

VILNIAUS UNIVERSITETAS
TAIKOMŲJŲ MOKSLŲ INSTITUTAS

Laboratorinis darbas

**ŠVIESTUKO OPTINIŲ IŠĖJIMO CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAS**

Magistrinių studijų programai
OPTOELEKTRONIKOS MEDŽIAGOS IR TECHNOLOGIJOS

Vilnius

2007

TURINYS

Darbo tikslai ir uždutys, kontroliniai klausimai, papildoma literatūra	3
Įvadas	4
1. Teorinis liuminescencijos spektras	5
2. Radiometriniai ir fotometriniai dydžiai	8
3. Kolorimetriniai dydžiai	10
4. Šviestuko našumas	13
5. Spinduliuotės kampinės diagramos	15
6. Laboratorinio darbo metodika	19
6.1. Pirmoji laboratorinio darbo užduotis	19
6.2. Antroji laboratorinio darbo užduotis	21
6.3. Trečioji laboratorinio darbo užduotis	23
Priedas 1: naudojimosi <i>SpektroLAB</i> (v1.0 beta) instrukcijos	25
Priedas 2: naudojimosi <i>PMA Software</i> (v3.1.0) instrukcijos	26
Priedas 3: įrangos nuotrauka	27

Darbo tikslai

1. Susipažinti su šviestukų spinduliuotės spektrais ir išmokti juos analizuoti.
2. Ištirti šviestukų optinės išėjimo galios priklausomybes nuo maitinimo srovės.
3. Ištirti šviestukų spindulinio srauto erdvinį pasiskirstymą ir parametrų kampines priklausomybes.

Darbo užduotys

1. Išmatuoti raudono ir mėlyno šviestukų liuminescencijos spektrus. Nustatyti spektrų smailių padėtis, spektrų pločius ties puse didžiausio intensyvumo bei apskaičiuoti kolorimetrinius šviestukų parametrus.
2. Išmatuoti balto bei žalio šviestukų optinio išėjimo srauto priklausomybes nuo maitinimo srovės ir apskaičiuoti spindulinį ir šviesinį našumus bei šviesos veiksmingumą.
3. Išmatuoti spalvoto šviestuko spinduliuotės kampinę diagramą, įvardinti jos rūšį. Išmatuoti balto šviestuko koreliuotos spalvinės temperatūros priklausomybę nuo spinduliavimo kampo.

Kontroliniai klausimai

1. Liuminescencinio spektro savybės ir charakteringi parametrai. Kokią informaciją liuminescencinis spektras teikia apie liuminescuojančią medžiagą?
2. Spinduliniai ir šviesiniai dydžiai, aprašantys spinduliuotę. Kuo jie skiriasi?
3. Šviesos šaltinių spalvą aprašančios metodikos, paremtos CIE spalvių diagrama, pagrindiniai principai.
4. Spindulinį šviestuko našumą sąlygojantys veiksniai.
5. Šviestukų spinduliuotės kampinių diagramų rūšys ir jų savybės.

Papildoma literatūra (taip pat naudota ruošiant darbo aprašą)

- 1.E. F. Schubert. Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press, Cambridge UK 2003.
- 2.A. Žukauskas, M. S. Shur, R. Gaska. Introduction to Solid-State Lighting. Jhon Wiley & Sons, Inc., New York 2002.
- 3.V. A. Šalna. Optika. Enciklopedija, Vilnius 2004
- 4.P. Brazdžiūnas. Bendroji fizika III dalis: Optika. Vilnius 1963.
- 5.Elektroninio šaltinis nuoroda: <http://cvision.ucsd.edu/>

IVADAS

Pastaruoju metu naujos kartos didelės galios puslaidininkiniai šviesos diodai (šviestukai), spinduliuojantys regimojoje spektro dalyje, randa vis platesnį pritaikymą įvairiose srityse. Jau dabar yra gaminami signaliniai transporto reguliavimo žibintai, didelių matmenų lauko ekranai ir kiti įrenginiai, kuriuose yra svarbūs šviestukų kolorimetriniai parametrai. Kitas efektingas šviestukų panaudojimas yra augalų kultivacijai šiltnamiuose, stimuliuojant augalų augimą dirbtiniu apšvietimu. Čia būtina tiksliai matuoti ir tinkamai nustatyti iš šviestukų pagamintų lempų fotometrines charakteristikas įvairiais augalų vystymosi etapais. Baltų šviestukų taikymai patalpų apšvietimui reikalauja tinkamai nustatyti šviestukų spalvinę atgavą, arba dienos šviesos imitacijos laipsnį, kad žmogus komfortabiliai jaustųsi šviestukais apšviečiamose patalpose.

Išaugus pritaikymų galimybėms, atsiranda ir griežti reikalavimai šviestukų optinėms savybėms. Pavyzdžiui, kuriant vaizdo ekranus reikalingi šviestukai, kurių spinduliuojamas šviesos intensyvumas būtų vienodas visomis žiūrėjimo į ekraną kryptimis. Vaizdo ekranų kūrėjai, parinkdami šviestukus, turi žinoti jų tolumo lauko šviesinio intensyvumo, spindulinio intensyvumo, CIE spalvio koordinatę ir koreliuotos spalvinės temperatūros priklausomybes nuo spinduliavimo kampo. Šviestukų optinius išėjimo parametrus reikia nustatyti tiksliais, standartizuotais metodais, kad būtų galima lyginti atskirų gamintojų skirtingų tipų šviestukus ir objektyviai įvertinti tų šviestukų tinkamumą praktiniam panaudojimui.

Optinės šviestuko savybes apibūdina grupė parametrų ir charakteristikų. Šviestuko išėjimo charakteristikos yra generuojamas srautas, našumas, intensyvumas, bei intensyvumo kampinis skirstinys ir šių charakteristikų priklausomybės nuo maitinimo srovės ir temperatūros. Šviestuko spektriniam (emisijos juostų padėties ir pločio) ir spalviniams (spalvio koordinatės, dominuojantis bangos ilgis, spalvos grynumas, koreliuota spalvinė temperatūra, spalvų atgava) parametrams įvertinti užtenka atlikti santykinės spektrinės galios matavimus. Norint nustatyti šviestuko našumą, būtina matuoti spektrinę emisijos galią absoliučiais dydžiais.

1. TEORINIS LIUMINESCENCIJOS SPEKTRAS

Puslaidininkinių šviestukų veikimo fizikinis mechanizmas yra savaiminė elektronų ir skylių porų rekombinacija ir neatskiriama nuo šio proceso vykstanti fotonų generacija. Savaiminės spinduliuotės procesas iš pagrindų skiriasi nuo priverstinės spinduliuotės proceso, pasireiškiančio puslaidininkiniuose lazeriuose. Savaiminiai šuoliai vyksta savaime be išorinio žadinimo, kai tuo tarpu priverstiniai šuoliai yra žadinami iš išorės, tarkim absorbuojant fotonus. Savaiminė rekombinacija turi tam tikras charakteristikas, kuriomis aprašomos šviestukų optinės savybės.

Elektrono – skylės poros rekombinacijos procesas yra pavaizduotas schematiškai 1 paveiksle. Laikoma, kad elektronai laidumo juostoje ir skylės valentinėje juostoje turi parabolines dispersijos lygtis:

$$E = E_c + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_e^*} \text{ — elektronams ir} \quad (1)$$

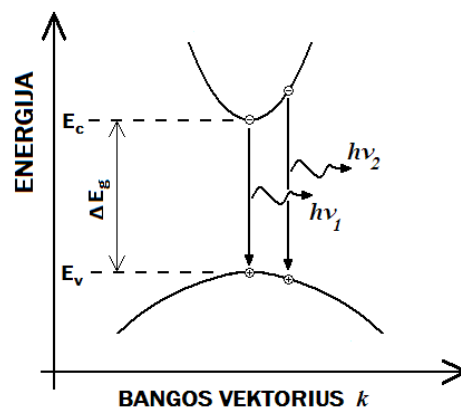
$$E = E_v - \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_h^*} \text{ — skylėms;} \quad (2)$$

čia m_e^* ir m_h^* yra elektrono ir skylės efektinės masės, h — Planko konstanta, k — krūvininkų bangos skaičius ir, galiausiai, E_v ir E_c yra valentinės ir laidumo juostų krašto energijos.

Energijos ir impulso tvermės dėsnių išpildymo būtinybė nulemia spindulinės rekombinacijos mechanizmo dėsningumus. Iš Bolcmano pasiskirstymo seka, kad elektronai ir skylės turi vidutinę kinetinę energiją, lygią kT . Energijos tvermė reikalauja, kad fotono energija būtų tokio pat dydžio kaip energijos skirtumas tarp elektrono energijos E_e ir skylės energijos E_h šuolio metu, t. y.

$$h\nu = E_e - E_h \approx E_g. \quad (3)$$

Generuojamų fotonų energija apytiksliai lygi draustinių energijų juostai E_g , jei tik šiluminė energija yra maža lyginant su draustinių energijų juosta: $kT \ll E_g$. Todėl ir šviestuko spinduliuotės bangos ilgis gali būti nustatomas toks, kokio pageidaujama, parenkant puslaidininkinę medžiagą su atitinkama



1 pav. Elektrono šuolio iš laidumo juostos E_c į valentinę juostą E_v schema. Leistinos krūvininkų būsenos yra tik ant parabolinių kreivių. Sukuriamo fotono energija lygi energijų skirtumui tarp elektrono būsenų prieš šuolį ir po jo.

draustinių energijų juosta šviestukui gaminti. Pavyzdžiui, galio arsenidas (GaAs), kurio draustinių energijų juosta yra 1,42 eV kambario temperatūroje, emituoja 870 nm bangos ilgio spinduliuotę infraraudonojoje spektro dalyje.

