lambda) = 1,099 \cdot \exp(284,4 \cdot (\lambda - 555)), \quad (4.2)$$

kur λ – bangos ilgis nanometrais, yra akies jautris tam tikro bangos ilgio šviesai. Ji yra kiek asimetriška, jos dešinioji dalis tęsiasi nuo maksimumo į ilgesnių bangų pusę toliau nei kairioji į trumpesnių. Iš kreivės matyti, kad, pavyzdžiui, $4,50 \times 10^{-7}$ m bangos ilgio šviesos galia turi būti ≈ 25 kartus didesnė už $5,55 \times 10^{-7}$ m bangos ilgio šviesos galia, kad sukeltų tokį pat regėjimo pojūtį [14].



4.1 pav. Santykinio spektrinio jautrio kreivė [16]

Iš praktikos žinome, kad skirtingi šviesos šaltiniai nevienodai apšviečia daiktus (pvz.: degtukas, žvakė, Saulė). Tam, kad apibūdinti šitą spinduliavimo intensyvumą vartojams dydis – šviesos stipris. Tarptautinėje SI vienetų sistemoje pagrindinis fotometrinis vienetas yra kandela (cd). Tai tokios šviesos stipris, kurią spinduliuoja $1/60 \text{ cm}^2$ ploto platininio kandelos etalono anga platinos kietėjimo temperatūroje (2041,1 K), kai slėgis lygus 101325 Pa [15]. Iki 1948m buvo vartojamas nesisteminis šviesos stiprio vienetas – žvakė, lygi 0,903 cd [17].

1 lentelė. Kai kurių šviesos šaltinių šviesos stipriai [14; 18]

Šviesos šaltinis	Šviesos stipris (cd)	Šviesos šaltinis	Šviesos stipris (cd)
Saulė	3×10^{27}	Kaitrinė lemputė (100W)	110
Švyturys	$10^5 - 10^7$	Kišeninio žibintuvėlio lemputės	0,5 – 4
Kaitrinė lemputė (60W)	58	Jonvalio	$10^{-2} - 10^{-3}$

Pagrindinis fotometrijos dydis – apibūdinantis šviesą yra šviesos srautas (Φ). Tai spindulių srauto dalis, sukelianti žmogaus akims šviesos pojūtį. Jo spinduliavimo bet kuria kryptimi intensyvumą charakterizuoja šviesos stipris. Šviesos srauto matavimo vienetas – liumenas (lm). Vienas liumenas – tai taškinio šviesos šaltinio, kurio šviesos stipris 1 cd, skleidžiamas šviesos srautas, tenkantis 1 steradiano kampui, kai spinduliuotė tolygiai pasiskirsčiusi. Pilnas šaltinio spinduliuojamas šviesos srautas bus jo visomis kryptimis spinduliuojamos regėjimu juntamos šviesos galia.

Šviesos stiprį galime susieti su šviesos srautu. Šviesos stipris – tai šviesos srauto ir erdvinio kampo, į kurį šaltinis spinduliuoja šviesą, santykis:

$$I = \Phi / \Omega \text{ (1cd=1 lm/1 sr) .} \quad (4.3)$$

Steradianas (sr) – SI sistemos papildomas erdvinio kampo bematis vienetas, lygus erdviniam centriniam kampui, kuris sferos paviršiuje išpjauna figūrą, lygiaplotę kvadratum, kurio kraštinė lygi sferos spinduliui. Sferą sudaro 4π steradianų.

Paviršiaus apšvieta E lygi šviesos srautui $d\Phi$ ir apšviečiamojo paviršiaus ploto dS santykiui:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (4.4)$$

Kai šviesos srautas tolygus:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (4.5)$$

Jei I stiprumo taškiniu šaltiniu apšviečiamas plokščias paviršius, esantis atstumu r nuo jo, tai paviršiaus apšviestumas E nusakomas apšviestumo dėsniu:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (4.6)$$

čia α – kampas, kurį sudaro spindulių kryptis su paviršiaus normale. Didžiausias apšviestumas bus, kai spinduliai krinta statmenai paviršiui. Veidrodinis paviršius nukreipia šviesą pagal atspindžio dėsnį, o difuzinis paviršius išsklaido šviesą.

Matavimo vienetas liuksas (lx). $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$.

Liuksas yra tokia paviršiaus apšvieta, kai į vieno kvadratinio metro paviršiaus plotą krinta vieno liumeno baltos šviesos srautas [19].

5. RYŠYS TARP FOTOMETRINIŲ IR RADIOMETRINIŲ DYDŽIŲ

Tarkime, kad turime monochromatinę spinduliuotę kažkuriam bangos ilgiui λ . Radiometrinis parametras X_e yra lengvai paverčiamas į atitinkantį fotometrinių parametrą X_v . Tai apskaičiuojama sudauginus atitinkamą šviesinį našumą $V(\lambda)$ ir didžiausią galima šviesinį veiksmingumą, $K_m = 683 \text{ lm/W}$. Gauname

$$X_v = X_e \cdot V(\lambda) \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}, \quad (5.1)$$

kur X atitinka vieną iš dydžių Φ, I, L, E .

Pavyzdžiui, jeigu monochromatinio šviesos šaltinio galia 5 mW , o spinduliuojamos šviesos $\lambda = 670 \text{ nm}$, kur $V(\lambda) = 0,032$, tai

$$\Phi_v = \Phi_e \cdot V(\lambda) \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} = 0,109 \text{ lm} = 109 \text{ mlm}. \quad (5.2)$$

Kadangi jautris $V(\lambda)$ skirtingas visame spektro ruože, tai polichromatiniams (kurių spinduliuotė sudaryta iš daugelio λ) šaltiniams, perėjimas nuo radiometrinio dydžio prie fotometrinio yra sudėtingesnis (reikia integruoti visame šaltinio skleidžiamų bangų intervale). Tarkime šaltinio spinduliuotės pasiskirstymą spektre aprašo funkcija $\Phi_\lambda(\lambda)$, tada fotometrinis dydis Φ_v galėtų būti skaičiuojamas funkciją $\Phi_\lambda(\lambda)$ dauginant iš $V(\lambda)$ ir integruojant pagal λ . Gauname, kad

$$\Phi_v = K_m \int_{\lambda} \Phi_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda. \quad (5.3)$$

Analogiškai, bet kuris fotometrinis parametras X_v perskaičiuojamas į atitinkamą spektrinį spinduliuotės parametą $X_\lambda(\lambda)$ tokiu pat principu:

$$X_v = K_m \int_{\lambda} X_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (5.4)$$

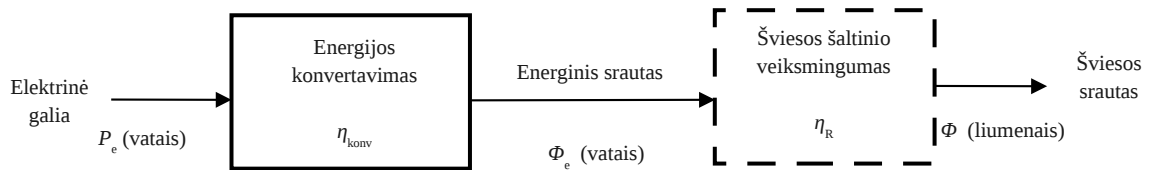
kur X atitinka bet kurią iš dydžių: Φ, I, L, E [13].

6. ŠVIESOS ŠALTINIŲ NAŠUMAS IR VEIKSMINGUMAS

Vertinant šviesos šaltinio našumą reikėtų atsižvelgti į du faktorius:

- kiekvienas šviesos šaltinis vartoja elektros energiją. Tam tikros galios P_e konvertuojama į spinduliuotės energinį srautą Φ_e ;
- dėl akies būdingos reakcijos, ne visa išspinduliuota energija yra suvokiama kaip šviesa.

Kiekvieną faktorių galima įvertinti tam tam tikrais koeficientais. Visai tai matome 6.1 paveiksle.



6.1 pav. Šviesos šaltinio veiksmingumą nusakantys faktoriai [20]

Iš 6.1 paveikslo matome, kad energijos konvertavimo našumas yra lygus

$$\eta_{\text{konv}} = \frac{\Phi_e}{P_e}, \quad (6.1)$$

η_{konv} parodo, kuri dalis suvartoto galingumo P_e virsta spinduliuotės srautu Φ_e .

Šviesinis veiksmingumas

$$\eta_R = \frac{\Phi}{\Phi_e} \left(\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right) \quad (6.2)$$

parodo, kuri spinduliuotės srauto Φ_e dalis yra suvokiama kaip šviesa Φ . Reiktu paminėti, kad Φ yra šviesos srautas į kurį reaguoja žmogaus akis.

Visas šviesos šaltinio šviesinis veiksmingumas išreiškiamas formule:

$$K = \frac{\Phi}{P_e} \left(\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right) \quad (6.3)$$

Arba

$$K = \left(\frac{\Phi}{\Phi_e} \right) \cdot \left(\frac{\Phi_e}{P_e} \right) = \eta_R \cdot \eta_{\text{konv}} \cdot [1] \quad (6.4)$$

Iki šiol dar plačiai paplitę šviesos šaltiniai, kuriuose naudojamas įkaitintų kūnų spinduliavimas (kaitrinės lepos, halogeninės lepos). Tokių kūnų spektrinis spinduliuotės pasiskirstymas aprašomas Planko formule

$$\Phi_{\lambda,T} = \left(\frac{hc}{\pi kT} \right)^4 \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \text{ m}^{-1}, \quad (6.5)$$

kur h – Planko konstanta, lygi $6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s;

c – šviesos greitis, lygus $3 \cdot 10^8$ m/s;

λ – bangos ilgis, nm;

k – Bolcmano konstanta, lygi $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;

T – juodo kūno temperatūra, K.

Iš Planko formulės matyti, kad spinduliavimas priklauso nuo temperatūros T .

Juodo kūno spinduliavimą apibūdina dar du dėsniai. Tai Stefano ir Bolcmano dėsnis, kuris teigia, kad juodojo kūno visų ilgių bangų išspinduliuotas energinis srautas proporcingas temperatūrai ketvirtuoju laipsniu:

$$\Phi_T = \sigma T^4, \quad (6.6)$$

kur σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, lygi $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴.

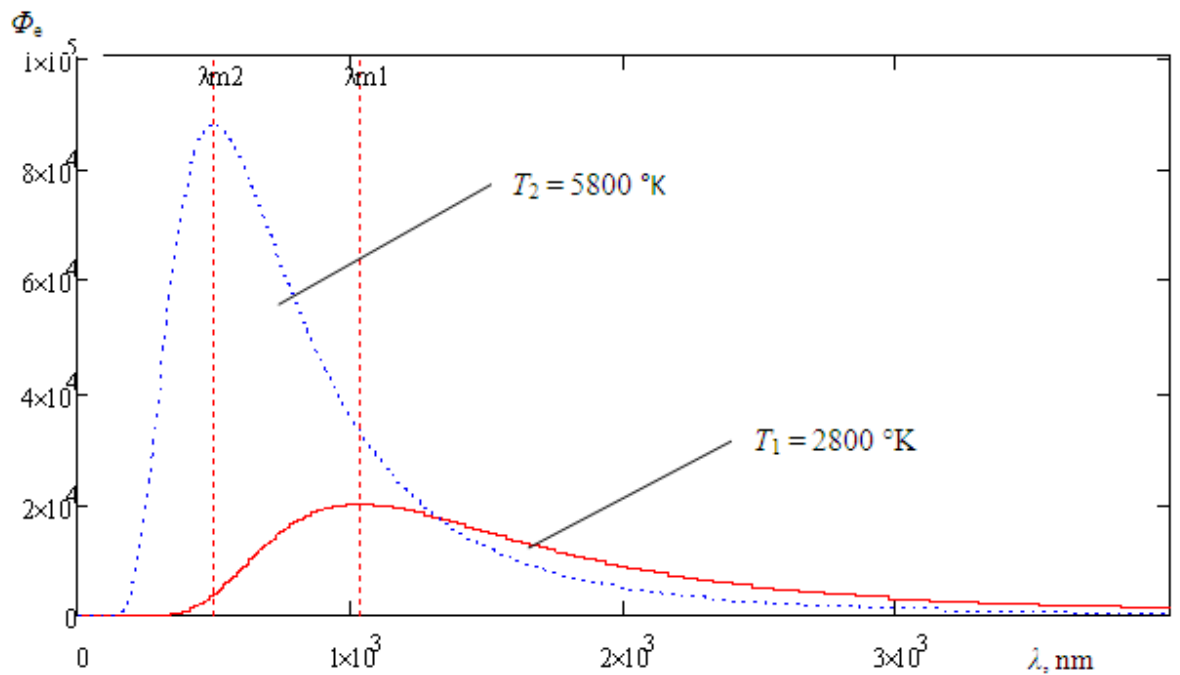
Ir Vyno poslinkio dėsnis, kuris teigia, kad didėjant temperatūrai, juodojo kūno gebos maksimumas slenka į trumpesniųjų bangų sritį

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (6.7)$$

kur b – Vyno konstanta, lygi 0,29 cm·K [21].

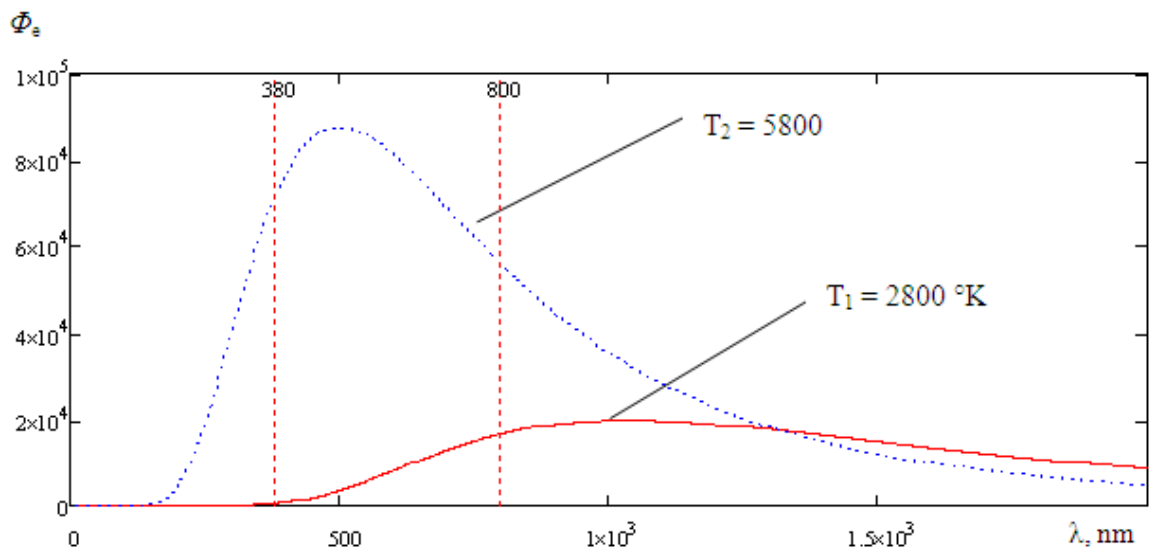
Panagrinėkime dviejų kūnų (laikydami juos absoliučiai juodais kūnais), esančių skirtingose temperatūrose, spinduliavimą.

