

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Akvilė  
ZABILIŪTĖ-KARALIŪNĖ

Konversijos fosfore šviesos diodų  
spektrinės galios skirstinių inžinerija

**DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA**

Technologijos mokslai

Medžiagų inžinerija 08 T

---

VILNIUS 2019

Disertacija rengta 2013 – 2019 metais Vilniaus universitete, Fotonikos ir nanotechnologijų institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

**Mokslinis vadovas:**

**prof. habil. dr. Artūras Žukauskas** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, 08 T)

Gynimo taryba:

Pirmininkas – **prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, 08 T)

Nariai:

**dr. Pramod Bhusal** (Aalto universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, 08 T)

**doc. dr. Renata Butkutė** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, 08 T)

**dr. Artūras Katelnikovas** (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, chemija, 03 P)

**dr. Gediminas Trinkūnas** (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika, 02 P)

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2019 m. sausio mėn. 11 d. 15 val. Nacionalinio fizinių ir technologijos mokslų centro A101 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, LT-10257 Vilnius, Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bei Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir Vilniaus universiteto interneto svetainėje adresu:

<https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>.

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES  
AND TECHNOLOGY

Akvilė  
ZABILIŪTĖ-KARALIŪNĖ

# Spectral Engineering of Phosphor Converted Light-Emitting Diodes

**DOCTORAL DISSERTATION**

Technological sciences

Materials engineering 08 T

---

VILNIUS 2019

This dissertation was written between 2013 and 2019 at Vilnius University Institute of Photonics and Nanotechnology. The research was supported by the Research Council of Lithuania.

**Academic supervisor:**

**Prof. Habil. Dr. Artūras Žukauskas** (Vilnius University, Technological sciences, Materials engineering, 08 T)

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

**Chairman – Prof. Habil. Dr. Sigitas Tamulevičius** (Kaunas University of Technology, Technological sciences, Materials engineering, 08 T)

**Members:**

**dr. Pramod Bhusal** (Aalto University, Technological sciences, Materials engineering, 08 T)

**Assoc. Prof. Dr. Renata Butkutė** (Vilnius University, Technological sciences, Materials engineering, 08 T)

**Dr. Artūras Katelnikovas** (Vilnius University, Physical sciences, Chemistry, 03 P)

**Dr. Gediminas Trinkūnas** (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics, 02 P)

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 3 p.m. on 11<sup>th</sup> January, 2019 in Room A101 of the National Center for Physical Sciences and Technology.

Address: Saulėtekio av. 3, LT-10257 Vilnius, Lithuania.

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology, as well as on the website of Vilnius University:

<https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>.

# Padėka

Pirmiausia norėčiau padėkoti savo vadovui, prof. habil. dr. Artūriui Žukauskui už man suteiktą galimybę dirbti šioje įdomioje mokslo srityje, bei vertingus patarimus rengiant disertaciją, mokslinius straipsnius bei patentines paraiškas. Taip pat esu dėkinga dr. Pranciškui Vittai už pagalbą atliekant FD matavimus ir konsultacijas, bei dr. Roland Tomasiūnui, už vadovavimą bakalauro baigiamajam, ir magistrantūros kursiniams darbams.

Taip pat norėčiau padėkoti dr. Skirmantei Butkutei už sėkmingą ir įdomų bendradarbiavimą bei atliktą galio granatų sintezę, struktūrinę ir morfologinę analizę. Ačiū Fizikos fakulteto bakalaurui Henrikiui Dapkui, už bendradarbiavimą atliekant eksperimentus bei kuriant kietakūnių šviestuvų prototipus. Taip pat dėkoju prof. Rimantui Vaicekaskui, už atliktą kompiuterinį spektrinės galios skirstinių optimizavimą.

Nuoširdžiai dėkoju savo mokyklų mokytojoms ir mokytojams, kurie mane išugdė. Ypatingai dėkoju fizikėms, Danguolei Miliauskienei, Danutei Vitkienei ir Astai Valčiukienei, kurios įžiebė susidomėjimą fiziką, skatino mokytis ir padėjo ją suprasti. Taip pat esu labai dėkinga draugams, kolegoms bei mane palaikančiai šeimai – tėvams Broniui ir Nijolei, sesei Emilijai, vyrui Mindaugui ir sūnui Kostui.

Šį darbą dalinai finansavo Lietuvos mokslų taryba (DOK-17209, P-DOC-17-144, P-DAP-18-140).

# Turinys

Įvadas	10
<b>1 Konversijos fosfore šviestukai skirti augalų poreikiams tenkinti</b>	<b>17</b>
1.1 Eksperimentinės metodikos . . . . .	17
1.1.1 Bandinių paruošimas . . . . .	17
1.1.2 Fotoluminescenciniai matavimai . . .	18
1.1.3 Šviestuvo prototipo gamyba . . . . .	19
1.2 Rezultatai . . . . .	20
1.2.1 Morfologinės granatų savybės . . . . .	20
1.2.2 Fotoluminescencinės granatų savybės .	20
1.2.3 Konversijos fosfore kietakūnio augalų šviestuvo prototipo parametrai . . . . .	24
1.3 Skyriaus apžvalga . . . . .	25
<b>2 Mažo cirkadinio poveikio konversijos fosfore šviestukai lauko apšvietimui</b>	<b>27</b>
2.1 Eksperimentinės metodikos . . . . .	27
2.1.1 Modeliniai fotofiziologiškai draugiškų konversijos fosfore šviestukų SGS . . .	27
2.1.2 Liepsnos šviesos KFŠ prototipavimas .	29
2.2 Rezultatai . . . . .	30
2.2.1 Modeliniai liepsnos šviesos SGS . . . . .	30
2.2.2 Liepsnos šviesos KFŠ prototipai . . . . .	35
2.3 Skyriaus apžvalga . . . . .	37

<b>3</b>	<b>Konversijos fosfore šviestukai pasižymintys pirmenybine spalvų atgava</b>	<b>39</b>
3.1	Eksperimentinės metodikos . . . . .	39
3.1.1	KFŠ, pasižyminčių skirtingomis spalvų atgavos savybėmis modeliavimas . .	39
3.1.2	Pirmenybine spalvų atgava pasižyminčio KFŠ šviestuvo gamyba . . . . .	41
3.1.3	Psichofizikinio eksperimento organizavimas . . . . .	42
3.2	Rezultatai . . . . .	43
3.2.1	Modelinių KFŠ spektrai ir jų parametrai	43
3.2.2	SGS savybių priklausomybė nuo temperatūros . . . . .	45
3.2.3	Pirmenybine spalvų atgava pasižyminčio KFŠ prototipo savybės . . . . .	47
3.2.4	Psichofizikinio eksperimento rezultatai	49
3.3	Skyriaus apžvalga . . . . .	50
	<b>Išvados</b>	<b>53</b>
	<b>Mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas</b>	<b>62</b>
	<b>Mokslinių konferencijų disertacijos tema sąrašas</b>	<b>63</b>
	<b>Trumpos žinios apie disertantę</b>	<b>67</b>

# Summary

Due to the constantly increasing world energy demand, air and water pollution, scientists keep searching for the ways to save energy. Around 19% of energy consumed in the world is used for lighting applications [1], for this reason, the old inefficient light sources are rapidly being changed by new and energy saving ones. Since the efficiency of light-emitting diodes (LEDs) has already surpassed that of other luminaries such as incandescent or fluorescent lamps, LEDs became the most popular sources for new lighting installations [2]. Moreover, LEDs have many efficiency non-related advantages over other light sources – they are compact, robust, resistant to cold, and can be dimmed or rapidly switched on and off. Nevertheless, probably one of the main advantages of LEDs is the ability to modify the shape of their spectral power distribution (SPD) regarding to their applications [2, 3, 4].