Naudinga palyginti vidutinį krūvininkų impulsą su fotono impulsu. Krūvininkas, turintis kinetinę energiją kT ir efektyvą masę m^* , turi impulsą

$$p = m^* v = \sqrt{\left(2m^* \frac{1}{2} m^* v^2\right)} = \sqrt{2m^* kT}. \quad (4)$$

Impulsas fotono, turinčio energiją E_g , gali būti surastas iš d'Broilio sąryšio

$$p = \left(\frac{h}{2\pi}\right)k = \frac{h\nu}{c} = \frac{E_g}{c}. \quad (5)$$

Krūvininkų impulsas, suskaičiuotas pagal formulę (4), ir fotono impulsas, suskaičiuotas naudojantis formule (5), parodo, kad krūvininko impulsas yra viena eile didesnis už fotono impulsą. Dėl šios priežasties elektrono impulsas negali žymiai pakisti šuolio iš laidumo juostos į valentinę juostą metu. Todėl šuolis visada schematiškai vaizduojamas vertikalus ir elektronas gali rekombinuoti tik su ta skylė, kurios impulsas yra lygus elektrono impulsui, arba, kitaip tariant, rekombinuojančių krūvininkų poros bangos skaičiaus k vertė šuolio metu nesikeičia.

Priėmus sąlygą, kad elektrono ir skylės k vertės yra lygios, fotono energijai galima užrašyti energijos mainų lygtį šuolio metu (*joint dispersion relation*):

$$h\nu = E_C + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_e^*} - E_V + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_h^*} = E_g + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_r^*} \quad (6)$$

kur m_r^* yra redukuota masė, lygi

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}. \quad (7)$$

Pasinaudojus energijos mainų lygtimi (6), gali būti suskaičiuojamas būsenų tankis ir jis lygus

$$\rho(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r^*}{(h/2\pi)^2} \right)^{3/2} \sqrt{(E - E_g)}. \quad (8)$$

Krūvininkų pasiskirstymas leistinoje energijos juostoje yra apspręstas Bolcmano pasiskirstymo

$$f_B(E) = e^{-\frac{E}{kT}}. \quad (9)$$

Spinduliavimo intensyvumas, kaip funkcija nuo energijos, yra proporcingas funkcijų (8) ir (9) sandaugai

$$I(E) \propto \sqrt{(E - E_g)} e^{-\frac{E}{kT}} \quad (10)$$

Šviestuko spektro forma, kurią apsprendžia (10) lygtis, pavaizduota 2 paveiksle. Spinduliuotės intensyvumo didžiausia vertė, paprastai vadinama spektro smaile, yra ties

$$E = E_g + \frac{1}{2} kT \quad (11)$$

Spektro plotis ties puse smailės maksimumo yra

$$\Delta E = 1,8 kT \quad (12)$$

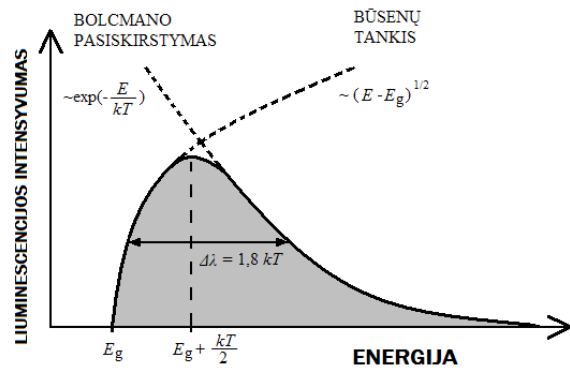
Pavyzdžiui, teorinis kambario temperatūroje

veikiančio GaAs šviestuko, spinduliuojančio ties 870 nm bangos ilgiu, spektro pusplotis yra $\Delta E = 46 \text{ meV}$ arba tai yra $\Delta \lambda = 28 \text{ nm}$.

Šviestuko spektro plotis ties puse didžiausio intensyvumo yra svarbus dydis, o jo siaurumas suteikia šviestukams pranašumų taikymuose. Pirmiausia šviestukų, kurie šviečia regimojoje spektro dalyje, spektro plotis yra siauresnis nei vienos spalvos spektrinis plotis. Be to, yra net siauresnis už tokį vienos spalvos intervalą, kuris dėl akies jautrumo stokos yra žmogaus suvokiamas kaip viena ir ta pati spalva. Pavyzdžiui, raudonos spalvos bangos ilgių sritis yra nuo 622 nm iki 780 nm (žr. 1 lentelę), o raudonų šviesos diodų spektro plotis gali būti apie 18 nm. Dėl to spalvotų šviesos diodų spinduliuojama šviesa žmogui matoma kaip monochromatinė šviesa.

Kita sritis, kur pageidautinas siauras šviestuko spektro plotis, yra šviestukų taikymai optinėse duomenų perdavimo linijose. Dėl dispersijos šviesos impulsai ilguose šviesolaidžiuose yra iškraipomi, t. y. impulsas netenka pradinės formos ir išplinta laike. Tokių disperguotų impulsų seka perdavimo linijos gale praranda diskretiškumą ir perduodama informacija sugadinama. Kuo siauresni šviesos impulsai naudojami, tuo mažiau jie disperguos šviesolaidyje. Tuo pačiu impulsus galima siųsti dažniau, padidėja perdavimo linijos sparta. Taigi, naudojant šviestukus su siauru spektriniu pločiu, pagerinamas optinę liniją charakterizuojantis parametras — linijos spartos ir šviesolaidžio ilgio sandauga.

Savaiminė krūvininkų gyvavimo trukmė šviestukuose iš tiesiatarpio puslaidininkio yra nuo 1 ns iki 100 ns, priklausomai nuo aktyviosios srities legiravimo koncentracijos (krūvininkų koncentracijos) ir medžiagos kokybės. Todėl šviestukų moduliacijos sparta gali siekti iki 1 Gbit/s.



2 pav. Teorinis šviestuko liuminescencijos spektras. Mažesniųjų energijų pusėje (ilgabangis spektro šlaitas) yra apspręstas būsenų tankio funkcijos, o didesniųjų energijų pusėje (trumpabangis energijos šlaitas) spektro pavidalas yra nulemtas šiluminės kristalo energijos.

2. RADIOMETRINIAI IR FOTOMETRINIAI DYDŽIAI

Radiometrija apibrėžiama kaip fizikinių dydžių, kurie apibūdina įvairių rūšių elektromagnetinės spinduliuotės šaltinius ir pačią elektromagnetinę spinduliuotę, matavimas. Radiometrijos tikslas yra apibrėžti matavimo dydžius, vienetus ir metodus, charakterizuojančius elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumą, galią, pernešamą energiją. Be to charakterizuoti pačius spinduliuotės šaltinius objektyviais dydžiais, kuriuos būtų galima lyginti tarpusavyje. Šviesa taip pat yra elektromagnetinės bangos, užimančios nedidelę sritį visoje elektromagnetinių bangų skalėje, todėl apibūdinama radiometriniais dydžiais.

Pagrindinis radiometrinis dydis yra spindulinis srautas. Tai elektromagnetinės bangos pernešamas energijos kiekis per laiko vienetą:

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt}, \quad (13)$$

matuojamas vatais [1W = 1J/s]. Spindulinis intensyvumas yra spindulinis srautas tam tikra kryptimi vieno steradiano dydžio erdviniu kampu:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}. \quad (14)$$

Šis dydis matuojamas vatais į steradianą [W/sr]. Konkretaus šviesos šaltinio spindulinis srautas yra pastovus dydis ir pasiskirstęs erdvėje visomis kryptimis vienodai, taip kaip šviesa yra išspinduliuojama lygiai nepriklausomai nuo krypties. Tačiau spindulinis srautas gali būti perskirstomas erdvėje panaudojant optinius prietaisus, tokius kaip veidrodžiai ir lęšiai. Todėl spindulinis intensyvumas įvairiomis kryptimis yra nevienodas.

Fotometriniai dydžiai yra apibrėžti siekiant įvertinti šviesos (optinio diapazono elektromagnetinės spinduliuotės) ir šviesos šaltinių poveikį žmogaus akiai. Žmogaus akis yra nevienodai jautri įvairių dažnių šviesai. Akies jautrumas skirtingų spalvų šviesai yra aprašomas spektrine veiksmingumo funkcija $V(\lambda)$. Kad žmogaus akyje būtų sukuriamas šviesos pojūtis, šviesos šaltinio skleidžiamos spinduliuotės spektras turi persikloti su $V(\lambda)$ spektru. Fotometrijoje pagrindinis dydis yra šviesinis srautas, matuojamas liumenais [lm], ir jis atitinka radiometrinį dydį — spindulinį srautą:

$$\Phi_f = \frac{1}{M} \cdot \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda; \quad (15)$$

čia $\Phi_e(\lambda)$ yra šaltinio spindulinio srauto spektrinis pasiskirstymas pagal bangos ilgį. Koeficientas

M yra vadinamas mechaniniu šviesos ekvivalentu ir apibrėžiamas kaip galingumas, išreikštas vatais, kuris, spinduliuojant 555 nm bangos ilgio šviesą, sukelia 1 liumeno šviesos srautą. Šio koeficiento reikšmė buvo nustatyta eksperimentiškai

$$M = 0,00147 \text{ W/lm} . \quad (16)$$

Atvirkščias dydis yra vadinamas fotometriniu spinduliavimo ekvivalentu:

$$\frac{1}{M} = 680 \frac{\text{lm}}{\text{W}} . \quad (17)$$

Kartu su šviesiniu srautu Φ_f apibrėžiamas ir šviesinis intensyvumas

$$I_f = \frac{d\Phi_f}{d\Omega} . \quad (18)$$

Tai yra šviesinis srautas kažkuriuo 1 steradiano dydžio erdviniu kampu, matuojamas kandelomis [1cd = 1lm/sr].

Paprastai šviesos šaltiniai spinduliuoja plačiame bangos ilgių intervale ir tik dalis spindulinio srauto kelia šviesos pojūtį žmogui. Įvedamas fizikinis dydis šviesos veiksmingumas — šviesinio srauto santykis su spinduliniu srautu

$$K = \frac{\Phi_f}{\Phi_e} = 680 \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] \frac{\int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda} . \quad (19)$$

Teorinis didžiausias šviesos veiksmingumas yra 680 lm/W ir jis bus tokio šviesos šaltinio, kuris spinduliuoja monochromatinę 555 nm bangos ilgio šviesą. Baltos šviesos našumas yra 250 lm/W .