1. Kaitrinė lemputė, kurios temperatūra $T_1 = 2800$ °K.
2. Saulės paviršius, kurio $T_2 = 5800$ °K.



6.2 pav. Energinio srauto priklausomybė nuo bangos ilgio

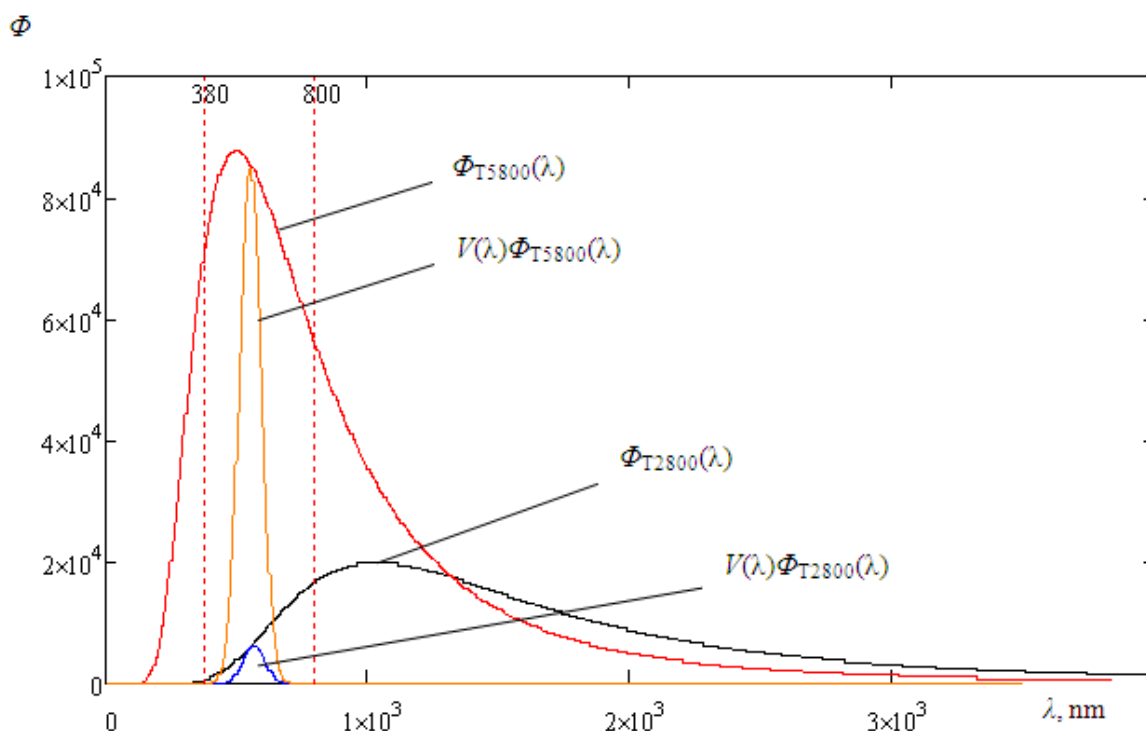
6.2 paveikslėlyje $\lambda_{m1} = 500$ yra kaitrinės lempuotės išspinduliuoto energinio srauto maksimumas, o $\lambda_{m2} = 1036$ yra Saulės paviršiaus išspinduliuoto energinio srauto maksimumas. Paveikslėlyje 6.2 matome, kad didėjant juodo kūno temperatūrai didėja išspinduliuotas energinis srautas, taip pat matome, kad kaip ir sako Vyno poslinkio dėsnis, juodojo kūno išspinduliuoto energinio srauto maksimumas slenka į trumpesniųjų bangų ritį.



6.3 pav. Energinio srauto priklausomybė nuo bangos ilgio

6.3 paveikslėlyje matyti, kad prie didesnės temperatūros labai sparčiai padidėja išspinduliuotas energinis srautas bangų ruože $380 \leq \lambda \leq 800$ nm. Galime pastebėti, kad prie

mažesnių temperatūrų didžioji dalis išspinduliuoto energinio srauto yra didesniame nei 800 nm bangų ruože, o tokiam spinduliavimui žmogaus akis nėra jautri.



6.4 pav. Išspinduliuotų ir žmogaus akies suvokiamų šviesos srautų palyginimas

6.4 paveikslėlyje matome kaip skiriasi visas išspinduliuotas srautas ir žmogaus akies suvokiamas šviesos srautas. Kreivių $V(\lambda)\Phi_{T5800}(\lambda)$ ir $\Phi_{T5800}(\lambda)$ ribojamų plotų santykis būtų juodo kūno ($T_2 = 5800$ °K) našumas η_{T5800} . Kreivių $V(\lambda)\Phi_{T2800}(\lambda)$ ir $\Phi_{T2800}(\lambda)$ ribojamų plotų santykis būtų juodo kūno ($T_1 = 2800$ °K) našumas η_{T2800} .

Funkcijos $V(\lambda)$ analizinė išraiška

$$V(\lambda) = 1,099 \cdot \exp(284,4 \cdot (\lambda - 555)). \quad (6.8)$$

$$\eta_{T2800} = 0,021 \text{ arba } 2,1\%$$

$$\eta_{T5800} = 0,132 \text{ arba } 13,2\%$$

Šių juodų kūnų veiksmingumas K yra proporcingas didžiausio šviesinio veiksmingumo K_m (683 lm/W) ir atitinkamo našumo sandaugai:

$$K = K_m \cdot \eta. \quad (6.9)$$

Pagal 6.9 formulę

$$K_{T2800} = 683 \cdot 0,021 = 14,122 \text{ lm/W},$$

$$K_{T5800} = 683 \cdot 0,132 = 90,317 \text{ lm/W}.$$

Pastebime, kad prie mažesnės temperatūros, mažesnis ir našumas ir veiksmingumas.

Žemiau esančioje 6.1 lentelėje pateikiami kai kurių šviesos šaltinių našumai ir veiksmingumai.

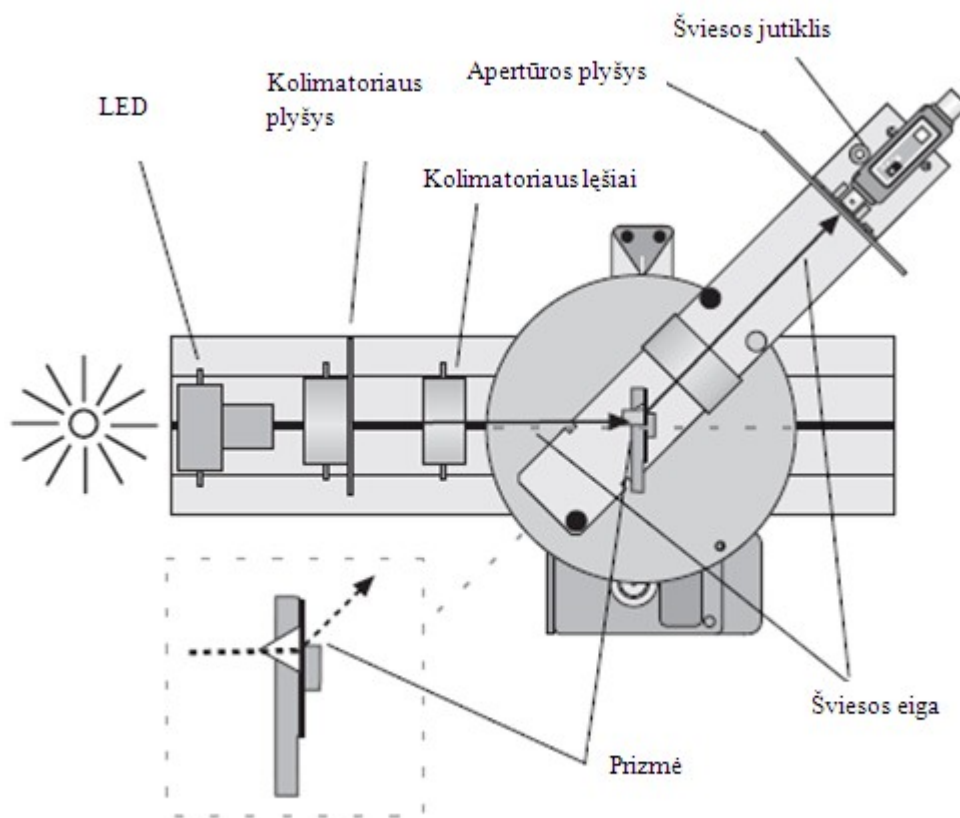
6.1 Šviesos šaltinių našumai ir veiksmingumai [22]

Kategorija	Tipas	Veiksmingumas, lm/W	Našumas, %
Degimas	Žvakė	0,3	0,04%
Kaitrinės lempos	100 – 200W kaitrinė lempa (230V)	13,8–15,2	2,0–2,2%
	5 – 40 - 100W kaitrinė lempa (120V)	5–12,6–17,5	0,7–1,8–2,6%
	Fotoaparatų ir projektorių lempos	35	5,1%
Diodai	Baltos spalvos diodas	4,5–150	0,66–22,0%
	7 W kryptingos šviesos diodas (110-230 V)	60,0	8,8%
	8,7 W įsukamas diodas (120 V)	69,0–93,1	10,1–13,6%
Plazminės lempos	Ksenoninė lempa	30–50	4,4–7,3%
Dujinio išlydžio lepos	Aukšto slėgio natrio lempa	85–150	12–22%
	Žemo slėgio natrio lempa	100–200	15–29%
Fluorescencinės lempos	T12	60	9%
	T8	80–100	12–15%
	T5	70–104,2	10–15,63%
Idealūs šviesos šaltiniai	Idealizuotas 5800 °K absoliučiai juodas kūnas	251	37%
	Žalia šviesa 555 nm (Maksimalus galimas šviesinis našumas)	683,002	100%

7. EKSPERIMENTINIS ŠVIESOS DIODO NAŠUMO IR VEIKSMINGUMO ĮVERTINIMAS

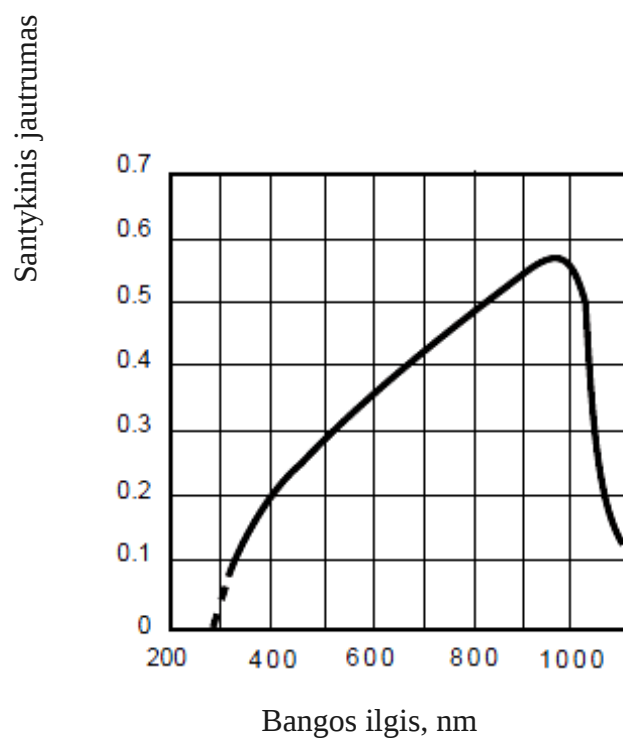
7.1 Eksperimento aprašymas

Darbo rašymo metu buvo iškeltas tikslas – įvertinti diodo našumą ir veiksmingumą didinant įtampą. Norint įvertinti diodo našumą ir veiksmingumą buvo atlikti matavimai pasinaudojant firmos „Pasco” optiniu suoleliu - spektrometru, bei „Data Studio” programine įranga. Vėliau duomenys buvo apdorojami matematinio paketo „MathCad” pagalba. Matavimo schema pavaizduota 7.1 paveikslėlyje.



7.1 pav. Darbo schema [23]

Diodo spinduliuotės spektras buvo gaunamas lygiašone prizme, kuri orientuota taip, kad šviesa krinta statmenai vienai iš prizmės sienelių BC (7.4 pav). Praėjęs pro prizmę spindulių pluoštas dėl dispersijos yra išskaidomas į spektrą. Spektras buvo nuskanuotas, matuojant nuokrypio kampą ir šviesos intensyvumą kiekvienam bangos ilgiui λ . Šviesos intensyvumas įvertintas Pasco šviesos jutikliu. Didelio jautrio (High Sensivity) šviesos jutiklyje panaudotas Si PIN fotodiodas, kurio jautrumo kreivė pavaizduota 7.2 paveikslėlyje.

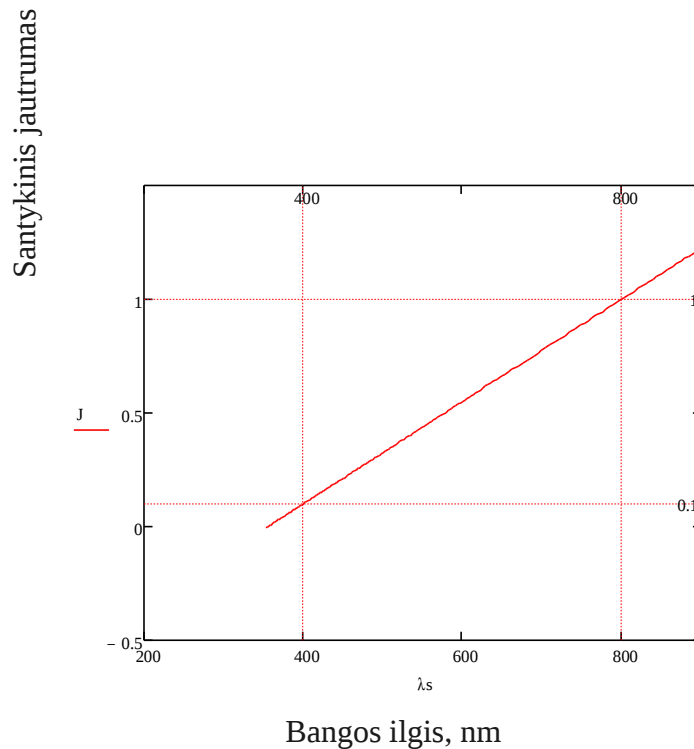


7.2 pav. Fotodiodo spektrinio jautrumo kreivė [23]

Kaip matyti iš paveikslėlio fotodiodo jautrumas įvairiose srityse yra skirtingas. Tačiau mus dominančioje spektro srityje (400 – 950 nm) jautrumo priklausomybė nuo bagos ilgio $J(\lambda)$ yra tiesiška. Šią priklausomybę, aproksimuojant spektrinio jautrumo kreivę, galima išreikšti tokia lygtimi:

$$J(\lambda) = 0,00225 \cdot \lambda - 0,8. \quad (7.1)$$

Šios funkcijos grafikas pateiktas 7.3 paveikslėlyje.