This work consists of three chapters dedicated for the spectral engineering of phosphor converted LEDs (pcLEDs) and their application in different areas: horticultural lighting, street lighting and lighting characterized by different colour rendition properties.

In the first chapter, a concept of phosphor-converted solid state sources of light for greenhouses is discussed. In this chapter the morphological and PL properties of gadolinium, gadolinium scandium, yttrium and lutetium garnets doped with different amounts of  $\text{Cr}^{3+}$  and annealed at different temperatures



are presented and discussed. In the end of this part a prototype luminary meeting the photomorphogenetic needs of plants is presented.

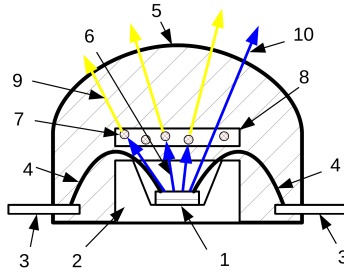
The second chapter describes the non-visual effect of light for human circadian rhythm and gives the introduction to colour science. In this chapter a concept of photobiologically friendly mesopic sources of street lighting is presented which is based on the modelling and characterization of theoretical spectra. The chapter is finalized with a presentation of a patented pcLED prototype characterized by minimized circadian action.

The last chapter is based on a more comprehensive analysis of the visual parameters of light and on different colour quality evaluation metrics. Here, a model for creating and optimizing theoretical pcLED SPDs of different colour rendition properties (colour fidelity, colour saturation, colour dulling and colour preference) in respect to luminous efficacy of radiation is presented. The model is confirmed by the SPDs composed of photoluminescence spectra of real commercial phosphors. In the end of this chapter a patented pcLED luminary of colour preference is presented and validated by a psychophysical experiment.

# Įvadas

Dėl pasaulyje nuolat augančio sunaudojamos energijos kiekio, mokslininkai nepaliauja ieškoję naujų energijos taupymo metodų. Apie 19 % viso pasaulio energijos sunaudojama apšvietimui [1], todėl atgyvenę ir energiją eikvojančios šviesos šaltiniai sparčiai keičiami naujais ir našiais. Šviesos diodams (šviestukams), našumu pranokus halogenines bei fluorescencines lempas, jie tapo patraukliausiais, naujai montuojamais šviesos šaltiniais [2]. Be didelio našumo, šviestukai turi begale kitų privalumų, kaip ilgaamžiškumas, atsparumas įvairioms aplinkos sąlygoms, kompaktiškumas, galimybė temdyti ar maitinti impulsiniu režimu. Tačiau bene patraukliausia šviestukų savybė – tai galimybė optimizuoti jų spektrinės galios skirstinius (SGS) skirtingiems taikymams [2, 3, 4]. Dėl šios priežasties šviestukai plačiai naudojami įvairiems nišiniams taikymams, tokiems kaip indikatorinės lemputės, šviesoforai, kelio ženklai, transporto priemonių posūkių žibintai, avarinio išėjimo žymėjimas ir t.t. [3, 4]. Kaip žinoma, šviestukų elektroliuminescencija (EL) charakterizuojama viena spektrine komponente, todėl šviestukai spinduliuoja tik vienos spalvos šviesą. Norint išgauti baltą šviesą gali būti komponuojami skirtingų šviestukų telkiniai. Populiariausias yra RGB telkinys, kuris susideda iš raudono, žalio ir mėlyno šviestukų. Jis labai plačiai taikomas displėjų pašvietimui, taip pat kaip dekoratyvinis apšvietimas, tačiau dėl polinkio pernelyg sodrinti spalvas, šis telkinys nėra populiarus bendrojo apšvietimo taikymuose [5].

Kitas metodas išgauti baltą šviesą yra komponuoti šviestu-



0.1 pav.: Konversijos fosfore šviestuko schema [VI,VII].

kus su šviesą konvertuojančiomis medžiagomis – fosforais. Tokie šviestukai vadinami konversijos fosfore šviestukais (KFŠ) [6], o jų veikimo principas pavaizduotas 0.1 pav. KFŠ sudarantis InGaN lustas (1), patalpintas reflektoriuje (2), prijungtas prie kontaktų (3) vielutėmis (4) ir enkapsuluotas epoksidinėje deroje (5) spinduliuoja mėlyną šviesą (6), kurios dalis yra sugerama fosforo (pvz  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ) dalelių (7), esančių šviesos keitiklyje (8), pvz silikone. Geltona fosforo fotoluminescencija (FL) (9), susimaišo su likutine mėlyna šviesa (10) ir sukuria baltos šviesos pojūtį. Tokie KFŠ yra nebrangūs ir labai paplitę, tačiau dėl itin aukštos susietosios spalvinės temperatūros (SST), žemo spalvų atgavos indekso (SAR) bei savybės blukinti spalvas, bendrajame apšvietime yra beveik netaikomi [3]. Ši problema sprendžiama kuriant šviesos keitiklius iš dviejų ar daugiau fosforų [4].

Galimybė komponuoti skirtingus kietakūnių šviesos šaltinių SGS iškelia jų optimizavimo uždavinius. Šiuo metu šviestukų SGS dažniausiai optimizuojami siekiant išgauti maksimalią spalvų atgavą didžiausiam galimam santykiniam šviesiniam veiksmingumui (SŠV) [7]. Tačiau, plačiai žinoma, kad žmonės yra linę rinktis apšvietimą, šiek tiek sodrinantį apšviečiamų objektų spalvas [5, 8, 9, 10]. Todėl vertinant apšvietimą labai svarbu atsižvelgti ne tik į atkuriamų spalvų tikslumą, bet ir kitas savybes,

tokias kaip spalvų sodrinimas, blukinimas ar pirmenybinė spalvų atgava. Tiesioginės emisijos šviestukų telkiniams šie parametrai jau optimizuoti [11], o KFS, aptariamai šiame darbe.

Nepaisant plataus šviestukų taikymo įvairiose srityse, dėl spektro sudėtyje esančio didelio mėlynos šviesos kiekio, jie taip pat susilaukia ir daug kritikos. 2001 m. mokslininkai Brainard ir Thapan atrado, kad akyse esančios ganglinės ląstelės yra jautrios mėlynai šviesai, kuri slopina miego hormono ir onkostatino agento melatonino išsiskyrimą smegenyse [12, 13]. Tai reiškia, kad mėlynos šviesos perteklius vakarais gali sukelti miego sutrikimus, depresiją ir netgi vėžį [14, 15]. Tyrimų, susijusių su žmogaus cirkadiniu ritmu, svarba buvo pažymėta 2017 metais, kai mokslininkai J. C. Hall, M. Rosbach ir M. W. Young buvo apdovanoti Nobelio premija „Fiziologijos ar Medicinos“ srityje už „Cirkadinių ritmą kontroliuojančių molekulinų mechanizmų atradimus“ [16].