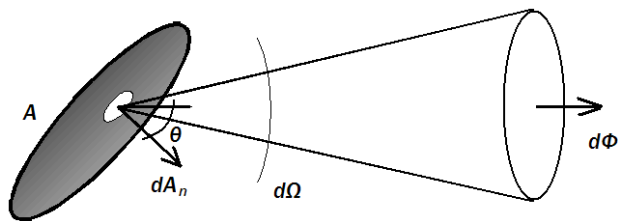
Svarbus fizikinis dydis, kalbant apie šviesos šaltinių veikimo efektyvumą, yra našumas. Šviesos šaltinio sunaudotos elektrinės galios santykis su visa išspinduliuota galia yra vadinamas spinduliniu našumu

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\Phi_e}{IU} . \quad (20)$$

Tai yra radiometrinis dydis, o atitinkamas fotometrinis dydis yra šviesinis našumas — šviesos šaltinio sunaudojamos elektrinės galios santykis su išspinduliuojamos galios dalimi, kuri žmogaus suvokiama kaip šviesa,

$$\eta_f = \frac{\Phi_f}{P} = \frac{\Phi_f}{IU} . \quad (21)$$

Aukščiau aprašytieji dydžiai yra apibrėžiami taškiniais šviesos šaltiniais, todėl praktiškai juos naudoti dažniausiai yra nekorektiška. Realiems baigtinių matmenų šaltiniams įvedamas



3 pav. Skaisčio geometrinė samprata.

fizikinis dydis — skaitis. Jeigu šviesos šaltinio paviršiuje išskirsime plotą dA , tai iš jo pasirinkta kryptimi spinduliuojamas srautas priklausys ir nuo kampo θ tarp šaltinio paviršiaus ir plokštumos, statmenos pasirinktai kryptčiai (3 pav.). Kadangi $dA_n = dA \cos \theta$, tai spindulinis skaitis

$$L_e = \frac{d^2 \Phi_e}{\cos \theta dA d\Omega} = \frac{dI_e}{\cos \theta dA}. \quad (22)$$

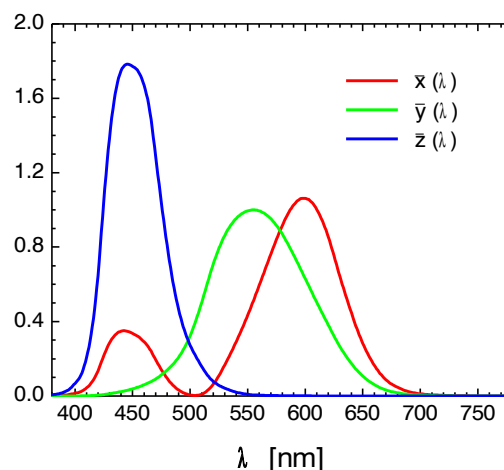
Atitinkamai šviesinis skaitis

$$L_f = \frac{d^2 \Phi_f}{\cos \theta dA d\Omega} = \frac{dI_f}{\cos \theta dA}. \quad (23)$$

Spindulinis skaitis matuojamas vatais į steradianą ir kvadratinį metrą $[\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2]$, o šviesinis skaitis — kandelomis į kvadratinį metrą $[\text{cd}/\text{m}^2]$.

3. KOLORIMETRINIAI DYDŽIAI

Kolorimetriniai dydžiai skirti kiekybiniam spalvų aprašymui. Kaip teisingai nusakyti spalvas skaičiais, yra ne vienas būdas, tačiau Tarptautinė apšvietimo komisija (*Commission Internationale de l'Éclairage*, CIE) 1931 metais nustatė spalvų aprašymo sistemą, paremtą trimis spalvų atitikties funkcijomis $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ir $\bar{z}(\lambda)$. Šios funkcijos yra griežtai skaitmeniškai apibrėžtos ir pavaizduotos 4 paveiksle. Kiekvieną išmatuotą spinduliuotės spektrą $S(\lambda)$ galima palyginti su spalvų atitikties funkcijomis ir nustatyti kiek kiekvienos iš trijų spalvinių komponentių sudaro šviesos šaltinio spalvą. Kitais žodžiais tariant, reikia įvertinti kiek tiriamasis spektras $S(\lambda)$



4 pav. CIS 1931 trys spalvų atitikties funkcijos. Šaltinis: <http://cvision.ucsd.edu/>

1 lentelė. Monochromatinės spalvos:

Spalva	Bangos ilgis λ , nm	Dažnis f , THz	Fotono energija $h\nu$, eV
violetinė	380 – 455	659 – 789	2,72 – 3,26
mėlyna	455 – 492	609 – 659	2,52 – 2,72
žalia	492 – 577	520 – 609	2,15 – 2,52
geltona	577 – 597	502 – 520	2,08 – 2,15
oranžinė	597 – 622	482 – 502	1,99 – 2,08
raudona	622 – 780	384 – 482	1,59 – 1,99

persikloja su standartizuotais spektrais $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ir $\bar{z}(\lambda)$, kurie buvo parinkti pagal žmogaus akies jautrumo spalvai prigimtį. Tuo tikslu apskaičiuojami triveikmiai sandai

$$X = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda ; \quad (24a)$$

$$Y = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) d\lambda ; \quad (24b)$$

$$Z = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) d\lambda . \quad (24c)$$

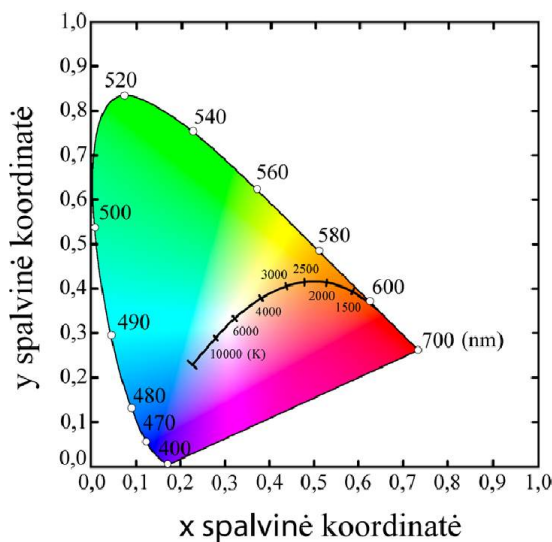
Bet koks šviesos šaltinis charakterizuojamas dviem spalvio koordinatėmis (x, y) , gaunamomis normuojant triveikmius sandus $[XYZ]$ į vieneta:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (25a)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (25b)$$

Trečioji spalvio koordinatė yra išreiškiama per pirmąsias dvi, todėl papildomos informacijos apie šviesos šaltinį neteikia:

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \equiv 1 - x - y . \quad (25c)$$



5 pav. CIE 1931 spalvinė diagrama

pavaizduota 1931 CIE spalvių diagrama. Ant diagramos kontūro lanko, dar vadinamo pasaga, yra

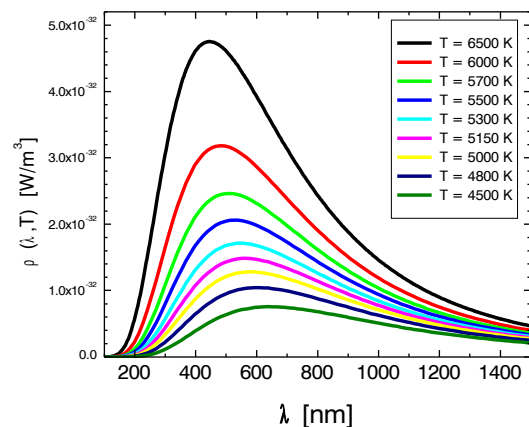
visų monochromatinių spalvų spalvio koordinatės (x, y) . 1 lentelėje surašyti monochromatinių spalvų bangos ilgio, dažnio ir energijos intervalai. Apatinė tiesinė kontūro dalis vadinama purpuriniu kraštu. Spalvių diagramoje yra baltos spalvos sritis. Per ją nubrėžtas taip vadinamas Planko lankas žymi skirtingų temperatūrų juodo kūno emituojamos spinduliuotės spalvio koordinatės. Planko absoliučiai juodo kūno spinduliavimo teorija duoda tokį juodo kūno spinduliavimo spektrinį skirstinį

$$S_{JK}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}; \quad (26)$$

čia h — Planko konstanta, k_B — Bolcmano konstanta, c yra šviesos greitis vakuume ir T — absoliutinė temperatūra. 6 paveiksle yra pavaizduoti apskaičiuoti spektrai pagal (26) dėsnį, esant kelioms juodo kūno paviršiaus temperatūroms. Kaip matome tik aukštesnių temperatūrų kūnai spinduliuoja tokią spinduliuotę, kuri perdengia visas tris spalvų atitikties funkcijas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ir $\bar{z}(\lambda)$, kas reiškia baltos šviesos spinduliavimą. Mažėjant kūno paviršiaus temperatūrai spinduliuotės spektras slenkasi į ilgabangę skalės pusę.

Remiantis absoliučiai juodo kūno spinduliavimo teorija, baltos šviesos šaltiniai yra nusakomi spalvine temperatūra. Jei kalbame apie kaitrines lemputes, kuriose spinduliuotės šaltinis yra įkaitintas volframo siūlas, tai spalvinė temperatūra sutampa su volframo temperatūra lemputėje. Tačiau baltiems šviestukams toks aprašymas pritaikytas tiesiog nusakyti baltos spalvos kokybę. Artimos baltai šviesai šviesos šaltiniai, esantys šalia Planko lanko, nusakomi koreliuota spalvine temperatūra, kuri nustatoma nubrėžus izotemperatūrinę tiesę nuo charakterizuojamo šaltinio taško su koordinatėmis (x, y) CIE spalvių diagramoje iki Planko lanko, kur susikirtimo taškas žymės koreliuotos spalvinės temperatūros vertę baltam šviesos šaltiniui.

Spalvinė diagrama yra patogi analizuojant spalvų maišymo galimybes. Jeigu turime du šviesos šaltinius su spalvio koordinatėmis (x_1, y_1) ir (x_2, y_2) , tai keičiant tų šaltinių spindulinius srautus Φ_e galime sukurti visus atspalvius, esančius linijoje tarp pirminių šviesos šaltinių. Jeigu turėsime trijų spalvų šviesos šaltinius, galėsime sukurti atspalvius, esančius plote, apribotame tiesių, jungiančių tris pirminius šviesos šaltinių koordinacinius taškus.