7.3 pav. Aproximuotas sensoriaus santykinis jautrumas

Eksperimente matuojamas šviesos intensyvumas ir įvairaus λ šviesos nuokrypio kampai.

Jutiklis turi tris jautrumo lygius (1x, 10x ir 100x), kurie skirti matavimams, kai apšviestumas iki 5 lx, 0,5 lx ir 0,05 lx atitinkamai. Eksperimentas atliktas, kai jautrumo lygis 10x. Tada jutiklio generuojamą maksimalią 5 V įtampą atitinka 0,5 lx apšviestumas.

Norint gauti šviesos intensyvumo pasiskirstymą spektre, reikia susieti λ su nuokrypio kampu θ . Prizmės laužiamasis kampas $\angle ACB$ yra 60° , tai iš brėžinio (7.4 paveikslėlis) matyti, kad

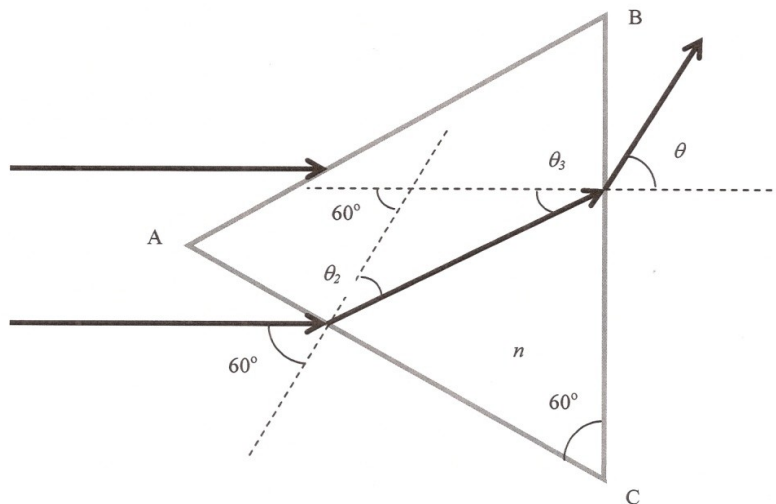
$$\theta_2 + \theta_3 = 60^\circ . \quad (7.2)$$

Prizmės paviršiuose AC ir BC galime pritaikyti lūžimo dėsnį ir užrašyti šias lygtis:

$$\sin(60^\circ) = n \sin(\theta_2) \quad (7.3)$$

ir

$$\sin(\theta) = n \sin(\theta_3) . \quad (7.4)$$



7.4 pav. Spindulių lūžimas prizmėje [23]

Iš (7.2) išreiškę θ_3 ir įrašę į (7.4), gauname:

$$\sin(\theta) = n \sin(60^\circ - \theta_2). \quad (7.5)$$

Šią lygtį galime pertvarkyti:

$$\sin(\theta) = n [\sin(60^\circ) \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) \cos(60^\circ)]. \quad (7.6)$$

(7.6) lygtyje $\cos(\theta_2)$ pakeiskime sinusą:

$$\begin{aligned} \sin(\theta) &= n \sin(60^\circ) \sqrt{1 - \sin^2(\theta_2)} - n \sin(\theta_2) \cos(60^\circ) = \\ &= \sin(60^\circ) \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2(\theta_2)} - n \sin(\theta_2) \cos(60^\circ) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Į (7.7) įrašę (7.3) gauname:

$$\sin(\theta) = \sin(60^\circ) \sqrt{n^2 - \sin^2(60^\circ)} - n \sin(60^\circ) \cos(60^\circ). \quad (7.8)$$

Iš (7.8) išreiškę lūžio rodiklį n gauname:

$$n = \sqrt{\left(\frac{\sin(\theta)}{\sin(60^\circ)} + \cos(60^\circ) \right)^2 + \sin^2(60^\circ)}. \quad (7.9)$$

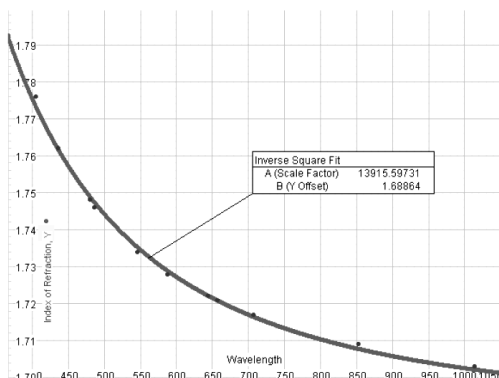
Supaprastinę gauname:

$$n = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta) + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{3}{4}}. \quad (7.10)$$

Lūžio rodiklio priklausomybę nuo bangos ilgio normaliosios dispersijos atveju galima aprašyti Koši lygtimi:

$$n(\lambda) = \frac{A}{\lambda^2} + B \quad (7.11)$$

Čia A ir B yra konstantos, priklausančios nuo stiklo rūšies. 7.5 paveikslėlyje pateikta prizmės medžiagos lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio.



7.5 pav. Prizmės medžiagos lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio [23]

Grafike taškai žymi eksperimento duomenis, o ištisinė linija aproksimacija, gauta panaudojant Koši formulę. Panaudojamos prizmės stiklui šios konstantos $A = 13900$ ir $B = 1,689$. Iš (7.11) lygties išreiškę bangos ilgį, atsižvelgę į (7.10) išraišką ir konstantų vertes gauname:

$$\lambda = \sqrt{\frac{13900}{\sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta) + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}} - 1,689}} \quad (7.12)$$

Čia bangos ilgis yra išreikštas nanometrais [23].

7.2 Matavimo rezultatai ir jų analizė

Norint nustatyti diodo našumą ir veiksmingumą buvo atlikti matavimai keliant diodo įtampą nuo 3 V iki 4,2 V įtampos. Kiekvienu atveju buvo matuojamas elektros srovės stipris I ir apskaičiuota naudojama elektrinė galia P (7.1 lentelė). Elektrinei galiai apskaičiuoti buvo naudojama tokia formulė:

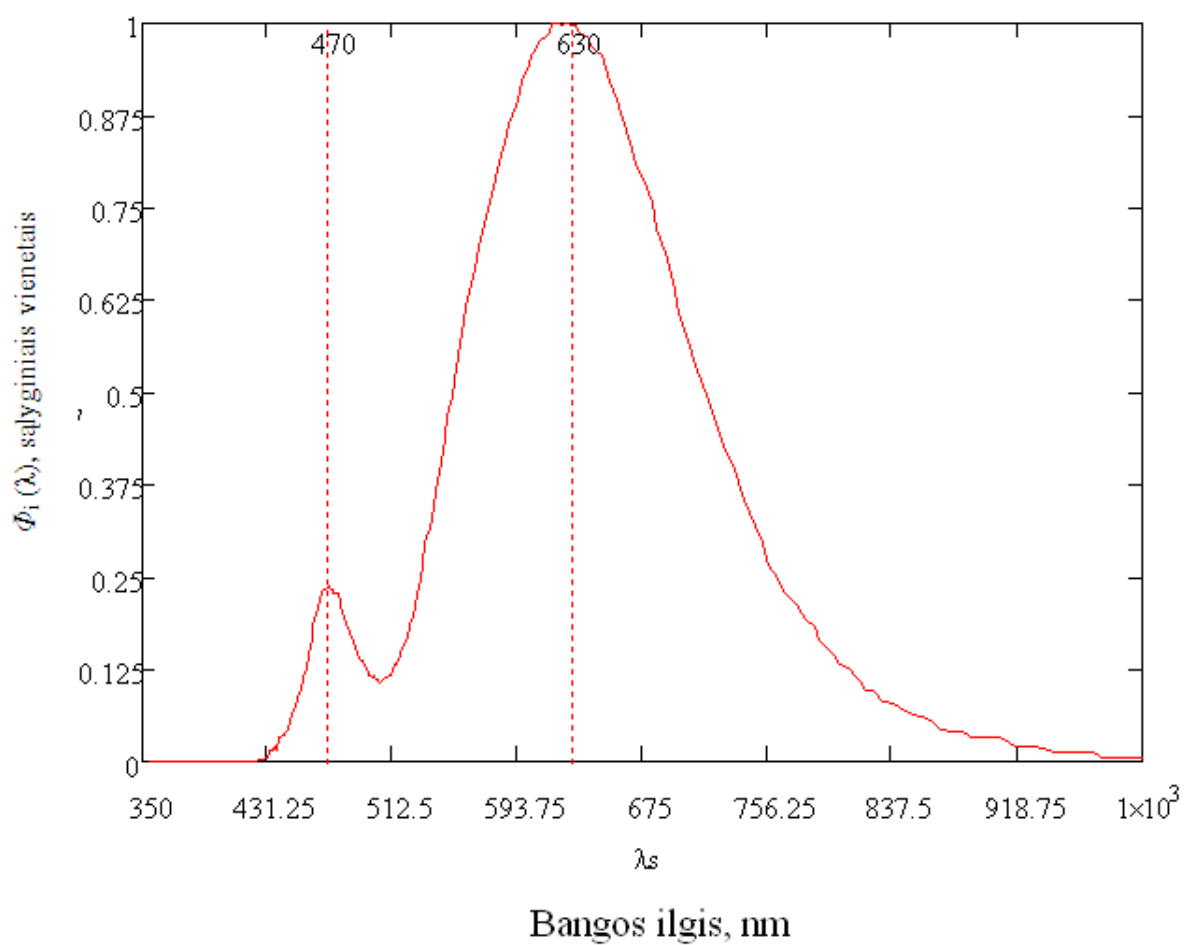
$$P = U \cdot I \quad (7.13).$$

7.1 lentelė. Galios priklausomybė nuo darbinės įtampos

U, V	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,2
I, A	0,24	0,38	0,49	0,69	0,81	0,98
P, W	0,72	1,254	1,715	2,622	3,24	4,116

Eksperimente buvo naudotas diodas, kurio specifikacijos nurodytos 7.2 lentelėje.

7.2 lentelė. Diodo specifikacijos pagal gamintoją



7.6 pav. Šviesos srauto Φ_i priklausomybė nuo bangos ilgio

Parametras	Žymėjimas	Vertė			Matavimo vienetas
		Minimali	Įprasta	Maksimali	
Darbo įtampa	U	3,3	3,8	4,2	V
Šviesos srautas	Φ	80	120	---	lm
Spalvinė temp.	CCT	4000	6000	---	K
Srovės stipris		---	---	700	mA

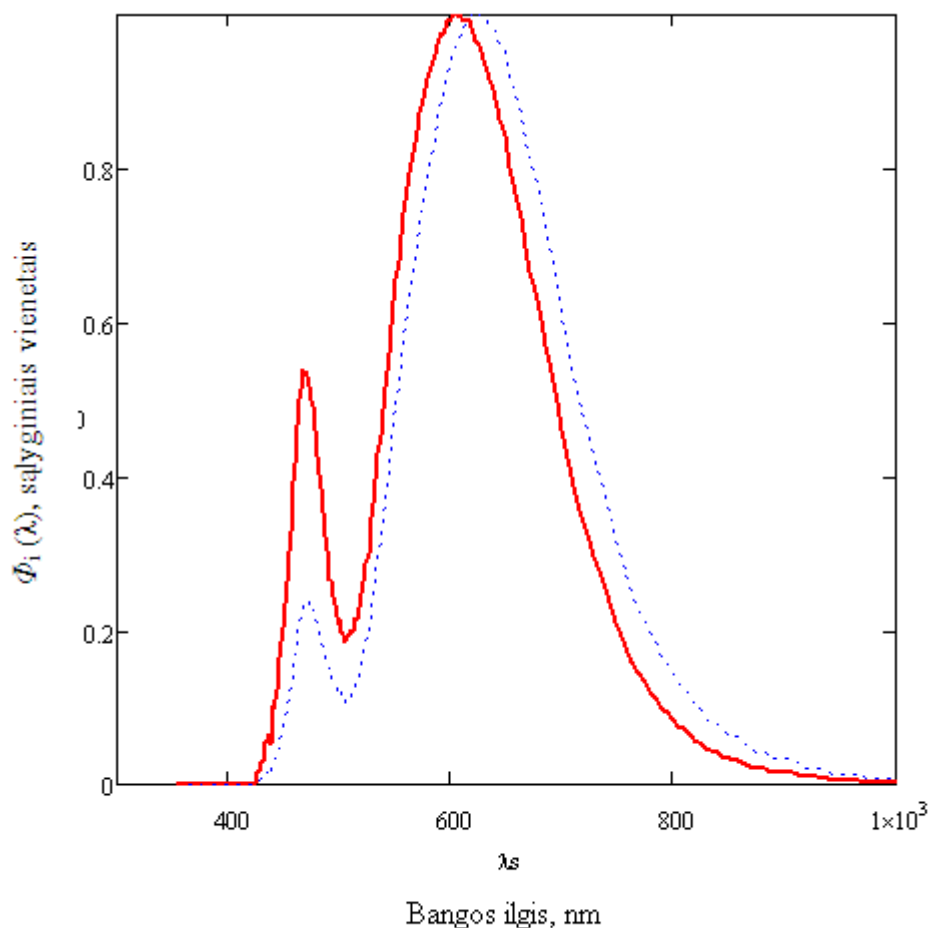
Savo ruožtu sensoriuje generuota įtampa yra proporcinga krintančiam šviesos srautui. Esant 3 V diodo įtampai gauta sensoriaus įtampos nuo spektro bangos ilgio grafikas (7.6 paveikslėlis). Iš šio grafiko matome, kad išmatuotas šviesos srautas pasiskirstęs 430 – 900 nm bangų ilgio intervale ir turi du maksimumus: silpnesnis ties 470 nm (mėlyna spektro spalva) ir intensyvesnis ties 630 nm (oranžinė spektro spalva).