Kietakūniai šviesos šaltiniai plačiai taikomi ne tik bendrajame ar gatvių apšvietime bet ir kitose srityse. Vienas iš pavyzdžių – šiltadaržių apšvietimas, kuris, dėl pasaulyje nuolat augančio maisto poreikio, kasmet darosi vis labiau aktualus [17, 18, 19]. Šiuo metu šiltadaržiuose vis dar dominuoja aukšto intensyvumo išlydžio bei fluorescencinės lempos [20, 21], tačiau šviestukai turi aibę pranašumų – jie maži, ilgaamžiai, atsparūs smūgiams ir, kaip buvo minėta anksčiau, jų SGS galima optimizuoti atsižvelgiant į augalų poreikius [17, 18, 19, 22]. Yra žinoma, kad augaluose vyksta trys fotobiologiniai procesai – už augalo judėjimą atsakinga fototropija, augalą maistinėmis medžiagomis aprūpinanti fotosintezė ir augalo vystymąsi lemianti fotomorfogenezė, kuriems atitinkamai reikalinga mėlyna (400–500 nm), raudona (620–680 nm) ir raudona bei tolima raudona (700–760 nm) spektro sritys [23]. Mėlynas InGaN bei raudonas AlGaInP šviestukai yra plačiai taikomi, stabilūs šviesos šaltiniai. Tačiau tolimoje raudonoje spektro srityje šviečiantys AlGaAs šviestukai, dėl didelio

Al kiekio sudėtyje, pasižymi didele degradavimo sparta, yra neatsparūs drėgmei bei temperatūrų svyravimams [24]. Todėl šioje srityje juos galėtų pakeisti dalinės KFŠ sudaryti iš mėlyno InGaN šviestuko ir tolino raudono fosforo.

Ši darbą sudaro trys dalys, apimančios KFŠ SGS inžineriją bei jų taikymus skirtingose srityse. Pirmoje dalyje aptariama KFŠ skirta augalų fotomorfogeneziniams taikymams koncepcija. Čia aptiriamos gadolinio, gadolinio skandžio, itrio ir lutecio galio granato (atitinkamai GGG, GSGG, YGG ir LGG) tolimos raudonos spektro srities fosforų, legiruotų trivalenčiu chromu ( $\text{Cr}^{3+}$ ) struktūrinės, morfologinės ir FL savybės bei įvertinama jų taikymo KFŠ galimybė. Skyriaus gale pristatomas ir charakterizuojamas šių fosforų pagrindu sukurtas KFŠ šviestuvo prototipas.

Antroji darbo dalis skirta fotofiziologiškai draugiškam gatvių apšvietimui. Darbo metu pristatomi modeliniai liepsnos šviesos ( $\text{SST} < 2500$ ) KFŠ SGS, pasižymintys minimaliu cirkadinio poveikio faktoriumi (CPF). Tokie šviestukai charakterizuojami žemu fotofiziologiniu poveikiu ir yra tinkami vakariniam bei naktiniam gatvių apšvietimui. Skyriaus gale pristatomi ir charakterizuojami du patentuoti liepsnos šviesos KFŠ prototipai, pasižymintys maža CPF verte.

Paskutinė trečioji dalis skirta bendrajam apšvietimui, pasižyminčiam pirmenybine spalvų atgava. Jame pristatomi modeliniai KFŠ SGS, pasižymintys skirtingomis spalvų atgavos savybėmis – tikslia spalvų atgava, spalvų sodrinimu, bei pirmenybine spalvų atgava. Šioje dalyje taip pat pristatomas bei charakterizuojamas patentuotas pirmenybinės spalvų atgavos KFŠ prototipas (PrefLED). Skyriaus gale pateikiami psichofizikinio tyrimo rezultatai, patvirtinantys PrefLED prototipo pirmenybinę spalvų atgavos savybę.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra sumodeliuoti teorinius KFŠ, skirtų nišiniams taikymams, tokiems kaip – šiltadaržių apšvietimas, fotofiziologiškai draugiškas lauko apšvietimas ir pirmenybine spalvų atgava pasižymintis apšvietimas, SGS bei pagaminti tokių šviestuku prototipus.

## Darbo uždaviniai

- Ištirti gadolinio, gadolinio skandžio, itrio ir lutecio galio granato fosforų, legiruotų  $\text{Cr}^{3+}$  FL savybes.
- Sukurti ir ištirti KFŠ šviestuvo prototipą, skirtą augalų fotomorfogenezinių poreikių tenkinimui, kurio SGS pasižymėtu tolimesniu raudona komponente, 700–760 nm spektro srityje.
- Sumodeliuoti ir charakterizuoti teorinius KFŠ SGS, pasižymintį mažu cirkadiniu poveikiu, bei sukurti tokio KFŠ prototipą.
- Apskaičiavus modelinių SGS, sukomponuotų iš prekinų fosforų FL juostų, spalvų atgavos savybes, patvirtinti teorinių KFŠ SGS optimizavimo modelį.
- Sukurti ir charakterizuoti pirmenybine spalvų atgava pasižymintį KFŠ šviestuvo prototipą ir patvirtinti jį psichofizikiniu eksperimentu.

## Ginamieji teiginiai

1. Zolių-gelių metodu susintetinti gadolinio, gadolinio skandžio, itrio ir lutecio galio granatai, legiruoti  $\text{Cr}^{3+}$ , žadinami

mėlyna šviesa, pasižymi plačia fotoluminescencijos juosta tolimoje raudonoje spektro srityje, kuriai iki 90 °C nepasireiškia šiluminis gesinimas, todėl yra tinkami konversijos fosfore šviestukų, tenkinančių augalų fotomorfogenezinius poreikius, taikymui;

2. Modelinių bei prototipinių konversijos fosfore šviestukų dvispalviai mėlynai-oranžiniai spektrinės galios skirstiniai pasižymi mažomis SST vertėmis, žemu cirkadiniu poveikiu, pakankama spalvų atgava bei santykiniu šviesiniu veiksmingumu ir todėl yra tinkami mezopinio fotofiziologiškai draugiško gatvių apšvietimo taikymui;
3. Remiantis optimizavimo uždavinio sprendiniu modelinei, Gausine forma aprašomai  $\text{Eu}^{2+}$  jonais aktyvintų fosforų sistemai, galima sukurti praktinius trispalvius konversijos fosfore šviestukus, pasižyminčius skirtingomis spalvų atgavos savybėmis: spalvų blukinimu, sodrinimu, tikslia bei subjektyviai pirmenybine spalvų atgava.
4. Sukurtas ir psichofizikiniu eksperimentu patvirtintas KFŠ šviestuvo prototipas yra tinkamas nišiniams taikymams, reikalaujantiems padidinto apšviečiamų objektų patrauklumo.

## **Autorės indėlis**

Šiame darbe disertacijos autorė atliko FL matavimus, SGS modeliavimą, konstravo bei charakterizavo prototipus, organizavo psichofizikinį eksperimentą bei analizavo jo duomenis. Autorė taip pat rengė trijų publikacijų, bei patentinių paraiškų tekstus, braižė grafikus atliko skaičiavimus. Be abejo, svarus ir disertantės vadovo indėlis, kuris skyrė disertantei uždavinius, kartu

rengė mokslines publikacijas bei konsultavo tyrimų metu iškilusiais klausimais. Dalis disertacijoje minimų darbų buvo atliekama bendradarbiaujant su kolegomis.

Galio granatų fosforų sintezė bei morfologinė ir struktūrinė analizė buvo atlikta Vilniaus universiteto Chemijos ir Geomokslų fakulteto mokslininkės dr. Skirmantės Butkutės. Fosforų gesimo trukmės buvo išmatuotos ir įvertintos padedant Vilniaus universiteto Fotonikos ir nanotechnologijų mokslininkui dr. Pranciškui Vittai.