6 pav. Absoliučiai juodo kūno spinduliuotės spektras keičiantis kūno paviršiaus temperatūrai

Bendrai spalvų maišymas su n skaičiumi skirtingų šviesos šaltinių yra užrašomas lygtimis:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \Phi_{ei}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{ei}} \quad \text{ir} \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \Phi_{ei}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{ei}}. \quad (27)$$

Plačiai naudojama trijų spalvų RGB (*red, green, blue*) maišymo sistema kompiuterių ir televizorių ekranuose iš tikrųjų leidžia atkurti tik dalį visų atspalvių ir visai nėra galimybės atvaizduoti monochromatinių spalvų, išskyrus tris pirminius: raudoną, žalią ir mėlyną.

Žinodami šviesos šaltinio spalvio koordinatės, galime nustatyti tam tikrus šaltinio kolorimetrinius parametrus. Dominuojantis bangos ilgis λ_d bus taškas spalvinėje diagramoje su koordinatėmis (x_d, y_d) ant pasagos krašto. Jis randamas sujungus žinomo šviesos šaltinio spalvio tašką su koordinatėmis (x, y) ir spalvinės diagramos centrą C , kurio koordinatės yra $(0,3101; 0,3162)$. Pratęsus tiesę iki artimiausio pasagos krašto bus nustatytas dominuojantis šviesos šaltinio bangos ilgis, kuris nebūtinai sutampa su šviesos šaltinio liuminescencijos spektro maksimalaus intensyvumo bangos ilgiu. Spalvos grynumas yra santykinis spalvio taško nuotolis nuo diagramos centro C ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$p = \frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{\sqrt{(x_d - x_0)^2 + (y_d - y_0)^2}}. \quad (28)$$

4. ŠVIESTUKO NAŠUMAS

Įjungtas į elektros grandinę šviestukas elektros energiją verčia į elektromagnetinę spinduliuotę. Svarbus šviestuko, kaip spinduliuotės šaltinio, parametras, nusakantis jo energijos konvertavimo efektyvumą ir leidžiantis palyginti su kitais spinduliuotės šaltiniais, yra spindulinis našumas. Kaip jau buvo minėta 2 skyriuje, tai yra santykis absoliučiai viso spindulinio srauto, išeinančio iš šviestuko, su suvartota elektrine galia (20). Kartu apibrėžiamas šviesinis našumas (21), parodantis kokia dalis visos šviestuko konvertuojamos elektros energijos virsta regima šviesa. Beje, skaičiuojant šviesinį srautą pagal (15) formulę yra įvertinamas nevienodas skirtingo dažnio šviesos poveikis žmogaus akių.

Turint omenyje šviestuko emisijos mechanizmą galima samprotauti, kad idealiu atveju kiekvienas elektros grandine tekantis elektronas, pasiekęs šviestuko aktyviąją sritį, rekombinuoja joje spinduliniu būdu ir šio proceso metu sukuriamas fotonas apytikriai bus tokios energijos, kokios

yra draustinės energijos juosta aktyviojoje šviestuko srityje. Tokiu atveju, jeigu visi fotonai sėkmingai išspinduliuojami į aplinką, šviestuko spindulinis našumas būtų $\Phi_e = 1$. Tačiau realybėje egzistuoja eilė priežasčių, kodėl šviestukai tik dalį suvartojamos elektros energijos paverčia šviesa. Skirtingos priežastys turi skirtingą fizikinę prigimtį, o galutinis šviestuko spindulinis našumas, surandamas pagal (20) formulę, yra sąlygotas visų priežasčių kartu.

Norint įvardinti šviestuko efektyvumą mažinančius procesus, spindulinis našumas gali būti išreikštas kaip sandauga dviejų santykinų dydžių:

$$\eta_e = \eta_{ext} \eta_m ; \quad (29)$$

čia η_{ext} yra vadinamas išoriniu kvantiniu našumu, o η_m — šviestuko maitinimo našumu. Išorinis kvantinis našumas reiškia išspinduliuojamų į aplinką fotonų skaičiaus santykį su pro šviestuką pratekėjusių elektronų skaičiumi per vienetinį laiko tarpą:

$$\eta_{ext} = \frac{N_{fotonu}}{N_{elektronu}} = \frac{\Phi_e}{\frac{I}{e}} ; \quad (30)$$

Šviestuko maitinimo našumas yra vidutinės išspinduliuojamų fotonų energijos $h\bar{\nu}$ santykis su energija, kurią elektrono skylės pora įgyja elektros grandinėje iš maitinimo šaltinio:

$$\eta_m = \frac{h\bar{\nu}}{qU} ; \quad (31)$$

čia U yra įtampa, krentanti šviestuke, o q yra elementariojo krūvio dydis (konstanta). Reikia paminėti, kad pagal pastarąjį sąryšį maitinimo našumas gali būti ir didesnis už vienetą, jeigu tik bus patenkinta sąlyga $h\bar{\nu} > qU$. Praktiškai tai neretai išpildoma, kai šviestukas dirba mažoms maitinimo įtampoms esant. Šis paradoksas aiškinamas tuo, kad krūvininkai kristale turi ne tik energiją, įgytą elektriniame lauke, bet ir šiluminę energiją kT . Ši energija šuolio metu taip pat perduodama kvantui, todėl vidutinė fotonų energija gali būti šiek tiek didesnė nei krūvininkų įgaunama energija elektros grandinėje. Tokiomis sąlygomis šiluminė kristalo energija spinduliuojama per fotonus, todėl kristalas vėsta. Kad šis reiškinys tikrai būtų stebimas praktikoje, šviestuko išorinis kvantinis našumas η_{ext} turi būti artimas vienetui, o jo nuosekloji varža $r_s \leq 0$.

Realūs šviestukai visada kaista, nes išorinis kvantinis našumas yra kur kas mažesnis už vienetą, t. y. visada nemaža elektros energijos dalis paverčiama šiluma, o ne išspinduliuojama. Be to, šviestukas visada turės nuosekliąją varžą ir dėl prijungtos įtampos luste išsiskirs Džaulio šiluma.

Išorinį kvantinį našumą lemia trys veiksniai: (i) spindulinės rekombinacijos efektyvumas

puslaidininkyje, vadinamas vidiniu kvantiniu našumu η_{rad} ; (ii) krūvininkų injekcija į šviestuko aktyviają sritį, vadinama injekcijos našumu η_{inj} ir (iii) šviesos ištraukimo iš šviestuko lusto efektyvumas, vadinamas optiniu našumu η_{opt} . Todėl išorinis kvantinis našumas yra sandauga pastarųjų trijų dydžių:

$$\eta_{ext} = \eta_{rad}\eta_{inj}\eta_{opt}. \quad (32)$$

Vidinis kvantinis našumas yra santykis šviestuko aktyviojoje srityje spinduliniu būdu rekombinavusių elektrono ir skylės porų skaičiaus su iš viso rekombinavusių elektrono ir skylės porų skaičiumi. Tai daugiausia priklauso nuo fundamentalių puslaidininkinės medžiagos savybių ir nuo kristalinių sluoksnių, sudarančių šviestuko struktūrą, kokybės. Injekciniu našumu įvertinama tai, kad ne visi elektronai, tekantys pro šviestuką, patenka į aktyviają sritį, kur vyksta efektyvi porų rekombinacija. Paprastai dalis elektros srovės apteka aktyviają sritį tekėdama kitais mažesnio laidumo kanalais. Siekiant sumažinti nenaudingas nuotėkio sroves, šviestukų aktyvioji sritis apauginama didesnės varžos kristaliniais sluoksniais, be to, optimizuojama elektrodų geometrija. Optinis našumas reiškia santykį iš šviestuko į laisvą erdvę patekusių fotonų skaičiaus su visais generuotais fotonais. Iš tikrųjų tik nedidelė dalis generuotų fotonų palieka šviestuką, nes daug jų yra tiesiog sugeriami neskaidraus padėklo arba dėl daugkartinių atspindžių grįžta atgal į šviestuką, kur yra reabsorbuojami. Dėl didelio skirtumo tarp oro ir puslaidininkinės medžiagos lūžio rodiklių egzistuoja tik tam tikras erdvinis kampas, apibrėžiantis fotonų išstrūkimo kūgį, kuriuo spinduliuojama šviesa turi galimybę palikti šviestuką. Visomis kitomis kryptimis, šviestukuose be papildomų konstrukcijos pakeitimų, sklindanti spinduliuotė bus atspindėta dėl visiško atspindžio.

5. SPINDULIUOTĖS KAMPINĖS DIAGRAMOS

Šviesą spinduliuojančios medžiagos lūžio rodiklio skirtumas su aplinkos ar supančios medžiagos lūžio rodikliu lemia anizotropinę spinduliuotės kampinę diagramą. Puslaidininkinės medžiagos, iš kurių gaminami šviestukai, paprastai turi didelį lūžio rodiklį. Pavyzdžiui, InAlGaAs lūžio rodiklis $n \approx 3,5$, o AlGaInP — $n \approx 3,4$. Mažesnę lūžio rodiklio vertę turi AlInGaN medžiaga: $n \approx 2,5$. Šviestukams, pagamintiems iš puslaidininkinių medžiagų su dideliu lūžio rodikliu ir turintiems planarinę paviršiaus struktūrą, gaunama lambertinė spinduliuotės kampinė diagrama. Paveiksle 7(a) yra pavaizduotas taškinis šviesos šaltinis, esantis netoli ribos tarp puslaidininkinės medžiagos ir oro. Sakykime, kad šviesos spindulys išeina iš šaltinio kampu φ atžvilgiu paviršiaus

normalės. Spindulys, lūžęs puslaidininkio oro riboje, atsilenkia kampu Φ atžvilgiu paviršiaus normalės. Šie du kampai yra susieti šviesos lūžimo (Snelio) dėsnio, kuris, esant mažam kampui φ , yra užrašomas taip:

$$\bar{n}_p \varphi = \bar{n}_{oro} \sin \Phi. \quad (33)$$

Šviesos spindulys, puslaidininkyje išeinantis iš šaltinio kampu $d\varphi$, ore bus atlenktas kampu $d\Phi$ taip, kaip parodyta paveiksle 7(a). Diferencijuojant lygtį atžvilgiu kampo Φ , ir išreiškus iš lygties $d\Phi$, gauname, kad

$$d\Phi = \frac{\bar{n}_p}{\bar{n}_{oro}} \frac{1}{\cos \Phi} d\varphi. \quad (34)$$