Kadani jutiklio jautrumas $J(\lambda)$ yra kintantis spektro srityse, į jį reikia atsižvelgti. Gauname, kad srautas Φ yra lygus

$$\Phi = \frac{\Phi_i(\lambda)}{J(\lambda)}, \quad (7.14)$$

čia Φ_i – išmatuotas šviesos srautas.

Galime palyginti kaip skiriasi šviesos srautas, kai atsižvelgiame į jutiklio spektrinę jautrumą (mėlynos spalvos kreivė) ir kai neatsižvelgiame į jį (raudonos spalvos kreivė) (7.7 pav.).



7.7 pav. Santykinis šviesos srauto pasiskirstymas spektre

Įvertinus gautus duomenis buvo skaičiuojamas šviesos diodo našumas ir veiksmingumas. 6 skyriuje buvo paminėta, kad našumą galima apskaičiuoti kaip dviejų kreivių ribojamų plotų santykį, kur viena iš jų apibrėžia žmogaus suvokiamio akies srauto dydį (mėlynas plotas), o kita – viso išspinduliuoto energinio srauto dydį (raudonos kreivės ribojamas plotas) (7.15 formulė, 7.8 pav.).

Energinio srauto našumas yra apibrėžiamas kaip santykis elektromagnetinių bangų srautui, kuriai žmogaus akis yra jautri su visu išspinduliuotu srautu:

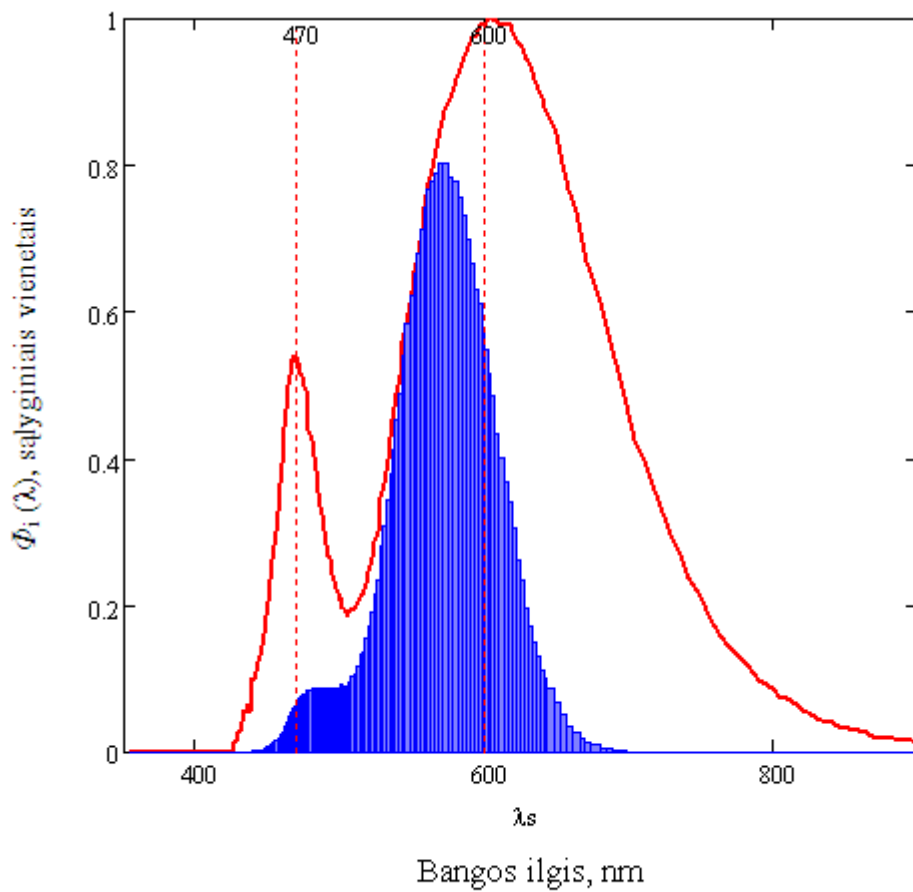
$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda}, \quad (7.15)$$

kur $\Phi(\lambda)$ šviesos srautas išspinduliuotas visais bangos ilgiais, o $V(\lambda)$ akies spektrinio jautrumo kreivė, kurios analizinė išraiška

$$V(\lambda) = 1,099 \cdot \exp(284,4 \cdot (\lambda - 555)), \quad (7.16)$$

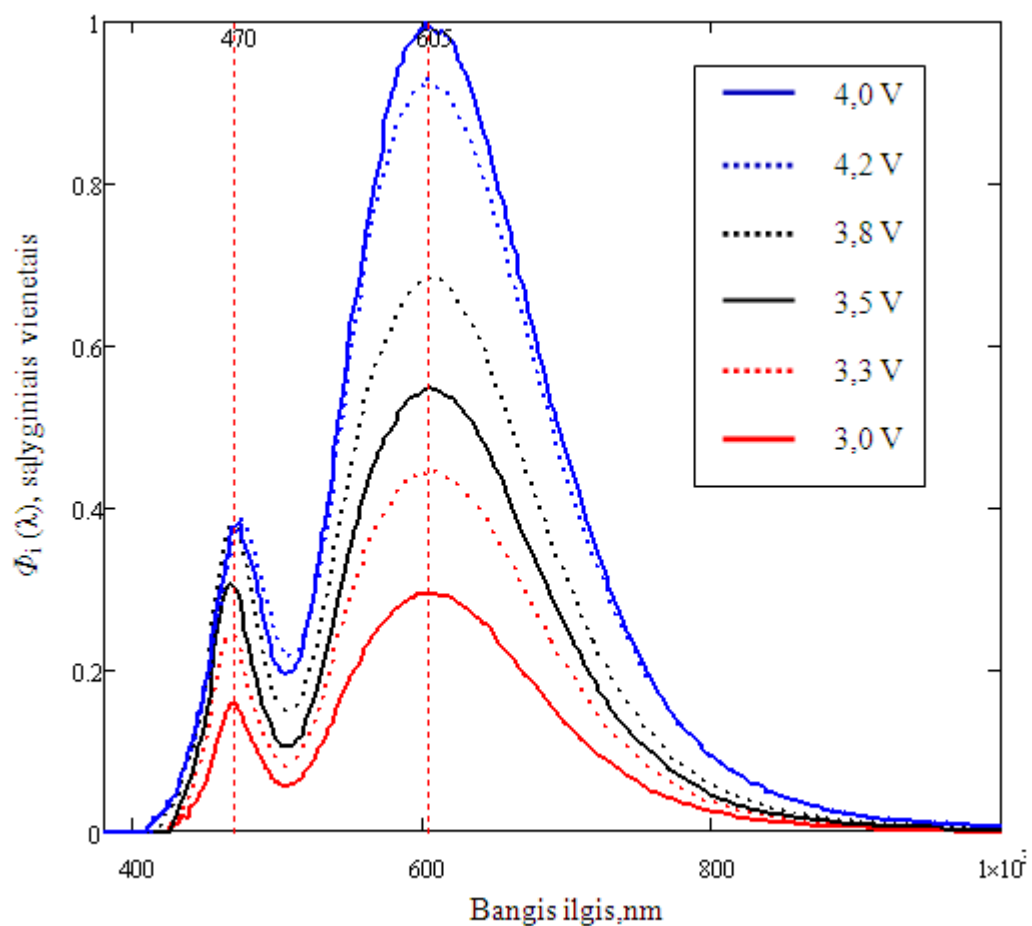
čia λ – bangos ilgis išreikštas nanometrais.

Padauginus energinį srautą iš akies jautrumo funkcijos gaunamas šviesos srautas į kurį reaguoja žmogaus akis (7.8 paveikslas).



7.8 pav. Išspinduliuoto ir jautraus žmogaus akies suvokiamo šviesos srauto palyginimas

Iš 7.8 paveikslo matyti, kad didžioji dalis išspinduliuoto energinio srauto patenka į tokių bangų sritį, kur žmogus jį suvokia kaip šviesą

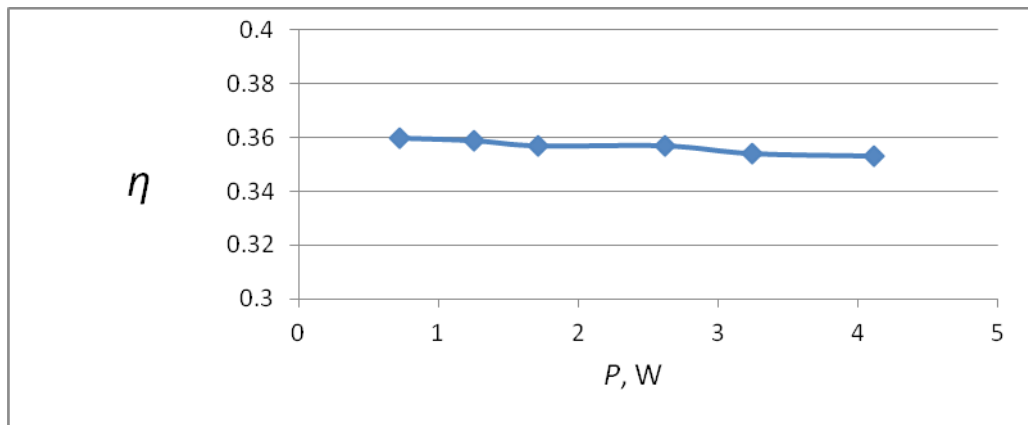


7.9 pav. Išspinduliuotas srautas prie skirtingų įtampų

7.9 paveiksle matome kaip skiriasi išspinduliuotas šviesos srautas keičiant srovės stiprį. Pastebime, kad didinant srovės stiprį, didėja ir išspinduliuotas šviesos srautas.

7.3 lentelė. Našumo ir veiksmingumo priklausomybė nuo elektrinės galios

P, W	0,72	1,254	1,715	2,622	3,24	4,116
η	0,36	0,359	0,357	0,357	0,354	0,353
$K, lm/W$	245,98	245,118	243,568	243,982	241,997	240,95

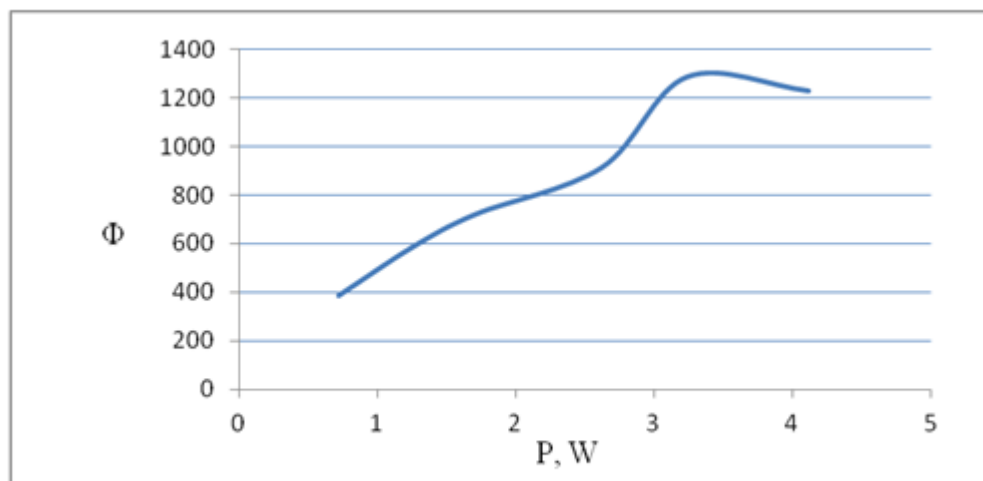


7.10 pav. Našumo priklausomybė nuo elektrinės galios

Iš 7.10 paveikslėlyje esančio grafiko matyti, kad diodo elektrinei galiai didėjant jo našumas nežymiai mažėja. Iš to galima daryti išvadą, kad diodas šviečia naudingai esant mažai galiai, tuo tarpu ir esant mažesniai įtampai ar srovės stipriui.

7.4 lentelė. Išspinduliuoto šviesos srauto Φ_s priklausomybė nuo

Φ_s	382,847	583,353	719,872	911,661	1286	1228
P, W	0,72	1,254	1,715	2,622	3,24	4,116



7.11 pav. Išspinduliuoto šviesos srauto priklausomybė nuo galios

Iš 7.11 paveikslėlyje esančio grafiko pastebime, kad didinant įtampą išspinduliuotas šviesos srautas didėja. Tačiau ties 3,5 W galia pamažu pradeda mažėti.

Iš gautų duomenų pastebime, kad šviesos diodui dirbant prie minimalios ir maksimalios įtampų jo išspinduliuotas šviesos srautas skiriasi beveik 4 kartus, bet tai nepadidina nei jo našumo, nei veiksmingumo.

Išvados

- Absoliučiai juodo kūno našumas ir veiksmingumas labai priklauso nuo temperatūros.

Kai $T_1 = 2800 \text{ °K}$, tai $\eta_1 = 2,1\%$, o $K_1 = 14,122 \text{ lm/W}$.

Kai $T_2 = 5800 \text{ °K}$, tai $\eta_2 = 13,2\%$, o $K_2 = 90,317 \text{ lm/W}$.

- Šviesos diodas yra daug ekonomiškesnis prietaisas už kaitrinę lemputę. Jo našumas siekia apie 36%, kai kaitrinės lemputės našumas yra tik apie 2,1%. Atitinkamai didesnis ir šviesos diodo veiksmingumas: apie 240 lm/W, o kaitrinės lemputės jis tesiekia apie 14 lm/W.

- Ištirtas šviesos diodo darbas prie skirtingų režimų parodė, kad didinant galią šviesos diodo našumas ir veiksmingumas nežymiai mažėja. Manoma, kad didėjant galiai prietaisas kaista ir išspinduliuoja vidutinio ilgio infraraudonųjų spindulių bangas. Energijos nuostoliai gali būti patiriami ir ten, kur šviesos diodas prijungiamas prie įtampos.