KFŠ prototipas, skirtas augalų fotomorfogeneziniams poreikiams tenktini, o taip pat ir antrasis liepsnos šviesos prototipas, bei PrefLED prototipo fosforo keitiklio optimizacija buvo atliekama kartu su Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto bakalauro studentu Henriku Dapkumi.

InGaN šviestuką, naudotą pirmajam liepsnos šviesos prototipui, pagamino Vilniaus universiteto Fotonikos ir nanotechnologijų instituto mokslininkas dr. Ignas Reklaitis.

KFŠ SGS, pasižyminčių skirtingomis spalvų atgavos savybėmis, kompiuterinį optimizavimą atliko Vilniaus universiteto Matematikos ir informatikos fakulteto prof. dr. Rimantas Vaicekauskas.



# 1 Konversijos fosfore šviestukai skirti augalų poreikiams tenkinti

Šiame skyriuje pateikiama struktūrinė, morfologinė ir fotoluminescencinė gadolinio, gadolinio skandžio, lutecio ir itrio galio granatų, legiruotų  $\text{Cr}^{3+}$  jonais bei iškaitintų skirtingose temperatūrose, analizė. Skyriuje pateikiami fosforų FL ir FL sužadavimo spektrai (FLS), FL kvantinės išėigos (QE) bei gesimo trukmių vertės, taip pat FL spektrų priklausomybė nuo bandinių temperatūros. Skyriaus pabaigoje pristatomas KFŠ augalų šviestuvo prototipo kūrimas bei charakterizavimas. Šis skyrius remiasi rezultatais, aprašytais moksliniuose straipsniuose [III, IV, V].

## 1.1 Eksperimentinės metodikos

### 1.1.1 Bandinių paruošimas

Gadolinio, gadolinio skandžio, itrio ir lutecio galio granatai (atitinkamai  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (GGG),  $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  (GSGG),  $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (YGG) ir  $\text{Lu}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (LGG)), legiruoti 3, 5 ir 8 mol % Cr(III) ir iškaitinti 1000, 1300, 1400 ir 1500 °C temperatūrose, buvo sintetinami zolių-gelių metodu. Sintezės metu pradiniai reagentai ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ , ar  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ ) ištirpinami karštoje koncentruotoje azoto rūgštyje, įmaišant molinį santykį chromo nitrito nonahidrato, ištirpinto distiliuotame vandenyje. Į

mišinį pridėjus kompleksadarį – tri(hidroksimetil)-aminometaną, zolis maišomas, bei lėtai garinamas 70 °C temperatūroje, kol viršta geliu ir išdžiūsta. Pakėlus plytelės temperatūrą iki 300 °C, gelis užsiliepsnoja ir virsta pelenais. Po savaiminio degimo proceso pelenai 8 val. kaitinami 800 °C temperatūroje, o paskui kalcinuojami 1000, 1300, 1400 ar 1500 °C temperatūrose. Papildomai, tokiu pat metodu buvo susintetintas ir GGG:Cr,Ce (Ce + Cr = 0,25, 0,5, 1, 3, 5 ir 10 mol %).

Siekiant tiksliai įvertinti bandinių kvantinės išeigos vertes, frezavimo staklėmis *ROLAND Modela 4 MDX-40* buvo pagamintos specialios polimetilmetakrilato (PMMA) kiuvetės, užtikrinančios homogenišką 200 μm storio miltelių sluoksnį.

### 1.1.2 Fotoluminescenciniai matavimai

Difuzinis atspindys buvo matuojamas *Perkin Elmer Lambda 950* spektrometru su integruojančia sfera, atspindžio įvertinimui naudotas baltas *Spectralon®* etalonas. FL ir FLS spektrai buvo matuojami *Perkin Elmer LS55* fluorimetru. FL intensyvumo priklausomybė išmatuota –5–85 °C temperatūrų intervale, pasitelkus *LabSphere* Peltier elementą bei *Hamamatsu PMA-11* spektrometrą.

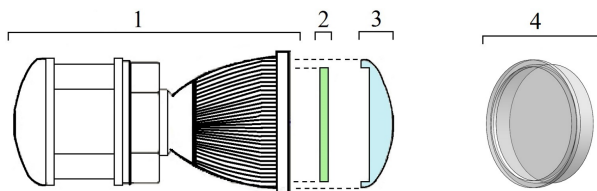
FL QE išmatuota *J. C. de Mello* pasiūlytu integruojančios sferos metodu [25]. Šio metodo esmė slypi trijose integruojančios sferos konfigūracijose: A konfigūracijos metu žadinama tuščia sfera, B konfigūracijos metu bandinys patalpinamas į sferą, tačiau žadinanti šviesa į jį nefokusuojama, C konfigūracijos metu žadinanti šviesa fokusuojama į bandinį. Tokiu būdu pašalinama nuo sferos sienelių atsispindėjusios spinduliuotės įtaka kvantinės išeigos skaičiavimuose. Eksperimento metu žadinimui pasitelkta halogeninės lempos spinduliuotė ir monochromatorius, nustatytas ties 450 nm bangos ilgiu. Bandinio kiuvetė buvo tvirtina-

ma *Sphere Optics* (baltas *Spectralon*® etalonas) integruojančioje sferoje, o šviesolaidžiu surinkta šviesa užregistruota *Hamamatsu PMA-11* spektrometru.

FL gesimo trukmės buvo matuojamos dažninės skyros metodu [26]. Šio eksperimento metu bandinys žadinamas pagal sinuso dėsnį moduliuotu mėlynu šviestuku, todėl, dėl baigtinės FL gesimo trukmės, tarp žadinančio ir FL signalų atsiranda moduliacijos gylio pokytis bei fazės poslinkis. Išmatavus šiuos dydžius, galima įvertinti ir FL gesimo trukmę. Žadinimui buvo naudojamas mėlynas InGaN (445 nm bangos ilgio) šviestukas, kurio spinduliuotė filtruojama mėlynu filtru (ribinis bangos ilgis 500 nm) ir fokusuojama į bandinį. Bandinio skleidžiamas FL signalas filtruojamas raudonu filtru (ribinis bangos ilgis 600 nm) bei nukreipiamas į fotodaugintoją *Hamamatsu H6780-01*. Moduliacijos gylio bei fazės poslinkis matuojami skaitmeniniu sinchroniniu stiprintuvu *Signal recovery 7265*.

### 1.1.3 Šviestuvo prototipo gamyba

Šviesos keitiklis KFŠ šviestuvo prototipui buvo gaminamas iš YGG:Cr 8 mol % fosforo miltelių iškaitintų 1300 °C temperatūroje ir skaidraus sanitarinio silikono mišinio. Fosforo milteliai su silikonu buvo maišomi 5,3 wt %, ir 5,7 wt % koncentracijomis ir patalpinami į 0,5, 1 ir 1,5 mm storio PMMA formas (1.1 pav. nr. 4), pagamintas anksčiau minėtomis frezavimo staklėmis. Palyginus keitiklių charakteristikas, prototipo gamybai atrinktas 1,5 mm storio 5,7 wt % koncentracijos keitiklis. Šviestuvo prototipo schema atvaizduota 1.1 pav. KFŠ šviestuvui panaudotas *HORTILED* augalų šviestuvo korpusas (1), kurio viduje įmontuotas mėlynas šviestukas (*Philips Lumileds Rebel Blue*, bangos ilgis 452 nm). Korpusas uždengiamas lęšiu (3), kuriame išfrezuota ertmė, skirta fosforo keitikliui (2).