Išspinduliuojamos galios tvermė reikalauja, kad optinė galia, spinduliuojama kampu $d\varphi$ puslaidininkyje, būtų lygi optinei galiai, spinduliuojamai kampu $d\Phi$ ore. Todėl galima užrašyti

$$I_p dA_p = I_{oro} dA_{oro}; \quad (35)$$

čia I_p ir I_{oro} yra šviesos intensyvumas puslaidininkyje ir ore, matuojamas $[W/m^2]$. Laikydami, kad kampinė diagrama turi turėti cilindrinę simetriją, galime pasirinkti ploto elementą tokį, kaip parodyta paveiksle 7(b). Toks ploto elementas ore bus lygus:

$$dA_{oro} = 2\pi r \sin \Phi r d\Phi. \quad (36)$$

Iš formulių (34) ir (35) seka, kad

$$dA_{oro} = 2\pi r^2 \frac{\bar{n}_p^{-2}}{\bar{n}_{oro}^{-2}} \frac{1}{\cos \Phi} \varphi d\varphi. \quad (37)$$

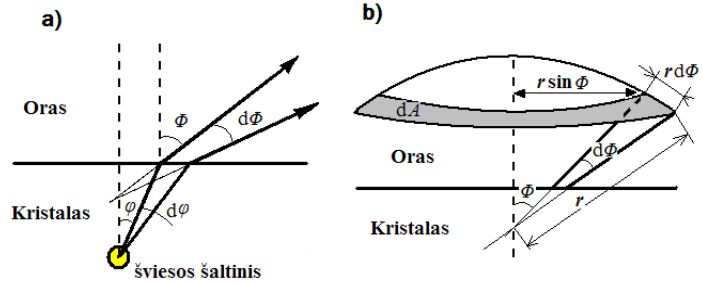
Panašiai kaip ore, puslaidininkyje pasirinktas ploto elementas bus lygus

$$dA_p = 2\pi r \sin \varphi r d\varphi \approx 2\pi r^2 \varphi d\varphi. \quad (38)$$

Šviesos intensyvumas puslaidininkyje nuotoliu r nuo šviesos šaltinio yra lygus šaltinio galiai, padalintai iš sferos su spinduliu r paviršiaus ploto, t. y.

$$I_p = \frac{P_{\text{šalt}}}{4\pi r^2}. \quad (39)$$

Dabar šviesos intensyvumas ore gali būti užrašytas pasinaudojus formulėmis (35), (37), (38) ir (39). Tokiu būdu gaunama lambertinės kampinės diagramos išraiška

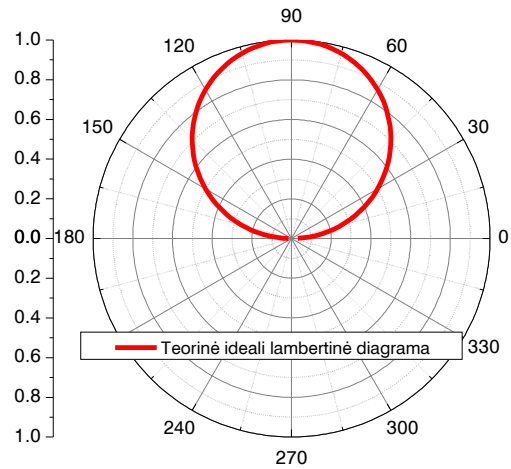


7 pav. Šviesos spindulių praėjimo pro kristalo ir oro ribą geometrija. (a) apibrėžiami spindulių sklaidimo kampai kristale ir ore, (b) apibrėžiamas ploto elementas dA .

$$I_{oro} = \frac{P_{salt}}{4\pi r^2} \frac{n_{oro}^{-2}}{n_p^{-2}} \cos\Phi. \quad (40)$$

Kaip matome, lambertinėje diagramoje intensyvumas nuo kampo priklauso pagal kosinuso dėsnį. Intensyvumas yra didžiausias statmenai puslaidininkio paviršiui, kai $\Phi = 0^\circ$. Ties kampu $\Phi = 60^\circ$, spinduliuotės intensyvumas sumažėja 2 kartus. Lambertinė spinduliuotės diagrama yra pavaizduota 8 paveiksle.

Gali būti ir kitokios formos kampinės diagramos, negu kad tik planariniam šviestuko paviršiui būdinga lambertinė diagrama. Izotropinė kampinė diagrama, vadinama pussferine, bus tokių šviestukų, kurių aktyvioji sritis spinduliuoja iš sferos centro, o puslaidininkio ir oro riba turi pussferės formą.



8 pav. Lambertinis šviestuko intensyvumo kampinis pasiskirstymas.

Jeigu šviestuko paviršius bus parabolinis, tuomet intensyvumo kampinė diagrama bus stipriai kryptinė. Tačiau tiek parabolinius, tiek pussferinius šviestukų paviršius pagaminti sudėtinga.

Visą optinę galią, spinduliuojamą į orą, galima suskaičiuoti integruojant intensyvumą per visą pussferę. Tokiu būdu pilna optinė galia bus

$$P_{oro} = \int_{\Phi=0^\circ}^{90^\circ} I_{oro} 2\pi r \sin\Phi r d\Phi. \quad (41)$$

Naudojant lambertinę kampinę spinduliuotės diagramą, I_{oro} išraišką (40) įstatome į (41). Pasinaudojus trigonometriniu sąryšiu $\cos\Phi \sin\Phi = (1/2)\sin(2\Phi)$, suskaičiuojamas integralas duoda rezultatą

$$P_{oro} = \frac{P_{salt}}{4} \frac{n_{oro}^{-2}}{n_p^{-2}}. \quad (42)$$

Tokia dalis visos šviestuko spinduliuojamos galios išeina į aplinką ir ta dalis tuo mažesnė, kuo didesnis puslaidininkinės medžiagos lūžio rodiklis n_p . Be to, čia atliktuose skaičiavimuose nebuvo įskaityti Fresnelio atspindžiai nuo dviejų medžiagų su skirtingais lūžio rodikliais ribos. Paprastai dėl Fresnelio atspindžio per ribą praeinančių spindulių galia sumažėja dydžiu

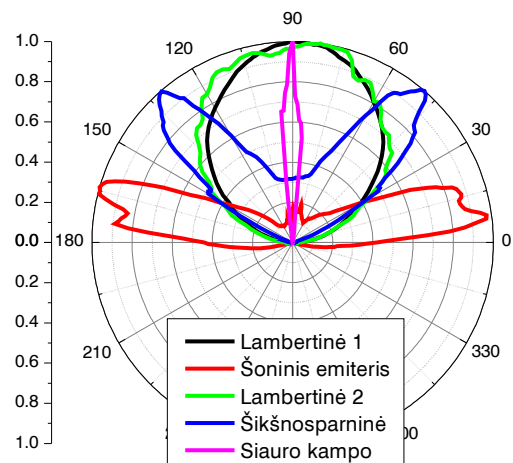
$$T = 1 - R = 1 - \left(\frac{\bar{n}_p - \bar{n}_{oro}}{\bar{n}_p + \bar{n}_{oro}} \right)^2 = \frac{4\bar{n}_p \bar{n}_{oro}}{(\bar{n}_p + \bar{n}_{oro})^2}. \quad (43)$$

Šviesos ištraukimas iš kristalo yra pagerinamas suformuojant kupolo pavidalo skaidrią dangą iš epoksidinės dervos. Kadangi epoksidinės dervos lūžio rodiklis dydžiu yra tarp oro ir puslaidininkio lūžio rodiklių, t. y. $\bar{n}_p > \bar{n}_{ed} > \bar{n}_{oro}$, todėl padidėja visiško atspindžio kampas šviesai, sklindančiai per puslaidininkio ir epoksidinės dervos sąlyčio ribą. Galioja toks sąryšis, siejantis optinį našumą su ribiniu visiško atspindžio kampu dviejų aplinkų riboje:

$$\frac{\eta_{ed}}{\eta_{oro}} = \frac{1 - \cos(\varphi_{p,ed})}{1 - \cos(\varphi_{p,oras})}; \quad (44)$$

čia η_{ed} yra optinis našumas šviestuko su epoksidine danga, η_{oro} — optinis našumas šviestuko be epoksidinės dangos, o $\varphi_{p,ed}$ ir $\varphi_{p,oras}$ yra visiško atspindžio kampai puslaidininkio ir epoksidinės dervos bei puslaidininkio ir oro aplinkų ribose. Be to, dėl kupolo formos, visiško atspindžio kampas oro ir epoksidinės dervos aplinkoje yra apie 90° .

Be jau aptartos naudos, gaunamos iš šviestukų epoksidinės dangos, reikia paminėti ir tai, kad šviestuko lustas yra apsaugomas nuo destruktivaus aplinkos poveikio. Taipogi, iš skaidrios epoksidinės dervos galima formuoti lęšius ir tokiu būdu išgauti norimą šviestuko spinduliuotės intensyvumo kampinį pasiskirstymą, kaip pavaizduota 9 paveiksle.



9 pav. Įvairios šviestukų spinduliuotės kampinės diagramos. Toks intensyvumo pasiskirstymas išgaunamas formuojant specialios formos epoksidinės dervos dangas aplink šviestuko kristalą.

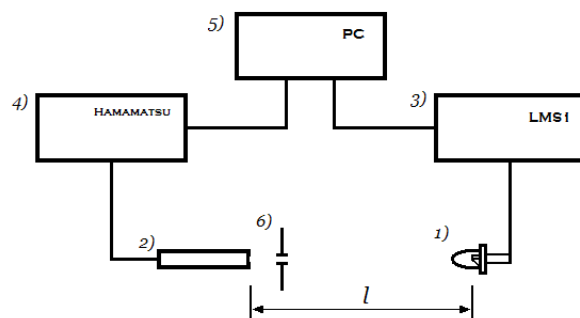
6. LABORATORINIO DARBO METODIKA

6.1. Pirmoji laboratorinio darbo užduotis:

Išmatuoti raudono ir mėlyno šviestukų liuminescencijos spektrus. Nustatyti spektrų smailių padėtis, spektrų pločius ties puse didžiausio intensyvumo bei apskaičiuoti kolorimetrinius šviestukų parametrus.