Literatūros sąrašas

1. Bridgman R., Bryan K. ir kt. El. enciklopedija. Vilnius, 2006.
2. Žmogaus regėjimo sistema. [žiūrėta 2011-12-19] Prieiga per internetą: <<http://www.ppt2txt.com/r/a357e7a5/>>
3. Physiology of color perception [žiūrėta 2012-02-22] Prieiga per internetą: <<http://www.holisticlifestyle.yolasite.com/chromotherapy.php>>
4. Kėvelaitis E., Illert M., Hultborn H. Žmogaus fiziologija. KMU leidykla, 2006.
5. Prof. Lašas Vl. Žmogaus fiziologija. Vilnius, 1965.
6. Daugirdienė A., Stanikūnas R. ir kt. Spalvų suvokimo konstantiškumo veiksniai: kontrastas ir adaptacija prie fono spalvos. Psichologija. 2007, t. 35, p. 96-110.
7. Spectral power distribution. [žiūrėta 2012-03-10] Prieiga per internetą: <http://csclab.murraystate.edu/bob.pilgrim/515/lectures_01.html>
8. Equivalent white light sources and CIE illuminants [žiūrėta 2012-01-06] Prieiga per internetą: <http://www.hunterlab.com/appnotes/an05_05.pdf>
9. Light sources. [žiūrėta 2012-04-22] < <http://www.color-theory-phenomena.nl/07.01.html>>
10. Light sources and illuminants. [žiūrėta 2012-04-22] <<http://www5.konicaminolta.eu/measuring-instruments/color-light-knowledge/light-sources-and-illuminants.html>>
11. Spectra of high - powered white LEDs. [žiūrėta 2012-04-22] <<http://ledmuseum.candlepower.us/led/specx02.htm>>
12. Spectra of warm white LEDs. [žiūrėta 2012-04-22] <<http://ledmuseum.candlepower.us/led/specx63.htm>>
13. Light measurement tutorials. [žiūrėta 2012-01-28] Prieiga per internetą: <http://www.gigahertz-optik.de/files/tutorials_doublesideprint_2.pdf>
14. Bogdanovičius A. Fizikos pagrindai inžinerijoje, II dalis. Vilnius, 2010.
15. Martinėnas B., Fizika. Vilnius, 2008.
16. Bio LED apšvietimas. [žiūrėta 2012-02-03] Prieiga per internetą: <<http://www.optodecor.lt/bio-led-apsvietimas/>>
17. Kas yra šviesa. [žiūrėta 2012-03-12] Prieiga per internetą: <http://baterijos.lt/image/data/Product_logo/Teorija/Sviesa.htm>
18. Šliavaitė Z. Fizikos lentelės, formulės, dydžiai. Kaunas, 2007.
19. Šviesa, jos techniniai apibrėžimai, matavimo vienetai, dydžiai. [žiūrėta 2012-02-15] Prieiga per internetą:

<<http://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/14/1/0/1/article/8431/sviesa-jos-techniniai-apibrezimai-matavimo-vienetai-dydziai>>

20. Research article: Towards the optimum light source spectrum. [žiūrėta 2011-12-06]
Prieiga per internetą: <<http://www.hindawi.com/journals/aoe/2010/596825/>>

21. Šiluminis spinduliavimas. [žiūrėta 2012-03-25] Prieiga per internetą:
<http://www.olimpas.lt/konspektai/optika_7sk.pdf>

22. Luminous efficacy. [žiūrėta 2012-02-29] Prieiga per internetą:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy>

23. Black Body Instruction Manual. [žiūrėta 2011-12-16] Prieiga per internetą:
<http://www.cce.ufes.br/jair/web/blackbody_pasco.pdf>

PRIEDAI

1 priedas. Kaitrinės lemputės ir AJK tyrimas

$$h := 6.62 \cdot 10^{-34} \quad \lambda_{m1} := 1036 \cdot 10^{-9} \quad k := 1.38 \cdot 10^{-23}$$

absorbcijos geba

$$A := 0.47$$

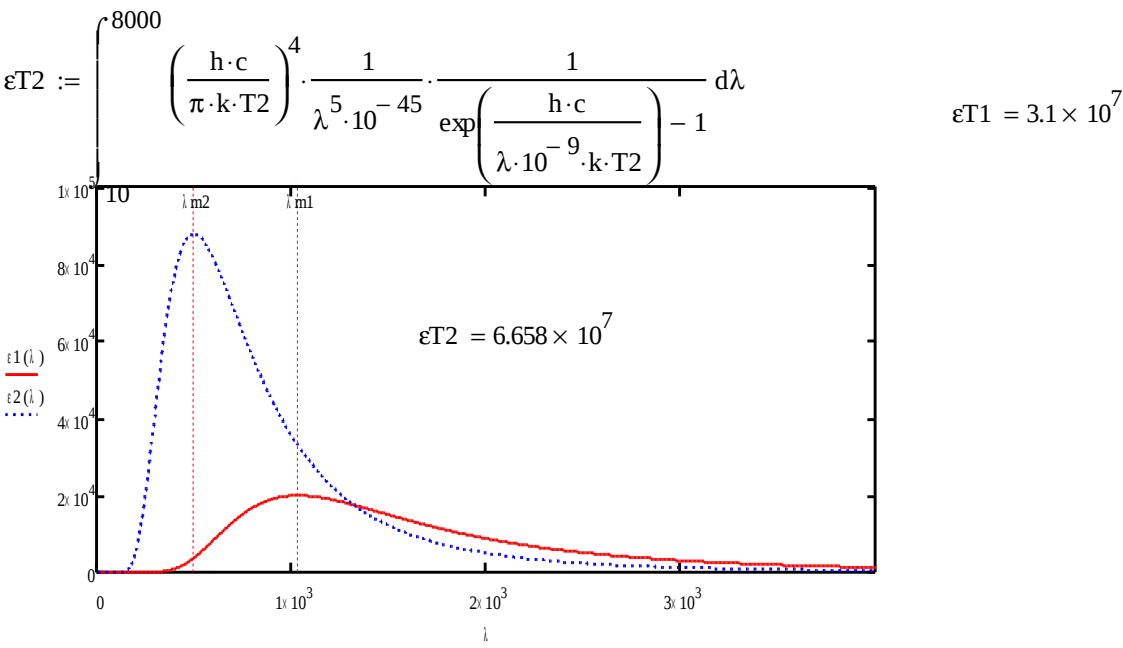
$$T1 := 2800 \quad T2 := 5800$$

$$\epsilon_1(\lambda) := \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T1} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{A}{\exp\left(\frac{\lambda_{m1} \cdot h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T1}\right) - 1} \quad \lambda_{m1} = 1.036 \times 10^3 \text{ maksimalus bangos ilgis}$$

$$\epsilon_2(\lambda) := \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T2} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T2}\right) - 1} \quad \lambda_{m2} = \frac{2.9 \cdot 10^6}{T2}$$

integraline emisijos geba

$$\epsilon_{T1} := \int_{10}^{8000} \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T1} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{A}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T1}\right) - 1} d\lambda$$

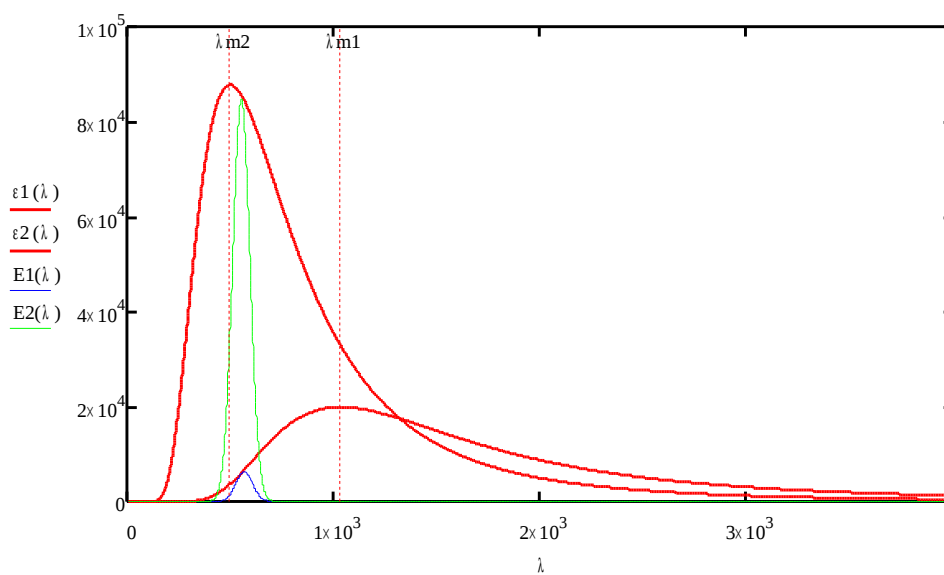


$$S1 := \left(\frac{T2}{T1} \right)^4 \quad S1 = 18.411$$

$$\underline{V}(\lambda) := 0.99 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 555)^2 \right] \quad V - \text{akies jautrumo kreive}$$

$$E1(\lambda) := \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T1} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{A}{\exp \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T1} \right) - 1} \cdot \left[0.99 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 555)^2 \right] \right]$$

$$E2(\lambda) := \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T2} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{1}{\exp \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T2} \right) - 1} \cdot \left[0.99 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 555)^2 \right] \right]$$



$$ET1 := \int_{10}^{8000} \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T1} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{A}{\exp \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T1} \right) - 1} \cdot \left[0.99 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 555)^2 \right] \right] d\lambda$$

$$ET1 = 6.41 \times 10^5$$

$$ET2 := \int_{10}^{8000} \left(\frac{h \cdot c}{\pi \cdot k \cdot T2} \right)^4 \cdot \frac{1}{\lambda^5 \cdot 10^{-45}} \cdot \frac{\left[0.99 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 555)^2 \right] \right]}{\exp \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot 10^{-9} \cdot k \cdot T2} \right) - 1} d\lambda$$

$$ET2 = 8.804 \times 10^6$$

veiksmingumas

našumas

$$\eta_1 := \frac{ET_1}{\varepsilon T_1} \quad \eta_2 := \frac{ET_2}{\varepsilon T_2}$$

$$\chi^1 := 683 \cdot \eta_1$$

$$\chi^2 := 683 \cdot \eta_2$$

$$\eta_1 = 0.021 \quad \eta_2 = 0.132$$

$$\chi^1 = 14.122$$

$$\chi^2 = 90.317$$

$$\frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

2 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 3 V įtampos

Importuojamos generuotos itamos U0 ir difrakcijos kampo vertes

U0 :=

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	...

θ0 :=

	0
0	56.02
1	56.02
2	56.03
3	56.05
4	56.05
5	56.07
6	56.08
7	56.1
8	56.13
9	56.13
10	56.15
11	...

Pasikartojanciu kampo verciu pasalinimas

$$\theta_s := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ \theta_{s_k} \leftarrow \theta_{0_i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ \theta_s \end{array} \right.$$

Pasikartojanciu U0 verciu pasalinimas

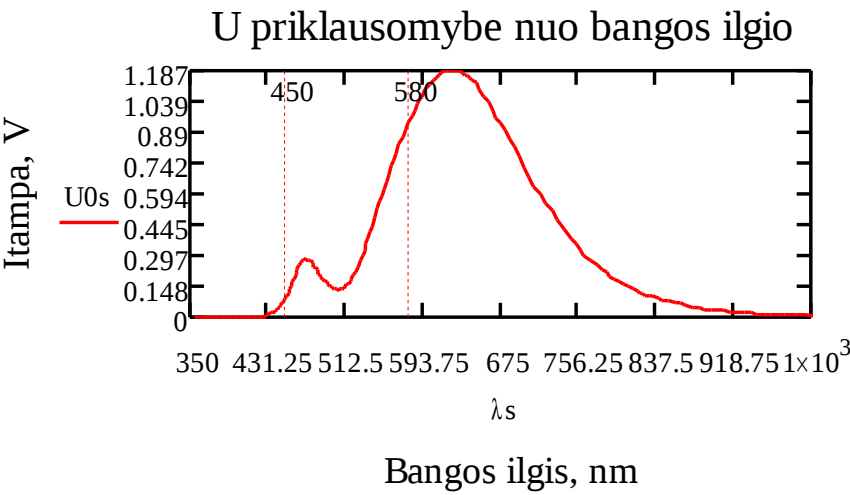
$$U0_s := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ U0_{s_k} \leftarrow U0_{0_i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ U0_s \end{array} \right.$$

Bangos ilgio priklausomybes nuo dispersijos kampo funkcija ()

$$\lambda_s := \sqrt{\frac{13900}{\sqrt{\left[\left(\frac{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta_s}{180}\right)}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \right)^2 + 0.75 \right]} - 1.689}}$$

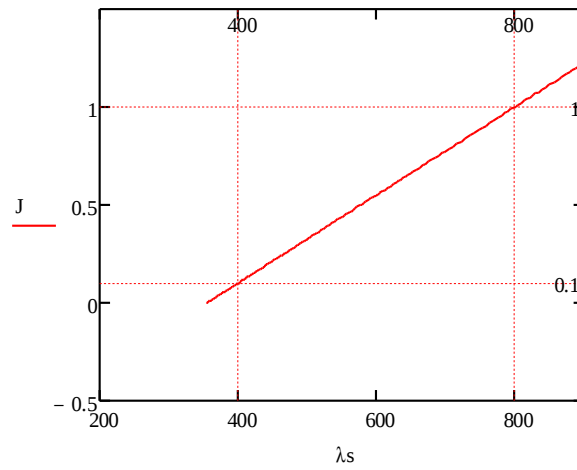
	0
0	$1.478 \cdot 10^3$
1	$1.46 \cdot 10^3$
2	$1.442 \cdot 10^3$
3	$1.425 \cdot 10^3$
4	$1.409 \cdot 10^3$
5	$1.393 \cdot 10^3$
6	$1.363 \cdot 10^3$
$\lambda_s =$ 7	$1.348 \cdot 10^3$
8	$1.334 \cdot 10^3$
9	$1.321 \cdot 10^3$
10	$1.308 \cdot 10^3$
11	$1.283 \cdot 10^3$
12	$1.27 \cdot 10^3$
13	$1.259 \cdot 10^3$
14	$1.248 \cdot 10^3$
15	...

Neatsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma



	0
0	$1.478 \cdot 10^3$
1	$1.46 \cdot 10^3$
2	$1.442 \cdot 10^3$
3	$1.425 \cdot 10^3$
4	$1.409 \cdot 10^3$
5	$1.393 \cdot 10^3$
6	$1.363 \cdot 10^3$
$\lambda_s =$ 7	$1.348 \cdot 10^3$
8	$1.334 \cdot 10^3$
9	$1.321 \cdot 10^3$
10	$1.308 \cdot 10^3$
11	$1.283 \cdot 10^3$
12	$1.27 \cdot 10^3$
13	$1.259 \cdot 10^3$
14	$1.248 \cdot 10^3$
15	...

$$J_{\lambda\lambda} := 0.00225 \cdot \lambda_s - 0.8$$



J =

	0
0	2.526
1	2.486
2	2.445
3	2.406
4	2.37
5	2.334
6	...

Atsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma. Generuojama itampa U0 padalinama is spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_0 s}{J}$$

$$V_{\lambda\lambda} := 1.0 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_s - 555)^2 \right]$$

$$UV := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 1 \\ UV_i \leftarrow U_{s_i} \cdot V_i \\ UV \end{cases}$$

UV =

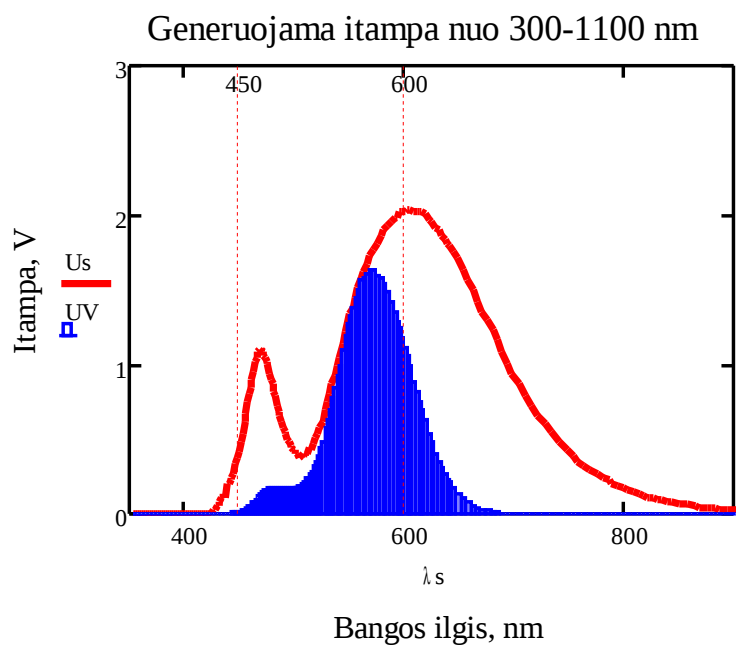
	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	...

Us =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...



$$\varepsilon_s := \left| \begin{array}{l} \varepsilon_s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 2 \\ \varepsilon_s \leftarrow \varepsilon_s + \left(\frac{U_{s_i} + U_{s_{i+1}}}{2} \right) (\lambda_{s_i} - \lambda_{s_{i+1}}) \\ \varepsilon_s \end{array} \right|$$

$$\varepsilon_s = 382.847$$

$$\varepsilon_V := \left| \begin{array}{l} \varepsilon_V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 2 \\ \varepsilon_V \leftarrow \varepsilon_V + \left(\frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \right) (\lambda_{s_i} - \lambda_{s_{i+1}}) \\ \varepsilon_V \end{array} \right|$$

$$\varepsilon_V = 137.881$$

$$\eta := \frac{\varepsilon_V}{\varepsilon_s} \quad \eta = 0.36$$

$$S_{\text{rautas}} := \eta \cdot 683$$

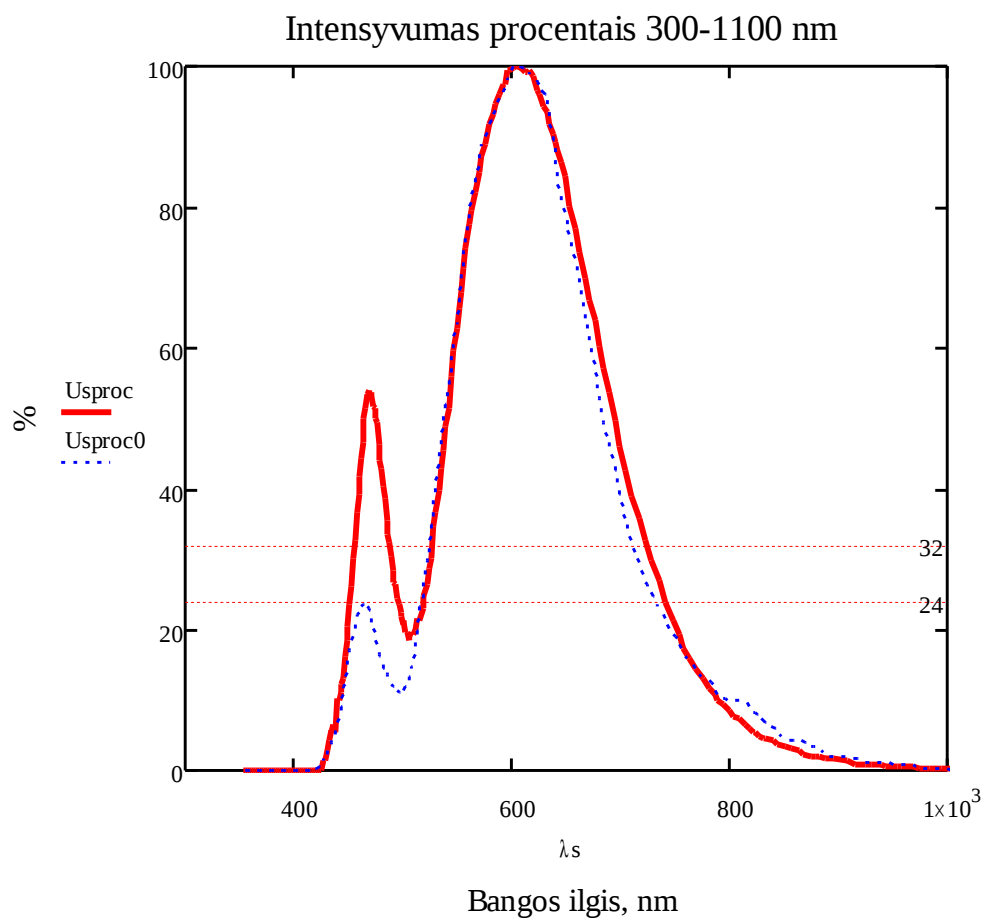
$$S_{\text{rautas}} = 245.98 \quad \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma

Intensyvumas procentais

$$Us_{\text{proc}} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(Us) - 1 \\ Us_{\text{proc}_i} \leftarrow \frac{Us_i \cdot 100}{\max(Us)} \\ Us_{\text{proc}} \end{array} \right|$$

$$Us_{\text{proc0}} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U0s) - 1 \\ Us_{\text{proc0}_i} \leftarrow \frac{U0_{i,s} \cdot 100}{\max(U0s)} \\ Us_{\text{proc0}} \end{array} \right|$$



Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma

3 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 3,3 V įtampos

Importuojamos generuotos itamos U0 ir difrakcijos kampo vertes

U0 :=

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	...

θ0 :=

	0
0	56
1	56.02
2	56.03
3	56.07
4	56.1
5	56.15
6	56.18
7	56.2
8	56.22
9	56.23
10	56.25
11	...

θs :=

```
k ← -1
for i ∈ 0..length(θ0) - 1
  k ← k + 1 if (i = 0) ∨ (θ0i > θ0i-1)
  θsi ← θ0i if (i = 0) ∨ (θ0i > θ0i-1)
end for
```

Pasikartojančių kampo verčių pašalinimas

θs

U0s :=

```
k ← -1
for i ∈ 0..length(θ0) - 1
  k ← k + 1 if (i = 0) ∨ (θ0i > θ0i-1)
  U0si ← U0i if (i = 0) ∨ (θ0i > θ0i-1)
end for
```

Pasikartojančių U0 verčių pašalinimas

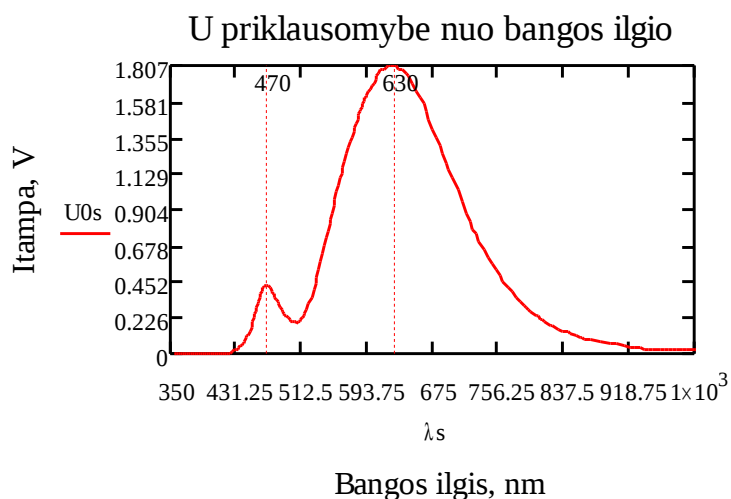
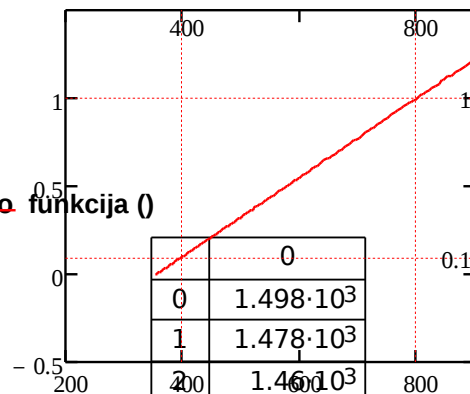
U0s

$$J := 0.00225 \cdot \lambda_s - 0.8$$

Bangos ilgio priklausomybės

	0
0	2.57
1	2.526
2	2.486
3	2.406
4	2.334
5	2.233
6	...

$\lambda_s := \sqrt{\left[\left(\frac{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta_s}{180}\right)}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \right)^2 + 0.75 \right] - 1.689}$



$\lambda_s =$

0	1.498 · 10 ³
1	1.478 · 10 ³
2	1.460 · 10 ³
3	1.425 · 10 ³
4	1.393 · 10 ³
5	1.348 · 10 ³
6	1.321 · 10 ³
7	1.308 · 10 ³
8	1.295 · 10 ³
9	1.283 · 10 ³
10	1.27 · 10 ³
11	1.259 · 10 ³
12	1.248 · 10 ³
13	1.225 · 10 ³
14	1.195 · 10 ³
15	...

Atsizvelgiama į sensoriaus spektrinį jautrumą. Generuojama itampa U0 padalinama iš spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_0 s}{J} \quad V_i := 1.0 \cdot \exp\left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_s - 555)^2\right]$$

$$UV := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 1 \\ UV_i \leftarrow U_{s_i} \cdot V_i \\ UV \end{cases}$$

UV =

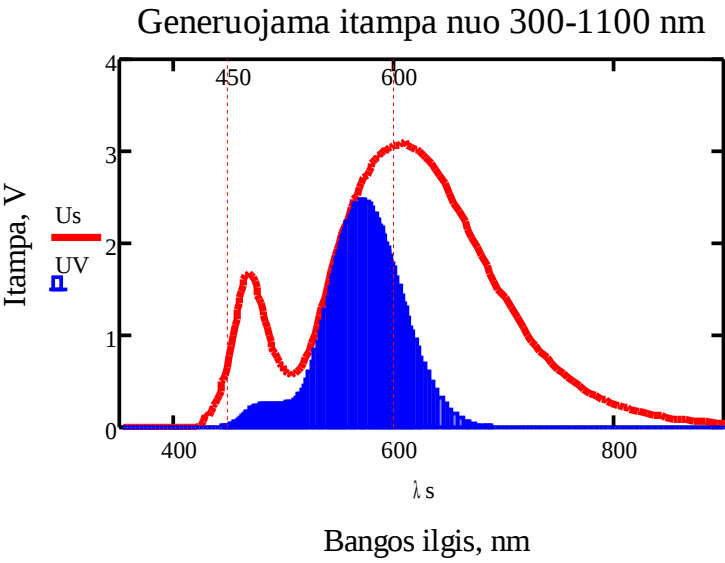
	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	...

Us =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...



$$\varepsilon s := \left| \begin{array}{l} \varepsilon s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \varepsilon s \leftarrow \varepsilon s + \left(\frac{U_{s_i} + U_{s_{i+1}}}{2} \right) \cdot (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \varepsilon s \end{array} \right|$$

$$\varepsilon s = 583.353$$

$$\varepsilon V := \left| \begin{array}{l} \varepsilon V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \varepsilon V \leftarrow \varepsilon V + \left(\frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \right) \cdot (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \varepsilon V \end{array} \right|$$

$$\varepsilon V = 209.356$$

$$\text{Srautas} = 245.118 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

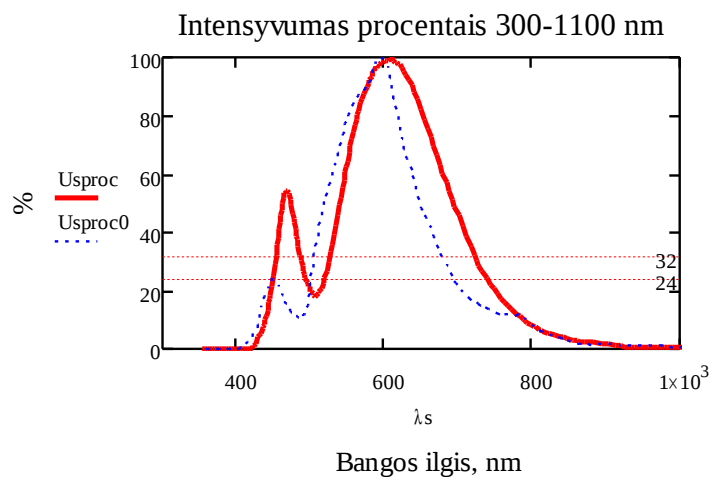
$$\eta := \frac{\varepsilon V}{\varepsilon s} \quad \eta = 0.359 \quad \text{Srautas} := \eta \cdot 683$$

Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma

Intensyvumas procentais

$$\text{Usproc} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(Us) - 1 \\ \text{Usproc}_i \leftarrow \frac{Us_i \cdot 100}{\max(Us)} \\ \text{Usproc} \end{array} \right|$$

$$\text{Usproc0} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U0s) - 1 \\ \text{Usproc0}_i \leftarrow \frac{U0s_i \cdot 100}{\max(U0s)} \\ \text{Usproc0} \end{array} \right|$$



4 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 3,5 V įtampos

Importuojamos generuotos itampos U0 ir difrakcijos kampo vertes

U0 :=		0
	0	0
	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
	5	0
	6	0
	7	0
	8	0
	9	0
	10	...

θ0 :=		0
	0	56.02
	1	56.05
	2	56.12
	3	56.15
	4	56.18
	5	56.22
	6	56.23
	7	56.27
	8	56.3
	9	56.32
	10	56.35
	11	...