1.1 pav.: Kietakūnio šviestuvo, skirto augalų fotomorfogenezinių poreikių tenkinimui, schema [V].

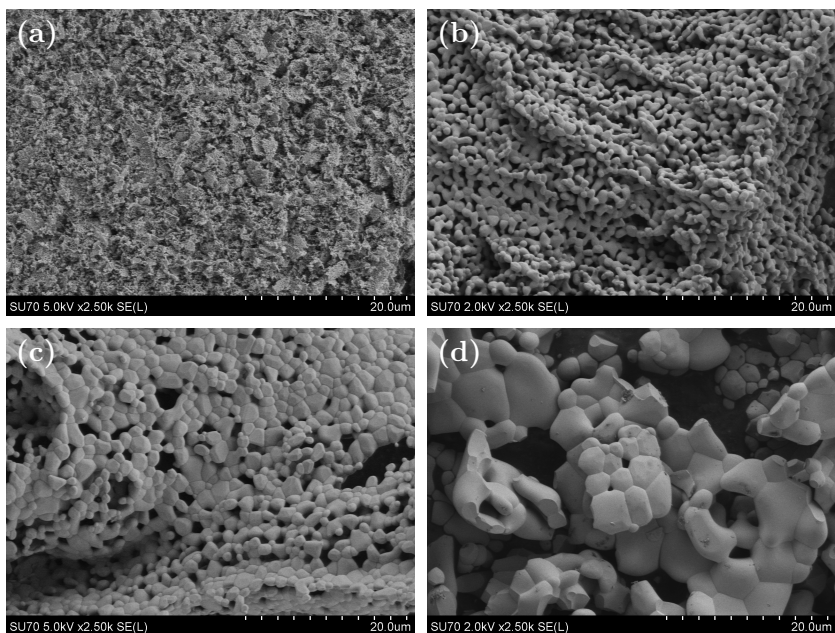
## 1.2 Rezultatai

### 1.2.1 Morfologinės granatų savybės

Atlikti XRD tyrimai atskleidė, kad susintetinti granatinės fazės bandiniai. 1.2 pav. atvaizduotos GGG:Cr 5 mol % fosforų, iškaitintų įvairiose temperatūrose SEM nuotraukos. Iš šių nuotraukų matyti, kad 1000 °C iškaitinimo temperatūroje, formuojasi plokščios submikroninės dalelės, kurios sukibusios kartu sudaro gana porėtą medžiagą. Keliant kalcinavimo temperatūrą, šios dalelės jungiasi formuodamos didesnius kristalitus, kurių skersmuo, pasiekus 1500 °C temperatūrą, kinta tarp maždaug 2–6 μm mikronų.

### 1.2.2 Fotoluminescencinės granatų savybės

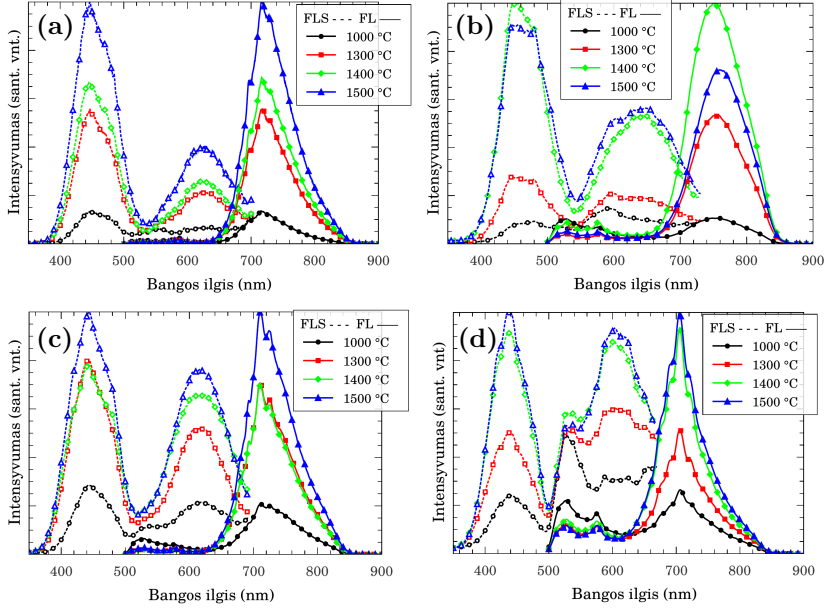
Bandinių FLS bei FL spektrai atvaizduoti 1.3 pav., kurie atitinkamai pažymėti punktyrine ir ištisine linijomis. Iš grafiko matyti, kad visų bandinių FLS spektrai charakterizuojami dviemėmis smailėmis mėlynoje (apie 450 nm) ir raudonoje (620 nm) srityse, kurias atitinkamai sąlygoja  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$  ir  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$  šuoliai tipiški  $Cr^{3+}$  jonams oktaedriniam kristaliniame lauke [27]. Grafikas taip pat atskleidžia, kad visi bandiniai pasižymi plačia FL juosta tolimoje raudonoje srityje (700–780 nm), kurią sukelia  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$



1.2 pav.: GGG:Cr 5 mol % iškaitintų a) 1000 °C, b) 1300 °C, c) 1400 °C ir d) 1500 °C temperatūrose SEM nuotraukos.

šuoelis. Kaip matyti grafikuose, GGG ir GSGG juostos labiau pasislinkusios link infraraudonosios spektro srities, ir yra platesnės negu LGG ir YGG bandinių. Taip nutinka dėl didesnių Gd ir Sc jonų radiusų, kurie padidina GGG ir GSGG gardelės konstantą ir taip sumažina chromo jonus veikiantį kristalinį lauką. Dėl to paties efekto LGG ir YGG bandiniuose taip pat galime išskirti siaurą FL liniją, nulemtą  ${}^2E_2 \rightarrow {}^4A_2$  šuolio [28, 29].

Ištirtų fosforų vidinės QE vertės pateiktos 1.1 lentelėje. Aukščiausios kiekvieno granato kvantinių išeių vertės siekė 30, 21, 20 ir 46 % atitinkamai GGG:Cr 5 mol %, GSGG:Cr 8 mol %, ir LGG:Cr 3 mol % bandiniams iškaitintiems 1400 °C temperatūroje bei YGG:Cr 8 mol %, iškaitintam 1300 °C temperatūroje. Kitaip negu FL intensyvumas, kuris auga kartu su bandinių kalci-



1.3 pav.: (a) GGG:Cr 5 mol %; (b) GSGG:Cr 8 mol %; (c) YGG:Cr 8 mol %; (d) LGG:Cr 3 mol % kalcinuotų skirtingose temperatūrose FLS (punktyrinė linija, tuščiaviduriai simboliai) ir FL (ištininė linija, pilnaviduriai simboliai) spektrai.  $\lambda_{FLS} = 450$  nm,  $\lambda_{FL} = 720, 758, 710, 705$  nm atitinkamai GGG:Cr, GSGG:Cr, YGG:Cr ir LGG:Cr fosforams.

navimo temperatūra, kvantinės išeigos vertės pasiekus tam tikrą temperatūrą ima kristi. Taip nutinka dėl padidėjusios medžiagos sugerties, kuriai galimai daro įtaką padidėję fosforo kristalų matmenys [30]. GGG:Cr,Ce bandinių serijos didžiausios QE vertės siekė vos 3.6 %, todėl šie bandiniai toliau nebuvo nagrinėjami.