Pirmajai darbo užduočiai atlikti matuojamas šviestukų elektroliuminescencijos intensyvumo spektrinis pasiskirstymas santykiniais vienetais $S'(\lambda)$. Matavimo principinė schema pavaizduota 10 paveiksle. Tiriamasis šviestukas (1) yra įtaisomas optomechaniniame stovelyje priešais spektrometro šviesolaidinę spinduliuotės surinkimo galvutę (2), toliau vadinama detektoriumi. Šviestukas koaksaliniu kabeliu sujungiamas su srovės šaltiniu LMS1 (3); jungiama prie jungties PW. Srovės šaltinis yra valdomas per kompiuterį (5), naudojant programą *SpektroLAB* (v1.0 beta). Naudojimosi instrukcijos yra pridėtos prie laboratorinio darbo aprašo (Priedas 1). Šviestukas įjungiamas nustatant vardinę maitinimo srovę, kuri yra lygi 30 mA raudonam šviestukui ir 20 mA mėlynam šviestukui. Matavimai gali būti pradėti šviestukui šviestus daugiau nei 10 min., tiek laiko reikia, kad nusistovėtų šviestuko lusto temperatūra. Reikia paminėti, kad kompiuteris turi būti įjungiamas tik po to, kai jau yra įjungti spektrometras ir maitinimo šaltinis. Šiame darbe spektrų matavimui ir analizei yra naudojamas *Hamamatsu* gamintojo spektrometras (4), kuris valdomas per kompiuterį (5) naudojant specializuotą programą *PMA Software* (v3.1.0). Naudojimosi šia programa instrukcijos pridėtos prie laboratorinio darbo aprašo priede 2.

Ruošiantis matavimui svarbu tinkamai surinkti matavimo schemą. Turi būti užtikrinta, kad detektoriaus apertūra būtų tame pačiame aukštyje kaip ir šviestuko lustas, matuojant nuo optinio stalo paviršiaus.



10 pav. Principinė matavimo schema šviestuko liuminescencijos spektro matavimui: 1) Tiriamasis šviestukas; 2) Šviesolaidinė spinduliuotės surinkimo galvutė (detektorius); 3) Srovės šaltinis; 4) Spektrometras; 5) Kompiuteris; 6) Diafragma (jei reikalinga).

Taip pat svarbu yra pastatyti šviestuką tiesiai nukreipiant jį į detektorių. Kadangi šiame darbe tiriamų šviestukų spinduliuojamo intensyvumo didžiausia vertė yra statmena lusto paviršiaus kryptimi (9 paveiksle ši kryptis yra ties 90°), tai korektiškai įtaisyti šviestuką galima matuojant intensyvumo vertę spektrometru ir tuo pat metu koreguojant šviestuko padėtį optomechaninio stovelio pozicionavimo sraigtais. Toks būdas leidžia tinkamai ir nesunkiai parengti matavimo schemą. Tuo tikslu spektrometro valdymo programoje turi būti įjungiamas realaus laiko monitoringo režimas. 10 paveiksle yra pažymėtas atstumas l nuo švietuko lusto iki detektoriaus. Jis pasirinkamas laisvai intervale nuo 1 m iki 2 m. Gali būti taip, kad intensyvumas iš šviesos diodo yra didesnis už ribinį spindulinį srautą, kuris gali būti matuojamas spektrometru. Tokiu atveju spektrometras yra užsotinamas ir valdymo programa apie tai praneša perspėjimu kompiuterio monitoriuje, o matavimas nutraukiamas. Prieš pradėdant matuoti, būtina reikia patikrinti ar maksimalus šviestuko spinduliuotės intensyvumas neviršija spektrometru matuojamos ribos. Todėl anksčiau minėtas maksimalaus šviestuko spinduliuotės intensyvumo nustatymas yra būtinas. Jei spektrometras užsotinamas, tarp spektrometro spinduliuotės surinkimo galvutės ir šviestuko reikia įterpti diafragmą (6), kuri sumažina į spektrometrą patenkantį spindulinį srautą. Be to, galima didinti atstumą l tarp detektoriaus ir šviestuko. Dėl tos pačios priežasties parenkama mažiausia galima ekspozicijos trukmė, lygi 19 ms. Šis parametras keičiamas spektrometro valdymo programoje (žr. Priedą 2). Nustačius mažą ekspozicijos trukmę, vidurkinimui naudojamas pakartotinių matavimų skaičius turi būti didesnis.

Šviestuko spektro matavimas atliekamas visiškoje tamsoje. Prieš pat spektro matavimą reikia išmatuoti spektrometro tamsinę srovę, kuri automatiškai bus atimta iš matavimo rezultato. Išmatuotas spektras netrukus atvaizduojamas monitoriuje. Pasinaudojus spektro analizei skirtus žymeklius, iš karto galima sužinoti spektro smailės padėtį, arba spektro plotį ties puse didžiausio intensyvumo. Išmatuotas spektras išsaugomas .txp failo formatu, kad vėliau būtų galima įkelti į duomenų apdorojimui skirtą programinės įrangos paketą, pavyzdžiui *OriginPro*.

Siekiant suskaičiuoti šviestukų kolorimetrinius parametrus pirmiausia reikia surasti spalvio koordinatas (x, y) . Kaip tai padaryti yra aprašyta šio laboratorinio darbo 3-iajame skyriuje. Galima pridurti tai, kad skaičiuojant triveikmius sandus $[XYZ]$ pagal formules (24), reikia turėti spalvų atitikties funkcijas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ir $\bar{z}(\lambda)$, kurių skaitmenines išraiškas galima surasti Internetiniu adresu [5]. Turint skaitmenines funkcijų išraiškas, matematinės operacijos su jomis atliekamos programinės įrangos paketu *OriginPro* ar kitu.

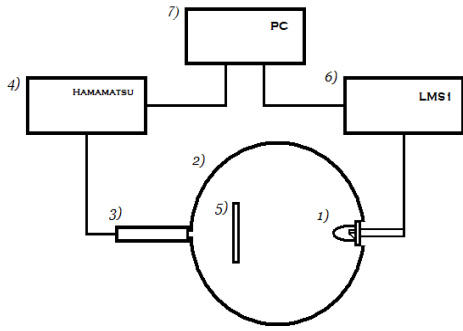
6.2. Antroji laboratorinio darbo užduotis:

Išmatuoti balto ir žalio šviestukų optinio išėjimo srauto priklausomybes nuo maitinimo srovės. Apskaičiuoti spindulinį ir šviesinį našumus bei šviesos veiksmingumą.

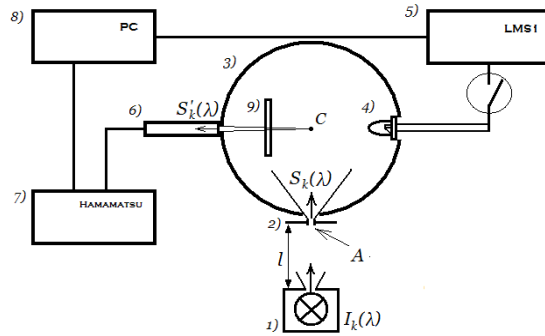
Šviestuko našumas yra spinduliuojamos optinės galios santykis su suvartojama elektrine galia, kaip tai jau buvo apibrėžta formulėmis (20) ir (21). Optinės galios matavimai yra ypatingi tuo, kad reikia išmatuoti galios spektrinį skirstinį absoliučiais dydžiais, o tai reiškia, kad turi būti surinkti ir užfiksuoti visi fotonai, kurie išspinduliuojami šviestuko per vienetinį laiko tarpą. Tuo tikslu naudojama integruojanti sfera, kuri leidžia surinkti visą šviestuko spinduliuotę, prarandant tik labai nedidelę jos dalį dėl neišvengiamų įrangos netobulumų. Integruojanti sfera yra tuščiaviduris rutulys, kurio vidinis paviršius padengtas specialiais dažais, puikiai atspindinčiais ir sklaidančiais elektromagnetinę spinduliuotę plačiame bangos ilgių intervale. Į tokios sferos vidų patalpinto šviestuko spinduliuojamas srautas dėl daugkartinių atspindžių nuo sienelių pasiskirsto vienodai visu vidiniu sferos paviršiumi, kitaip tariant, visomis kryptimis nuo sferos centro. Šviestuko intensyvumo kampinis pasiskirstymas yra eliminuojamas, nes bet kuriuo vienetiniu erdvinio kampu nuo integruojančios sferos centro sklis vienodo intensyvumo spinduliuotė ir net nesvarbu, kur yra įtaisytas šviestukas: ar sferos centre, ar bet kur prie sferos sienelės, kas yra lengviau išpildoma techniškai.

Eksperimento principinė schema pavaizduota 11 paveiksle. Kaip parodyta, tiriamasis šviestukas (1) pritaikomas prie integruojančios sferos (2) vidinio paviršiaus, užtikrinant tą sąlygą, kad visa šviestuko spinduliuotė turi būti surinkta sferoje. Priešais šviestuką, kitoje sferos pusėje, yra padarytas plyšys detektoriumi (3). Kad į spektrometrą (4) nepatektų tiesioginiai spinduliai iš šviestuko, sferoje yra įtaisyta apsauginė sienelė (5), padengta tokiais pačiais dažais, kaip ir visas integruojančios sferos vidinis paviršius. Šviestuko srovės šaltinis (6) tuo pačiu yra ir voltmetras, matuojantis įtampą, krentančią šviestuke. Šaltinio LMS1 valdymo programa *SpektroLAB* (v1.0 *beta*) yra pritaikyta šviestukų voltamperinėms charakteristikoms matuoti (žr. Priedą 1), todėl panaudojama šviestuko elektrinei galiai matuoti.

Kaip jau buvo minėta, integruojanti sfera paskirsto šviestuko generuojamą spindulinį srautą visomis kryptimis vienodai. Tarkim, kad integruojančios sferos spindulys yra R . Detektoriaus spinduliuotės surinkimo apertūros, per kurią šviesa surenkama į šviesolaidį, plotas yra $A = \pi r^2$, kur



11 pav. Principinė šviestuko liuminescencijos srauto matavimo schema: 1) Šviestukas; 2) Integruojanti sfera; 3) Šviesolaidinė spinduliuotės surinkimo galvutė (detektorius); 4) Spektrometras; 5) Pertvara; 6) Srovės šaltinis; 7) Kompiuteris.