Pasikartojanciu kampo verciu pasalinimas

θs :=	k ← -1
	for i ∈ 0..length(θ0) - 1
	k ← k + 1 if (i = 0) ∨ (θ0 _i > θ0 _{i-1})
	θs _k ← θ0 _i if (i = 0) ∨ (θ0 _i > θ0 _{i-1})
	θs

Pasikartojanciu U0 verciu pasalinimas

U0s :=	k ← -1
	for i ∈ 0..length(U0) - 1
	k ← k + 1 if (i = 0) ∨ (U0 _i > U0 _{i-1})
	U0s _k ← U0 _i if (i = 0) ∨ (U0 _i > U0 _{i-1})
	U0s

	0
0	1.478·10 ³
1	1.442·10 ³
2	1.377·10 ³
3	1.348·10 ³
4	1.321·10 ³
5	1.295·10 ³
6	1.283·10 ³
7	1.259·10 ³
8	1.236·10 ³
9	1.225·10 ³
10	1.205·10 ³
11	1.185·10 ³
12	1.166·10 ³
13	1.158·10 ³
14	1.14·10 ³
15	...

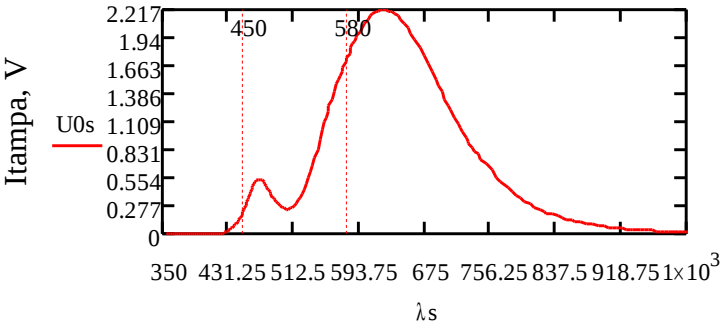
Bangos ilgio priklausomybes nuo dispersijos kampo funkcija ()

$$\lambda_s := \sqrt{\sqrt{\frac{13900}{\sqrt{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_s}{180}\right) + \frac{1}{2}} + 0.75}} - 1.689}$$

λs =	0
	1.478·10 ³
	1.442·10 ³
	1.377·10 ³
	1.348·10 ³
	1.321·10 ³
	1.295·10 ³
	1.283·10 ³
	1.259·10 ³
	1.236·10 ³
	1.225·10 ³
	1.205·10 ³
	1.185·10 ³
	1.166·10 ³
	1.158·10 ³
	1.14·10 ³
	...

Neatsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma

U priklausomybe nuo bangos ilgio

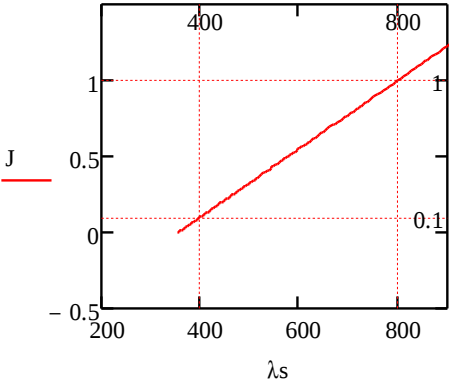


$J := 0.00225 \cdot \lambda_s - 0.8$

Bangos ilgis, nm

J =

	0
0	2.526
1	2.445
2	2.299
3	2.233
4	2.172
5	2.113
6	...



Atsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma. Generuojama itampa U0 padalinama is spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_0 s}{J}$$

$$V := 1.0 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda s) \right]$$

Us =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

UV :=

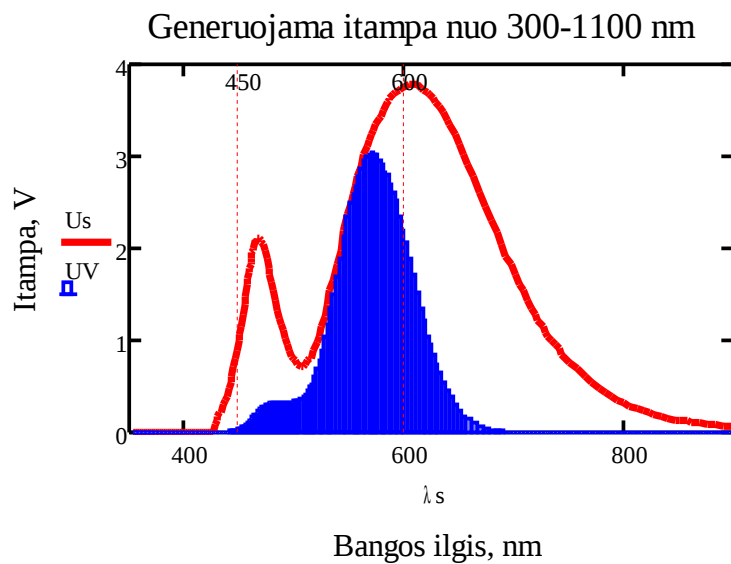
for i ∈
UV_i ←
UV

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

UV =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	...



$$\varepsilon_s := \left| \begin{array}{l} \varepsilon_s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 2 \\ \varepsilon_s \leftarrow \varepsilon_s + \left(\frac{U_{s_i} + U_{s_{i+1}}}{2} \right) \cdot (\lambda_{s_i} - \lambda_{s_{i+1}}) \\ \varepsilon_s \end{array} \right|$$

$$\varepsilon_s = 719.872$$

$$\varepsilon_V := \left| \begin{array}{l} \varepsilon_V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 2 \\ \varepsilon_V \leftarrow \varepsilon_V + \left(\frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \right) \cdot (\lambda_{s_i} - \lambda_{s_{i+1}}) \\ \varepsilon_V \end{array} \right|$$

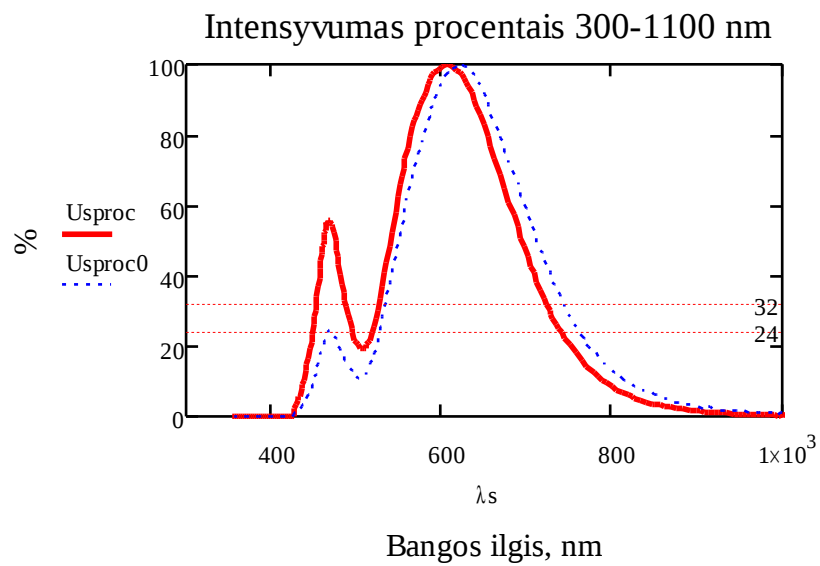
$$\varepsilon_V = 256.717$$

$$\eta := \frac{\varepsilon_V}{\varepsilon_s} \quad \eta = 0.357 \quad \text{Srautas} := \eta \cdot 683 \quad \text{Srautas} = 243.568 \quad \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma
Intensyvumas procentais

$Usproc :=$ $\left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(Us) - 1 \\ \quad Usproc_i \leftarrow \frac{Us_i \cdot 100}{\max(Us)} \\ Usproc \end{array} \right.$

$Usproc0 :=$ $\left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U0s) - 1 \\ \quad Usproc0_i \leftarrow \frac{U0_i \cdot 100}{\max(U0s)} \\ Usproc0 \end{array} \right.$



5 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 3,8 V įtampos

Importuojamos generuotos itampos U0 ir difrakcijos kampo vertes

U0 :=

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	...

θ0 :=

	0
0	56
1	56.05
2	56.08
3	56.12
4	56.17
5	56.2
6	56.23
7	56.27
8	56.28
9	56.28
10	56.3
11	...

Pasikartojanciu kampo verciu pasalinimas

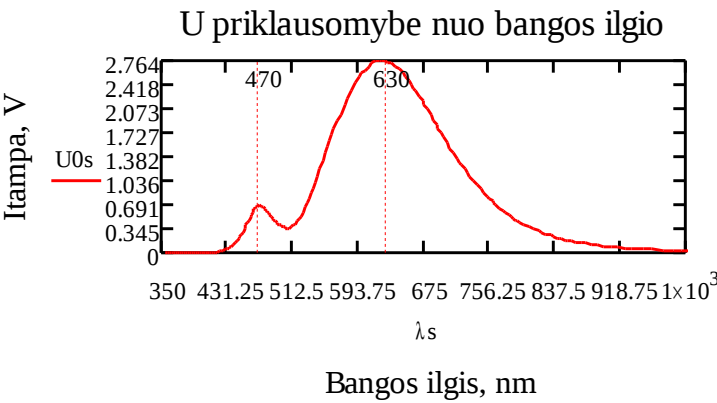
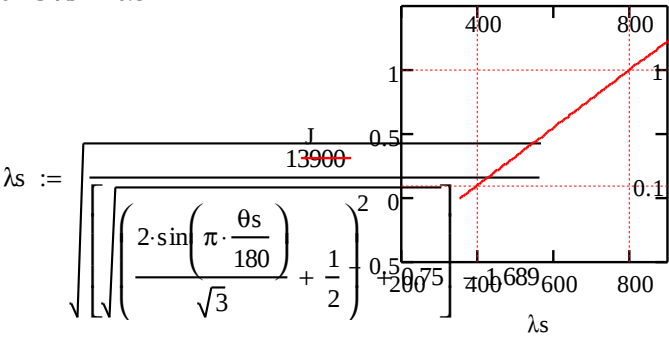
$$\theta_s := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ \theta_{s_k} \leftarrow \theta_{0_i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ \theta_s \end{array} \right.$$

Pasikartojanciu U0 verciu pasalinimas

$$U0_s := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ U0_{s_k} \leftarrow U0_i \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ U0_s \end{array} \right.$$

Bangos ilgio priklausomybes nuo dispersijos kampo funkcija ()

$J := 0.00225 \cdot \lambda_s - 0.8$



	0
0	2.57
1	2.445
2	2.37
3	2.299
4	2.201
5	2.142
6	...
3	$1.377 \cdot 10^3$
4	$1.334 \cdot 10^3$
5	$1.308 \cdot 10^3$
6	$1.283 \cdot 10^3$
7	$1.259 \cdot 10^3$
8	$1.248 \cdot 10^3$
9	$1.236 \cdot 10^3$
10	$1.225 \cdot 10^3$
11	$1.205 \cdot 10^3$
12	$1.195 \cdot 10^3$
13	$1.176 \cdot 10^3$
14	$1.166 \cdot 10^3$
15	...

Atsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma. Generuojama itampa U0 padalinama is spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_0 s}{J}$$

$$V := 1.0 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_s - 555)^2 \right]$$

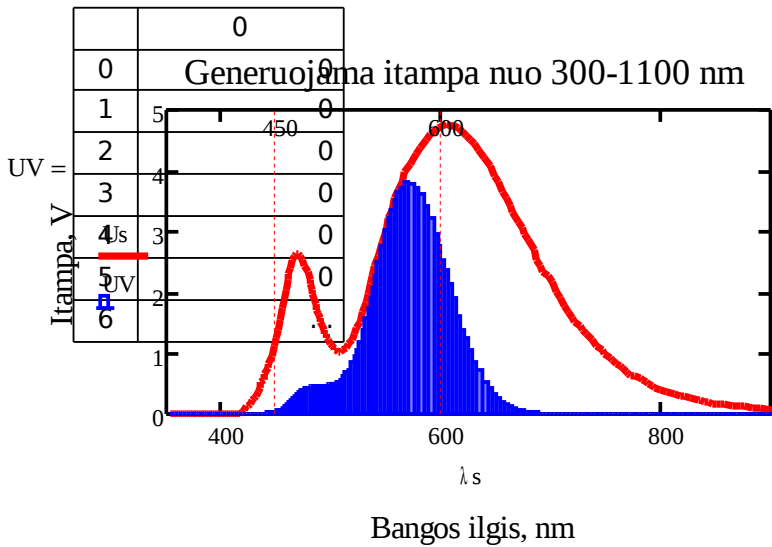
$$UV := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 1 \\ UV_i \leftarrow U_s \cdot V_i \\ UV \end{cases}$$

Us =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...



$$\varepsilon S := \left| \begin{array}{l} \varepsilon S \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \varepsilon S \leftarrow \varepsilon S + \left(\frac{U_{s_i} + U_{s_{i+1}}}{2} \right) (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \varepsilon S \end{array} \right|$$

$$\varepsilon S = 911.661$$

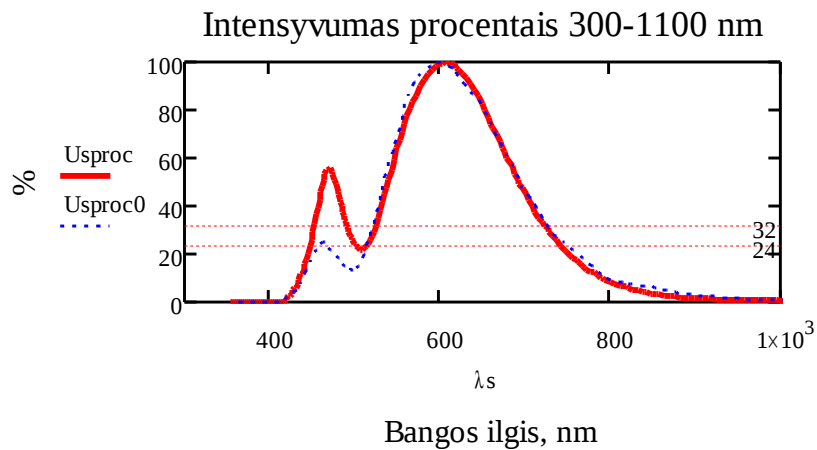
$$\varepsilon V := \left| \begin{array}{l} \varepsilon V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \varepsilon V \leftarrow \varepsilon V + \left(\frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \right) (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \varepsilon V \end{array} \right|$$

$$\varepsilon V = 325.664$$

$$\eta := \frac{\varepsilon V}{\varepsilon S} \quad \eta = 0.357 \quad \text{Srautas} := \eta \cdot 683 \quad \text{Srautas} = 243.982 \quad \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

**Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma
Intensyvumas procentais**

$$\text{Usproc} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(Us) - 1 \\ \text{Usproc}_i \leftarrow \frac{Us_i \cdot 100}{\max(Us)} \\ \text{Usproc} \end{array} \right| \quad \text{Usproc0} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U0s) - 1 \\ \text{Usproc0}_i \leftarrow \frac{U0s_i \cdot 100}{\max(U0s)} \\ \text{Usproc0} \end{array} \right|$$



6 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 4,0 V įtampos

Importuojamos generuotos itampos U0 ir difrakcijos kampo vertės

U0 :=

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	...