FL gesimo trukmės buvo matuojamos dažninės skyros metodu. Tipinis moduliacijos gylis ir fazės poslinkio dažninis atsakas atvaizduotas 1.4 pav. Eksperimentu nustatyta, kad dauguma granatų pasižymi bi-eksponentiniu gesimo dėsniumi, kuris užrašo-

1.1 lentelė: Galio granatų, legiruotų skirtingomis Cr<sup>3+</sup> koncentracijomis ir iškaitintų 1300–1500 °C temperatūrose FL savybės [III].

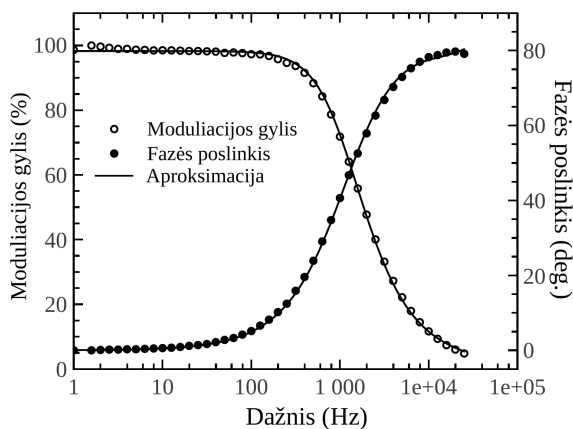
Gardelė	Cr <sup>3+</sup> , mol %	Kalcin. temp., °C	QE, %	λ <sub>FL</sub> , nm	λ <sub>FLE</sub> , τ <sub>1</sub> , nm ms	τ <sub>2</sub> , ms	<i>f</i>	
GGG	5	1300	24	718	446	0,15	4,4 μs	0,59
		1400	30	717	447	0,14	4,8 μs	0,68
		1500	28	716	447	0,14	7,3 μs	0,76
GSGG	8	1300	19	750	456	0,10	0,50	0,96
		1400	21	759	457	0,09	0,47	0,98
		1500	19	756	448	0,09	0,73	0,99
YGG	8	1300	46	710	442	0,15	0,32	0,26
		1400	33	711	443	0,10	0,27	0,31
		1500	32	711	444	0,09	0,25	0,35
LGG	3	1300	19	706	438	0,21	0,74	0,26
		1400	20	706	438	0,18	0,68	0,24
		1500	17	705	437	0,21	0,63	0,44

mas taip:

$$I(t) = f \exp(-t/\tau_1) + (1 - f) \exp(-t/\tau_2), \quad (1.1)$$

čia  $I(t)$  – FL intensyvumas laiko momentu  $t$ ,  $\tau_{1,2}$  – gesimo trukmės,  $f$  – svorio daugiklis, kintantis intervale nuo 0 iki 1. Apskaičiuotos gesimo trukmės ir svorio daugikliai pateikti 1.1 lentelėje. Kaip matyti, bandiniai pasižymi gana ilgomis gesimo trukmėmis. Pirmoji gesimo trukmė kinta nuo 0,9 iki 0,21 ms priklausomai nuo bandinio. Kadangi jos svorio parametras  $f$  mažėja sulig kristalinio lauko stiprumu, galime teigti, kad ši gesimo trukmė aprašo plačios, šuolio  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$  sąlygotos FL juostos gesimą. Dėl stipresnio kristalinio lauko YGG ir LGG bandiniuose, plačios juostos įtaka čia mažesnė,  $f$  vertė nukrenta žemiau 0,5 ir gesimo dėsniai didesnę įtaką daro  ${}^2E_2 \rightarrow {}^4A_2$  šuolio sukelta FL linija.

1.5 atvaizduoti galio granatų spektrai esant skirtingai bandinių temperatūrai. Iš grafikų matyti, kad kylant temperatūrai



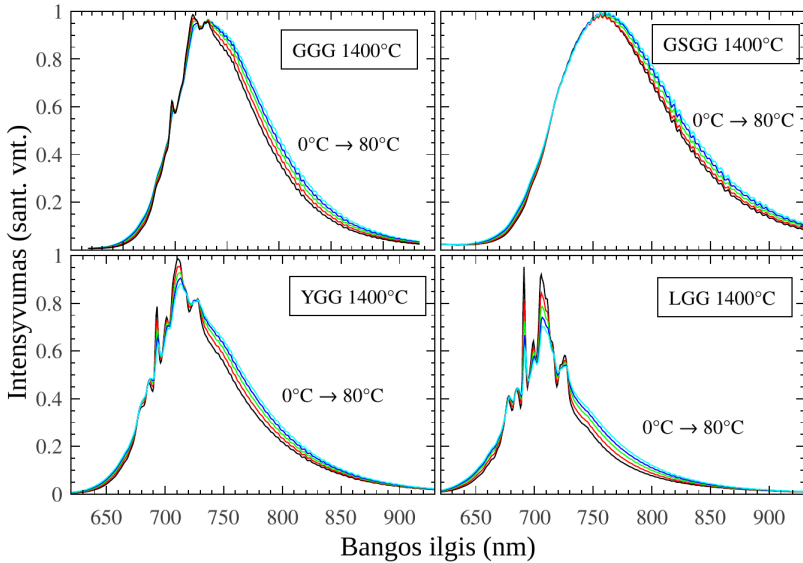
1.4 pav.: Moduliacijos gylio bei fazės poslinkio dažninis atsakas GGG:Cr 5 mol % 1500 °C bandiniui [III]

siaurų FL linijų intensyvumas mažėja, tačiau plati FL auga, kas sąlygoja suminio FL intensyvumo augimą. Šis intensyvumo augimas paaiškinamas tuo, kad kylant aplinkos temperatūrai  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$  tampa vis labiau dominuojantis [31, 32, 33]. Faktas, kad iki 90 °C temperatūros galio granatams nepasireiškia šiluminis gesinimo efektas yra svarbus fosforų, taikytinų KFŠ, privalumas, kadangi įkaitęs šviestuko lustas savo šiluma neslopins fosforo FL.

### 1.2.3 Konversijos fosfore kietakūnio augalų šviestuvo prototipo parametrai

Šviestuvo spektrą, atvaizduotą 1.6 pav, sudaro intensyvi siaura mėlyna ir kur kas silpnesnė, tačiau plati tolimos-raudonos spektro srities komponentės. Mėlynos ir tolimos-raudonos komponentių spektrinio fotonų srauto santykis siekia 4,6, kas tenkina fototropinius ir fotomorfogenezinius (reikalingus fitochromui  $P_{fr}$ ) augalų poreikius [23]. Siekiant pilnai patenkinti fotofiziologinius augalų poreikius, šviestuvo spektrą turėtų papildyti raudona kompo-



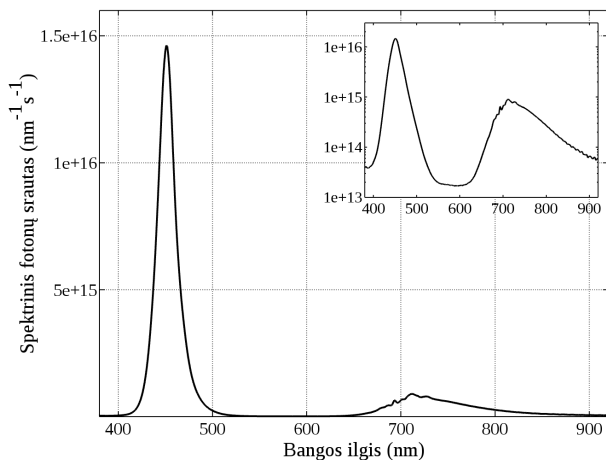


1.5 pav.: Galio granatų legiruotų  $\text{Cr}^{3+}$  ir iškaitintų  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje FL spektrai esant skirtingoms bandinių temperatūroms:  $0, 20, 40, 60$  ir  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  [III]

mentė (620–680 nm intervale), kuri reikalinga augalų fotosintezei ir fotomorfogenezei (fitochromi  $\text{P}_r$ ). Ši tikslą galima realizuoti į augalų apšvietimo modulius įmontuojant tokio pačio dizaino raudonus tiesioginės emisijos AlGaInP šviestukus.