12 pav. Principinė kalibracinės kreivės matavimo schema: 1) Kalibracinė lempa su žinomu intensyvumo spektriniu pasiskirstymu $I_k(\lambda)$; 2) Diafragma su žinomo ploto plyšiu; 3) Integruojanti sfera; 4) Šviestukas (išjungtas); 5) Srovės šaltinis; 6) Šviesolaidinė spinduliuotės surinkimo galvutė (detektorius); 7) Spektrometras; 8) Kompiuteris; 9) Pertvara. Papildomai yra pavaizduota kalibracinės lempos spinduliuotės srautai: į sferą ir matuojamas srautas $S'_k(\lambda)$.

r — apertūros spindulys. Tada erdvinis kampas, kuris yra apribotas detektoriaus apertūros yra

$$\Gamma = \frac{A}{R^2}. \quad (45)$$

Pagal apibrėžimą intensyvumas yra spindulinis srautas tam tikra kryptimi vieno steradiano dydžio erdvinio kampu. Konkrečiomis eksperimento sąlygomis Γ kampu išmatuotas galios spektrinis pasiskirstymas $S_r(\lambda)$ turi būti perskaičiuotas vienetiniam erdviniam kampui, kas bus lygu intensyvumo spektriniam pasiskirstymui:

$$I(\lambda) = \frac{S_r(\lambda)}{\Gamma}. \quad (46)$$

Laikant, kad šviestuko spinduliuotė integruojančioje sferoje yra surenkama visa, t. y. nuostoliai yra nykstamai maži, lyginant su matuojamu dydžiu, šviestuko spindulinės galios spektrinis pasiskirstymas absoliučiais vienetais $S(\lambda)$ bus lygus intensyvumo spektriniam pasiskirstymui, suintegruotam per visą sferą pagal erdvinį kampą:

$$S(\lambda) = \int_0^{4\pi} I(\lambda) d\Gamma = 4\pi I(\lambda). \quad (47)$$

Skaičiuojant rezultatus iš eksperimentinių duomenų remtis vien matematiniais skaičiavimais, kurie neįvertina eksperimento paklaidų, yra nekorektiška, ypač, kai nežinomos paklaidų vertės. Šiame eksperimente pagrindinės sisteminės paklaidos kyla dėl šviestuko spinduliuotės nuostolių integruojančioje sferoje, nes spinduliuotė atspindintis ir sklaidantis paviršius kažkurią dalį

spinduliuotės sugeria. Dalis spinduliuotės palieka sferą pro plyšius. Spektrometras taip pat įneša sistemine paklaidą dėl nevienodo jautrio skirtingo bangos ilgio spinduliuotei.

Metodiškai teisinga yra lyginti tiriamo šviestuko išmatuotąjį spektrą su kalibracinės lempos spektru, išmatuotu tomis pačiomis sąlygomis. Kalibracinės lempos intensyvumo spektrinis pasiskirstymas $I_k(\lambda)$ paprastai būna pateikiamas lempos specifikacijose. Tokio eksperimento schema pavaizduota 12 paveiksle. Kalibracinė lempa (1) pastatoma atstumu l nuo diafragmos (2), kurios plyšio plotas yra žinomas ir lygus A . Kalibracine lempa šviečiama į integruojančią sferą (3) ir išmatuojamas galios spektrinis pasiskirstymas $S'_k(\lambda)$. Matavimo metu šviestukas (4) yra išjungiamas (5). Koks spinduliuotės srautas patenka į sferą, galime apskaičiuoti pagal formulę:

$$S_k(\lambda) = \frac{AI_k(\lambda)}{l^2}. \quad (48)$$

Į sferą patenkančio srauto spektrinio skirstinio santykis su išmatuotuoju duoda kalibracinę kreivę

$$K(\lambda) = \frac{S_k(\lambda)}{S'_k(\lambda)}, \quad (49)$$

iš kurios padauginus išmatuotąjį šviestuko spektrinį galios skirstinį $S'(\lambda)$, eliminuojamos visos eksperimento sisteminės paklaidos, įtakojusios matavimo rezultatą:

$$S(\lambda) = K(\lambda)S'(\lambda) \quad (50)$$

Šviestuko spinduliuojamas spindulinis srautas Φ_e suskaičiuojamas integruojant galios spektrinį pasiskirstymą $S(\lambda)$ pagal bangos ilgį intervale nuo 0 iki ∞ , o šviesinis srautas Φ_f suskaičiuojamas pagal (15) formulę. Nubraižoma priklausomybė $\Phi_e(I)$. Pagal (20) ir (21) formules suskaičiuojamas spindulinis ir šviesinis našumai, o jų santykis bus šviestuko šviesos veiksmingumas.

6.3. Trečioji laboratorinio darbo užduotis:

Išmatuoti spalvoto šviestuko spinduliuotės kampinę diagramą. Įvardinti jos rūšį. Išmatuoti balto šviestuko koreliuotos spalvinės temperatūros priklausomybę nuo spinduliavimo kampo.

Pasirinktos spalvos šviestukas įtaisomas ant goniometro. Būtina kruopščiai įtaisyti šviestuką taip, kad jo lustas būtų goniometro sukimosi ašyje ir sukiojant goniometro staliuką, liktų tame

pačiame taške. Matavimo schema yra ekvivalenti schemai pirmosios laboratorinio darbo užduoties, kuri yra pavaizduota 10 paveiksle. Atstumu l nuo šviestuko už diafragmos pastatomas detektorius. Vis trys elementai, šviestukas, diafragma ir detektorius, turi būti išstatyti vienoje optinėje ašyje. Maitinimo šaltiniu nustatoma vardinė šviestuko srovė. Matavimus galima pradėti po 10 minučių nuo šviestuko įjungimo, kai nusistovi šviestuko lusto temperatūra. Šviestuko emisijos spektras spektrometru matuojama kas 2° pasukant goniometro staliuką, o vietomis, kur intensyvumo pokytis staigus, pageidautina matuoti 1° žingsniu.

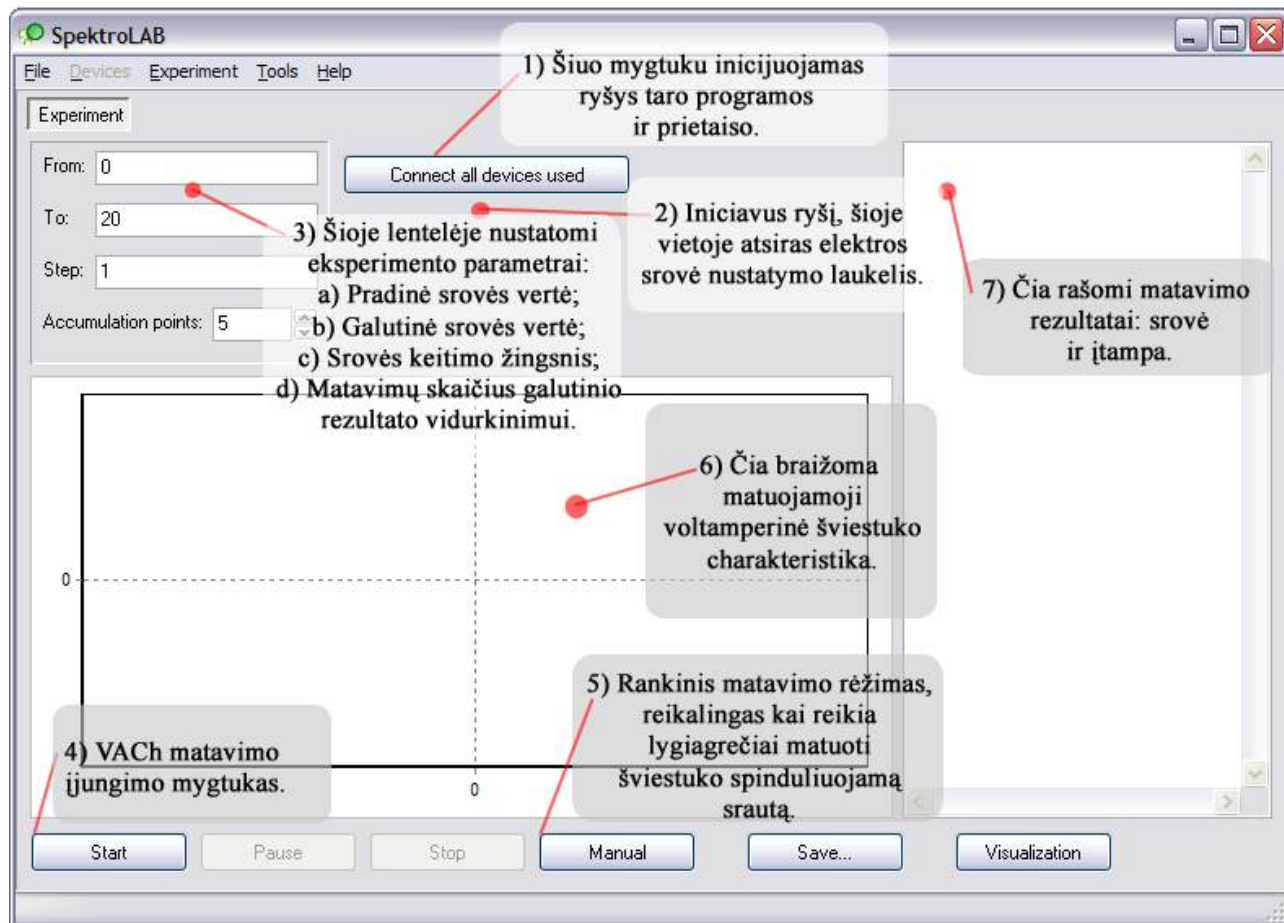
Matuojant balto šviestuko kampinę charakteristiką, spektrometro valdymo programoje *PMA Software* (v3.1.0) reikia pasirinkti kolorimetrinių parametrų matavimo aplinką. Tuomet po kiekvieno matavimo bus atvaizduojamas spektras, jo spektriniai parametrai ir šviesos šaltinio kolorimetriniai dydžiai, kuriuos programa suskaičiuoja pagal išmatuotąjį spektrą. Iš visų pateikiamų kolorimetrinių dydžių reikalingi yra šviestuko koreliuota spalvinė temperatūra *CCT* ir spalvinė atgava R_a . Šie dydžiai, kaip ir šviestuko mėlynosios smailės intensyvumas, atvaizduojami grafiškai kaip funkcija nuo kampo polinėje koordinatinių sistemoje. Išmatuoti spektrai gali būti išsaugomi faile su plėtiniu .col, kartu bus išsaugoti ir kolorimetriniai parametrai. Šiuo formatu išsaugoma informacija yra įrašoma mašininio kodu, todėl nėra galimybės matavimo rezultatus perkelti į *OriginPro* tolimesniam rezultatų apdorojimui. Spektrus išsaugant failuose su plėtiniu .txp, kolorimetriniai duomenys nėra įrašomi. Dėl šios priežasties kolorimetrinius parametrus patartina užsirašyti į darbo sąsiuvinį.