θ0 :=

	0
0	56.02
1	56.02
2	56.02
3	56.02
4	56.02
5	56.03
6	56.05
7	56.07
8	56.08
9	56.08
10	56.1
11	...

Pasikartojančių kampo verčių pasalinimas

$$\theta_s := \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0i} > \theta_{0i-1}) \\ \theta_{s_k} \leftarrow \theta_{0i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0i} > \theta_{0i-1}) \end{array} \right. \\ \theta_s \end{cases}$$

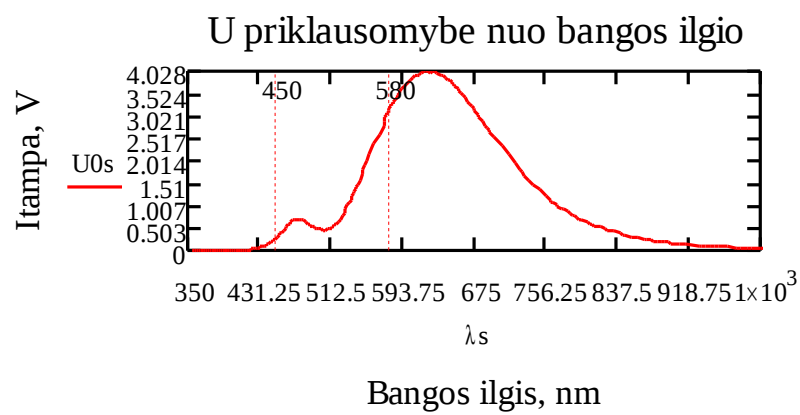
Pasikartojančių U0 verčių pasalinimas

$$U_{0s} := \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0i} > \theta_{0i-1}) \\ U_{0s_k} \leftarrow U_{0i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0i} > \theta_{0i-1}) \end{array} \right. \\ U_{0s} \end{cases}$$

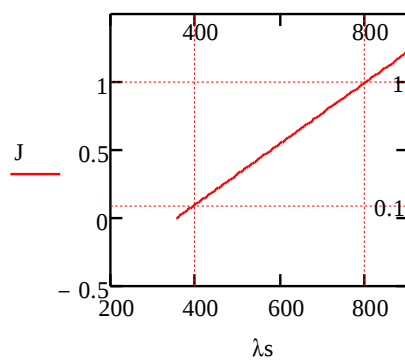
Bangos ilgio priklausomybės nuo dispersijos kampo funkcija ()

$$\lambda_s := \sqrt{\frac{13900}{\left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\theta_s}{180}\right)}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2} \right)^2 + 0.75} \right]} - 1.689}$$

Neatsizvelgiama į sensoriaus spektrinį jautrumą



$$J := 0.00225 \cdot \lambda s - 0.8$$



	0	
0	2.526	
1	2.486	0 ³
2	2.445	0 ³
3	2.406	0 ³
4	2.37	0 ³
5	2.334	0 ³
6	...	0 ³
6	$1.377 \cdot 10^3$	
7	$1.334 \cdot 10^3$	
8	$1.259 \cdot 10^3$	
9	$1.225 \cdot 10^3$	
10	$1.215 \cdot 10^3$	
11	$1.205 \cdot 10^3$	
12	$1.185 \cdot 10^3$	
13	$1.166 \cdot 10^3$	
14	$1.149 \cdot 10^3$	
15	...	

$$UV := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 1 \\ UV_i \leftarrow Us_i \cdot V_i \\ UV \end{cases}$$

Atsizvelgiama i sensoriaus spektrinį jautrumą. Generuojama itampa U0 padalinama iš spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_0 s}{J} \qquad V := 1.0 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_s - 555)^2 \right]$$

UV =

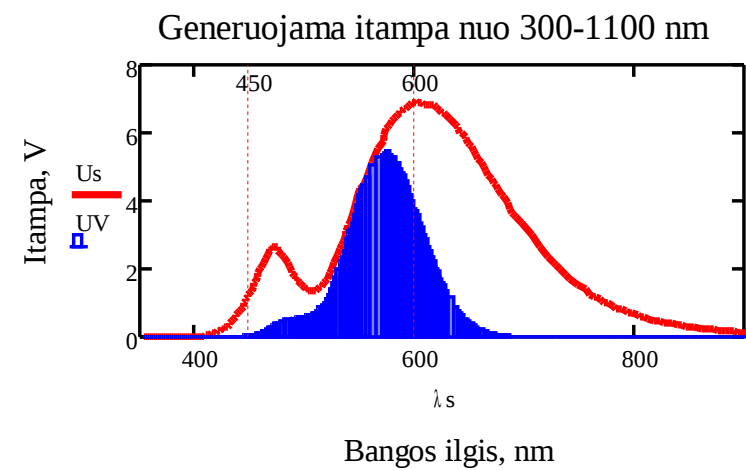
	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	...

Us =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	$7.664 \cdot 10^{-3}$
10	$5.05 \cdot 10^{-3}$
11	$5.112 \cdot 10^{-3}$
12	$8.033 \cdot 10^{-3}$
13	$8.222 \cdot 10^{-3}$
14	$8.405 \cdot 10^{-3}$
15	...

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...



$$\varepsilon S := \left| \begin{array}{l} \varepsilon S \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda S) - 2 \\ \varepsilon S \leftarrow \varepsilon S + \left(\frac{U_{S_i} + U_{S_{i+1}}}{2} \right) \cdot (\lambda_{S_i} - \lambda_{S_{i+1}}) \\ \varepsilon S \end{array} \right|$$

$$\varepsilon S = 1.286 \times 10^3$$

$$\varepsilon V := \left| \begin{array}{l} \varepsilon V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda S) - 2 \\ \varepsilon V \leftarrow \varepsilon V + \left(\frac{U_{V_i} + U_{V_{i+1}}}{2} \right) \cdot (\lambda_{S_i} - \lambda_{S_{i+1}}) \\ \varepsilon V \end{array} \right|$$

$$\varepsilon V = 455.664$$

$$\eta := \frac{\varepsilon V}{\varepsilon S}$$

$$\eta = 0.354$$

$$S_{\text{rautas}} := \eta \cdot 683$$

$$S_{\text{rautas}} = 241.997$$

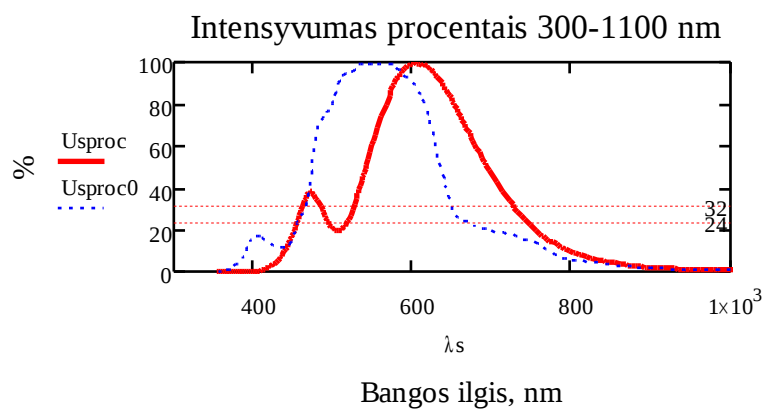
$$\frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma

Intensyvumas procentais

$$Us_{\text{proc}} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U_S) - 1 \\ Us_{\text{proc}_i} \leftarrow \frac{U_{S_i} \cdot 100}{\max(U_S)} \\ Us_{\text{proc}} \end{array} \right|$$

$$Us_{\text{proc0}} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U_{0s}) - 1 \\ Us_{\text{proc0}_i} \leftarrow \frac{U_{0s_i} \cdot 100}{\max(U_{0s})} \\ Us_{\text{proc0}} \end{array} \right|$$



6 priedas. Šviesos diodo tyrimas prie 4,0 V įtampos

Importuojamos generuotos įtampos U_0 ir difrakcijos kampo vertės

$U_0 :=$

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0.02
9	0.02
10	...

$\theta_0 :=$

	0
0	56.02
1	56.05
2	56.1
3	56.13
4	56.18
5	56.22
6	56.25
7	56.28
8	56.32
9	56.37
10	56.43
11	...

Pasikartojančių kampo verčių pasalinimas

$\theta_s :=$

$$\left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ \theta_{s_k} \leftarrow \theta_{0_i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ \theta_s \end{array} \right.$$

Pasikartojančių U_0 verčių pasalinimas

$U_{0s} :=$

$$\left| \begin{array}{l} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\theta_0) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \\ U_{0s_k} \leftarrow U_{0_i} \text{ if } (i = 0) \vee (\theta_{0_i} > \theta_{0_{i-1}}) \end{array} \right. \\ U_{0s} \end{array} \right.$$

Atsizvelgiama i sensoriaus spektrini jautruma. Generuojama itampa U0 padalinama is spektrinio jautrumo funkcijos I

$$U_s := \frac{U_{0s}}{J}$$

$$V := 1.0 \cdot \exp \left[-284.4 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_s - 555)^2 \right]$$

$$UV := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda_s) - 1 \\ UV_i \leftarrow U_{s_i} \cdot V_i \\ UV \end{cases}$$

U_s =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0.01
9	0.011
10	0.011
11	0.011
12	0.014
13	0.018
14	0.018
15	...

V =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	...

Bangos ilgio priklausomybes nuo d tampo funkcija ()

UV =

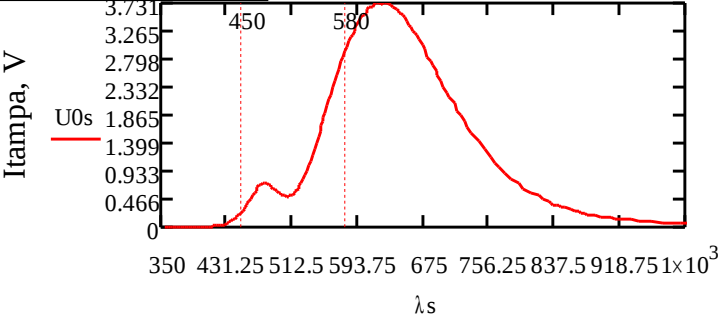
	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	...

13900

$$\left(\frac{\theta_s}{180} + \frac{1}{2} \right)^2 + 0.75 - 1.689$$

sensoriaus spektrini jautruma

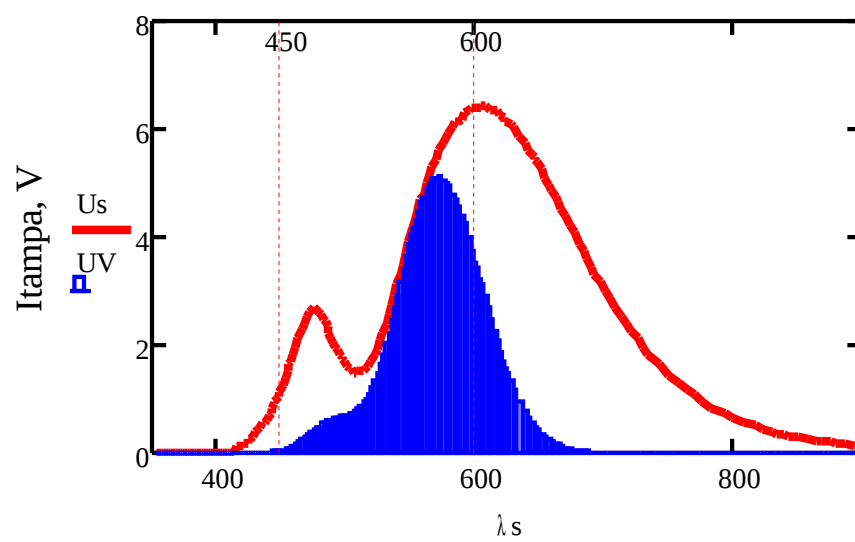
lausomybe nuo bangos ilgio



λ_s =

	0
0	1.478·10 ³
1	1.442·10 ³
2	1.393·10 ³
3	1.363·10 ³
4	1.321·10 ³
5	1.295·10 ³
6	1.27·10 ³
7	1.248·10 ³
8	1.225·10 ³
9	1.195·10 ³
10	1.158·10 ³
11	1.132·10 ³
12	1.108·10 ³
13	1.085·10 ³
14	1.057·10 ³
15	...

Generuojama itampa nuo 300-1100 nm



Bangos ilgis, nm

$$\epsilon S := \left| \begin{array}{l} \epsilon S \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \epsilon S \leftarrow \epsilon S + \left(\frac{U_{s_i} + U_{s_{i+1}}}{2} \right) \cdot (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \epsilon S \end{array} \right|$$

$$\epsilon S = 1.228 \times 10^3$$

$$\epsilon V := \left| \begin{array}{l} \epsilon V \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{length}(\lambda s) - 2 \\ \epsilon V \leftarrow \epsilon V + \left(\frac{UV_i + UV_{i+1}}{2} \right) \cdot (\lambda s_i - \lambda s_{i+1}) \\ \epsilon V \end{array} \right|$$

$$\epsilon V = 433.277$$

$$\eta := \frac{\epsilon V}{\epsilon S}$$

$$\eta = 0.353$$

$$S_{rautas} := \eta \cdot 683$$

$$S_{rautas} = 240.95$$

$$\frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Melyna kreive neatsizvelgia i prietaiso spektrini jautruma

Intensyvumas procentais

$$Usproc := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(Us) - 1 \\ Usproc_i \leftarrow \frac{Us_i \cdot 100}{\max(Us)} \\ Usproc \end{array} \right|$$

$$Usproc0 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{length}(U0s) - 1 \\ Usproc0_i \leftarrow \frac{U0_{i,s} \cdot 100}{\max(U0s)} \\ Usproc0 \end{array} \right|$$