### 1.3 Skyriaus apžvalga

Šios darbo dalies metu buvo tiriamos gadolinio, gadolinio skandžio, itrio ir lutecio galio granatai legiruotų chromu FL savybės. Skyriuje trumpai pristatoma granatų sintezė, struktūrinė bei morfologinė analizė bei FL savybių matavimo metodikos ir savybės. Darbo metu nustatyta, kad zolių-gelių metodu susintetinti galio granatai pasižymi plačia FL juosta tolimoje raudonoje srityje, vykstančia dėl  $^4\text{T}_2 \rightarrow ^4\text{A}_2$  šuolio. Atlikus tyrimus, įver-



1.6 pav.: Konversijos fosfore kietakūnio šviestuvo, skirto augalų fotofiziologinių poreikių tenkinimui, spektras. Įklia vaizduoja spektrą logaritminiame mastelyje. Mėlynos ir tolimes raudonos komponentių santykis – 4,6 [V].

tinta chromo legiravimo bei bandinių iškaitinimo temperatūros įtaka galio granatų FL savybėms. Atrinkus našiausiai fotoluminescuojantį fosforą – YGG:Cr 8 mol%, iškaitintą 1300 °C temperatūroje, buvo sukonstruotas KFŠ šviestuvo prototipas, skirtas augalų fotofiziologinių poreikių tenkinimui.

# 2 Mažo cirkadinio poveikio konversijos fosfore šviestukai lauko apšvietimui

Šiame skyriuje pristatoma fotofiziologiškai draugiško konversijos fosfore kietakūnio šaltinio koncepcija. Skyriaus pradžioje aprašomas *liepsnos* šviesos ( $SST < 2500$  K) KFŠ SGS modeliavimas ir optimizavimas. Vėliau pristatomi du mezopinei regai skirti liepsnos šviesos KFŠ šviestuvų prototipai, pasižymintys mažu cirkadiniu poveikiu. Čia pateikiami rezultatai taip pat aprašyti moksliniame straipsnyje, LR patente, bei PCT patentinėje paraiškoje [II, VI, VII].

## 2.1 Eksperimentinės metodikos

### 2.1.1 Modeliniai fotofiziologiškai draugiškų konversijos fosfore šviestukų SGS

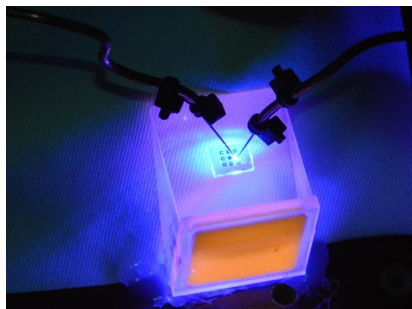
Pagrindiniai kriterijai pagal kuriuos buvo atrenkamos fotofiziologiškai draugiškų KFŠ spektrinės komponentės buvo sukurti atsižvelgiant į teorinio tiesioginės emisijos šviestukų optimizavimo rezultatus [34] ir yra formuluojami taip:

1. SGS turi būti sudarytas iš dviejų spektrinių komponentių ir pasižymėti kuo žemesne SST;

2. trumpabangės komponentės smailė turi būti ties maždaug 440 nm, o ilgabangės komponentės smailė turi būti oranžinėje spektro srityje (toks komponentių parinkimas užtikrina mažiausią CPF vertę dėl mažo mėlynos šviesos dalinio galios srauto ir didelio tokio SGS SŠV);
3. žemas dvispalvio SGS SAR gali būti toleruojamas dėl suprastėjusio žmonių gebėjimo skirti spalvas prieblandoje (mezopinėje srityje);

Konversijos fosfore šviestukų SGS buvo modeliuojami pasitelkus prekinį ir laboratorijose susintetintų fosforų FL spektrus. Naudoti prekiniai *PhosphorTech* bei *Intematix* fosforai: granatai (BYW10A, HTY550, HTY560), nitridas (HTR620), ortosilikatai (BUVOR02, BUVY03, O5446, P6040) ir chalkogenidas (BUVY02). Modeliavimui taip pat pasitelkti moksliniuose straipsniuose ar patentuose aprašyti fosforai: nitridosilikatas  $(\text{Ba,Sr})_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  [35], chalkogenidas  $(\text{Ca,Sr})\text{Se}:\text{Eu}^{2+}$  [36], oksinitridosilikatas  $\text{Ca}-\alpha\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$  [37], ortosilikatas  $(\text{Ba,Sr})_2\text{SiO}_4$  [38], bei granatas  $\text{Y}_{3-x}\text{Mg}_2\text{AlSi}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}_x^{3+}$  legiruotas skirtingomis  $\text{Ce}^{3+}$  koncentracijomis ( $x = 0, 015; 0, 03; 0, 045; 0, 06$  atitinkamai YMASG1–YMASG4), susintetintas Vilniaus bei Mūnsterio universiteto mokslininkų [39]. Mėlynai spektro komponentei panaudotas mėlyno *Philips Lumileds Rebel Royal Blue* šviestuko (bangos ilgis 444 nm) EL spektras.

Konversijos fosfore šviestukų SGS modeliavimas buvo atliktas *GNU Octave* kompiuterine programa remiantis spalvų maišymo lygtimis. Modeliavimo metu iškeltas tikslas, kad modelinio SGS *Duv* vertė būtų tarp  $-0.006$  ir  $0.006$  [40].

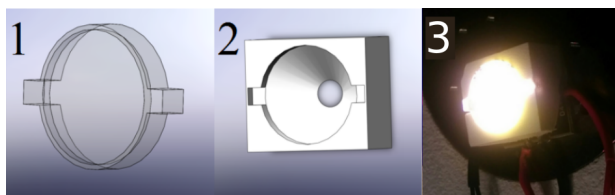


2.1 pav.: Liepsnos šviesos KFŠ prototipas, pagamintas naudojant VU FNI užaugintą mėlyną InGaN šviestuką. Nuotraukoje pavaizduotas keitiklis pagamintas iš silikono ir ortosilikatinio fosforo.