Šis aprašas skirtas mokomajam laboratoriniam darbui „Šviestuko optinių išėjimo charakteristikų tyrimas“, pateikiant darbui atlikti reikalingą teorinę medžiagą ir praktinius reikalavimus bei patarimus. Laboratorinis darbas sukurtas Europos Sąjungos struktūrinių fondų paramos 2.5 priemonės projekto „OPTOSTUD: Optoelektronikos studijų ir mokslo programos kūrimas“ lėšomis.
Aprašo autorius Mindaugas Karaliūnas, aprašo redaktorius Jūras Mickevičius.

Pastebėtas klaidas ir netikslumus prašau pranešti elektroniniu paštu: *mindaugas.karaliunas@ff.vu.lt*, prisidedant prie aprašo tobulinimo.

PRIEDAS 1

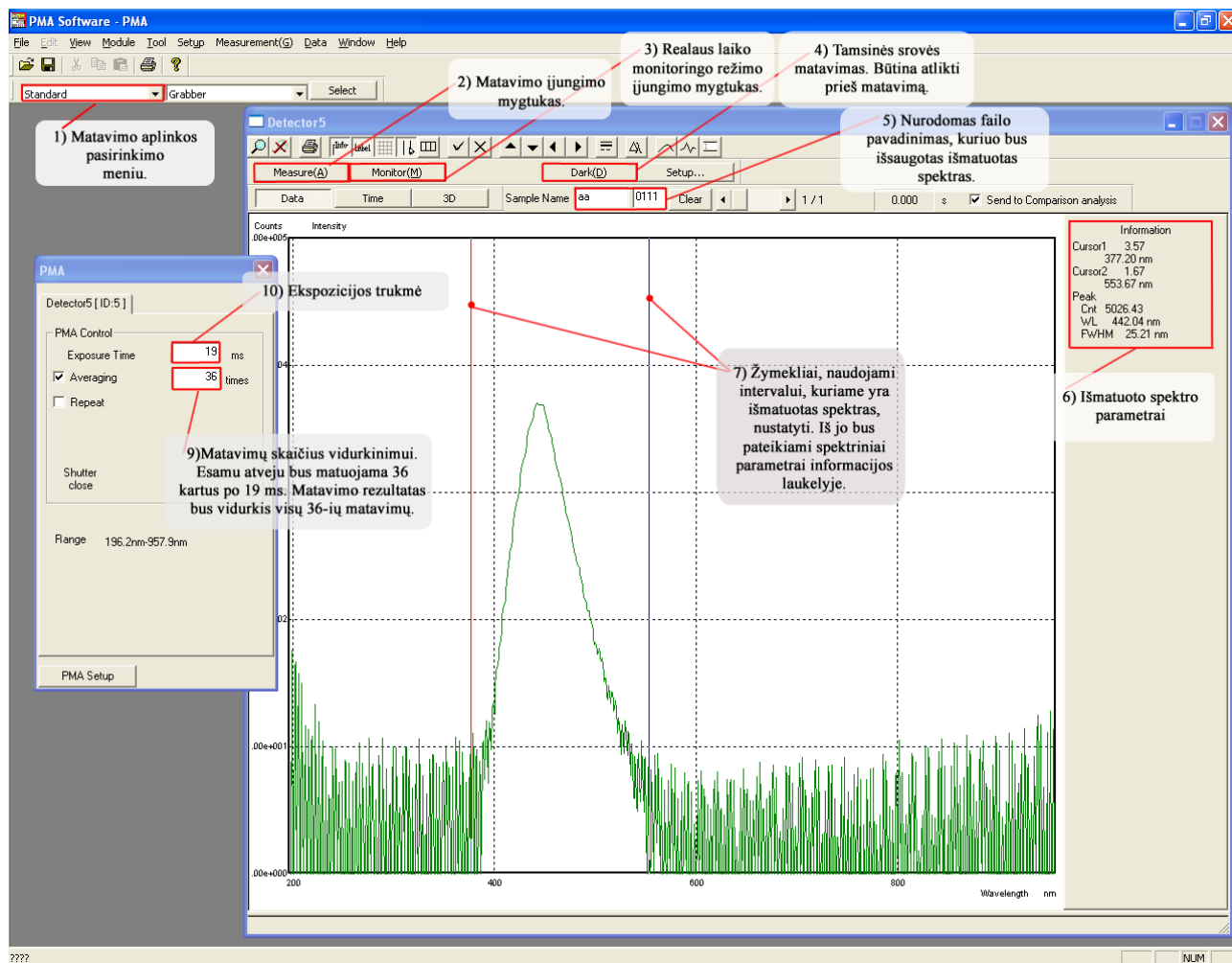
Naudojimosi instrukcijos programai *SpektroLAB* (v1.0 beta), kuri skirta srovės šaltinio LMS1 valdymui.



1P pav. Pagrindinis *SpektroLAB* (v1.0 beta) programos, skirtos srovės šaltinio LMS1 kompiuterizuotam valdymui, langas su naudojamų elementų aprašu.

PRIEDAS 2

Naudojimosi instrukcijos programai *PMA Software* (v3.1.0), kuria atliekami spektų matavimai ir pirminė jų analizė.

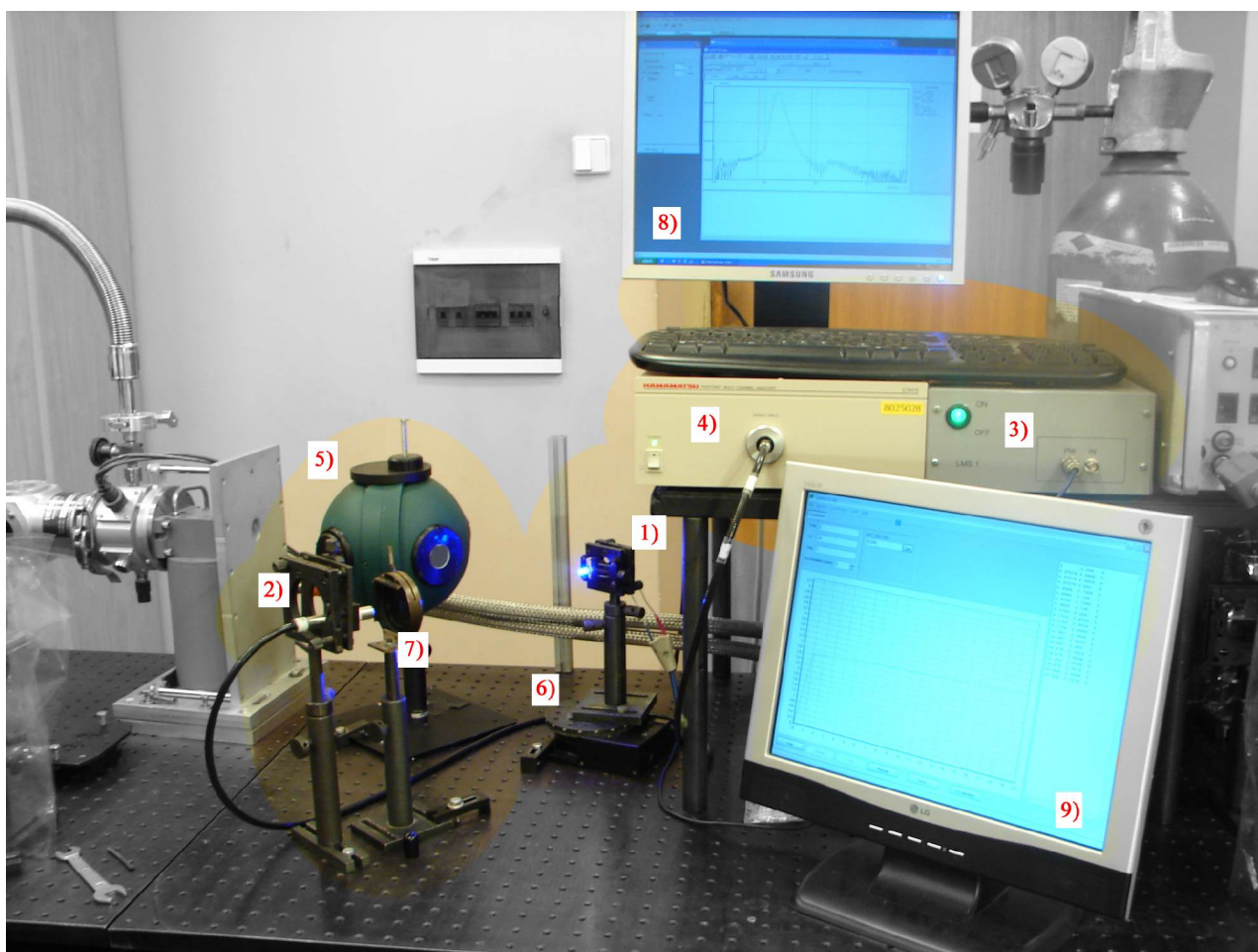


2P pav. Programos *PMA Software* (v3.1.0), skirtos spektrometro valdymui, vaizdas su dažniausiai naudojamų elementų aprašais.

Svarbu atsiminti, kad spektrometras turi būti įjungiamas prieš įjungiant kompiuterį, priešingu atveju kompiuteris neįkrauna instrukcijų, reikalingų aptikti spektrometrą.

PRIEDAS 3

Laboratorinio darbo įrangos ir matavimo prietaisų nuotrauka.



3P pav. Laboratorinio darbo įrangos nuotrauka: 1) Tiriamasis šviestukas optomechaniniame stovelyje; 2) Šviesolaidinė spinduliuotės surinkimo galvutė (detektorius); 3) Srovės šaltinis LMS1; 4) Spektrometras; 5) Integruojanti sfera; 6) Goniometras; 7) Diafragma kintamo skeremens; 8) Programa *PMA Software* (v3.1.0); 9) *SpektroLAB* (v1.0 beta) programa.