### 2.1.2 Liepsnos šviesos KFŠ prototipavimas

Darbo metu buvo sukurti du skirtingi liepsnos šviesos KFŠ prototipai. Pirmasis prototipas buvo kuriamas pasitelkus Vilniaus universiteto Fotonikos ir nanotechnologijų institute (VU FNI) užaugintą mėlyną InGaN šviestuką [41] bei tris keičiamus šviesos keitikius, pagamintus iš silikono bei oranžinių fosforų (granatinio YMASG, keitiklio storis 2 mm, koncentracija 19 wt % [39] ir ortosilikatinių BUVOR02, *PhosphorTech*, keitiklio storis 1,5 mm, koncentracija 21 wt % bei O5446, *Intematix*, keitiklio storis 0,5 mm, koncentracija 21 wt %). Šviestukas buvo maitinamas 20 mA srove, palaikant 6,24 V įtampą, kontaktai buvo prijungiami panaudojant optinį mikroskopą. Prototipo nuotrauka pateikiama 2.1 pav.

Antrojo prototipo brėžiniai ir nuotrauka pavaizduota 2.2 pav. Šis prototipas sukonstruotas pasitelkus prekinį mėlyną InGaN šviestuką (*Philips Lumileds Luxeon Z Royal blue*), polivinilchlorido (PVC) putų reflektorių (2), išfrezuotą frezavimo staklėmis *ROLAND Modela 4 MDX-40*, bei tris keičiamus šviesos keitik-



2.2 pav.: Liepsnos šviesos KFŠ prototipas, pagamintas naudojant prekinį mėlyną InGaN šviestuką, bei šviesos keitiklius, pagamintus iš silikono ir fosforų mišinių.

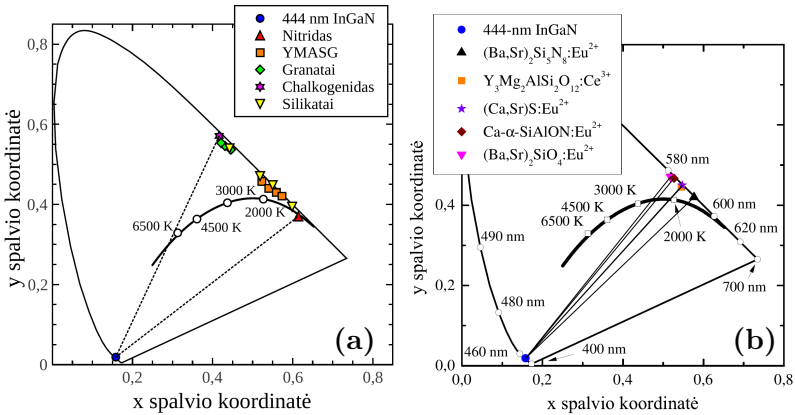
lius (1), pagamintus iš silikono ir fosforų mišinio (silikatinių BU-VOR02, keitiklio storis 1,2 mm, koncentracija 35 wt %, O5446, keitiklio storis 0,6 mm, koncentracija 20 wt % ir O6040, *Intematix*, keitiklio storis 1,2 mm, koncentracija 15 wt %).

## 2.2 Rezultatai

### 2.2.1 Modeliniai liepsnos šviesos SGS

Modelinių KFŠ SGS modeliavimui naudoto mėlyno InGaN šviestuko bei fosforų  $xy$  spalvio koordinatės atvaizduotos 2.3 pav. a) pav. vaizduoja prekinį bei YMASG fosforų  $xy$  koordinates, tiesės vaizduoja spalvų erdvės ribas, apibrėžiančias galimų modelinių šviestukų spalvį. b) pav. vaizduoja fosforų, aprašytų straipsniuose bei patentuose  $xy$  koordinates, tiesės vaizduoja galimų šviestukų spalvius. Pastorinta linija žymi Planko lanką. Iš 2.3 a) pav. matyti, kad pasirinkta prekinų fosforų aibe yra gana plati, tačiau nustačius, kad aukštės SST vertės SGS pasižymi dideliu cirkadiniu poveikiu, iš straipsnių ir patentų buvo parenkami tik oranžinėje srityje fotoluminescuojantys fosforai.

2.4 pav. atvaizduoti modelinių šviestukų SGS, pasižymintys minimaliu cirkadiniu poveikiu, o 2.1 lentelėje pateikiamos jų charakteristikos. Siekiant kad paveikslai būtų aiškūs ir grafikai



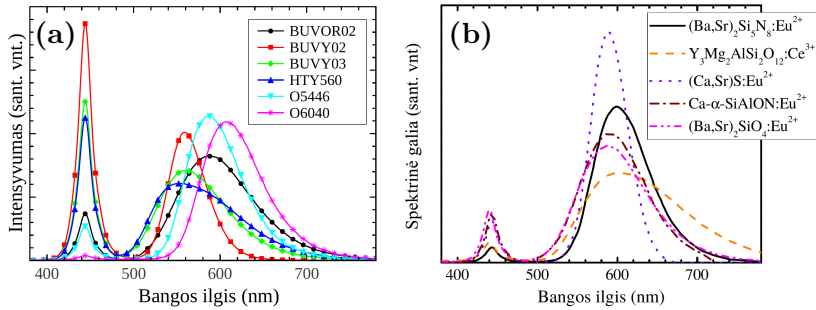
2.3 pav.: CIE 1931 spalvų diagrama, kurioje atvaizduotos: a) mėlyno šviestuko, prekinių bei YMASG fosforų  $xy$  spalvio koordinatės; b) mėlyno šviestuko bei straipsniuose ir patentuose aprašytų fosforų  $xy$  spalvio koordinatės. Pastorinta linija vaizduoja Planko lanką [II].

nepersiklotų, kai kurie panašūs SGS buvo praleisti. 2.4 a) pav. neatvaizduoti SGS sudaryti iš HTY550 bei BYW01A fosforų, kurie savo forma primena SGS sukomponuotą iš HTY560 fosforo FL juostos; 2.4 b) pav. neatvaizduoti YMASG1, YMASG3 ir YMASG4 SGS, dėl panašumo į YMASG2, kuris paveiksle pažymėtas kaip  $Y_3Mg_2AlSi_2O_{12}:Ce^{3+}$ . Iš grafikų matyti, kad modeliniai spektrai susideda iš dviejų komponentių mėlynoje ir oranžinėje srityse, kur aukštesnėms SST vertėms dominuoja mėlyna komponentė, o žemesnėms – oranžinė. Paveikslai taip pat atskleidžia, kad SGS, kurie buvo modeliuojami pasitelkus granatus, pasižymi plačia  $Ce^{3+}$  FL juosta, todėl yra charakterizuojami aukšta SAR verte. Kita vertus, SGS komponuoti iš  $Eu^{2+}$  legiruotų chalkogenidų pasižymi siauriausiomis oranžinėmis komponentėmis, todėl jų SAR vertė maža.

Fosforas	SST, K	$\eta_0$	CPF		ŠSV, lm/W		SAR	
			$L_1$	$L_2$	$L_1$	$L_2$	$L_1$	$L_2$
<b>Prekiniai fosforai</b>								
BUY02	8735	0,87	1,824	2,030	403	363	33	83
HTY550	7284	0,84	1,715	1,970	385	335	66	91
BYW01A	6185	0,84	1,546	1,737	387	344	64	91
BUY03	5391	0,83	1,387	1,516	398	364	56	89
HTY560	5000	0,82	1,350	1,481	382	348	64	91
BUVOR02	2532	0,76	0,519	0,504	344	354	54	88
O5446	2148	0,75	0,337	0,315	358	384	34	83
O6040	1445	0,72	0,117	0,104	250	281	40	84
<b><math>Y_3Mg_2AlSi_2O_{12}:Ce^{3+}</math></b>								
YMASG1	2383	0,72	0,521	0,511	271	276	69	92
YMASG2	2088	0,72	0,362	0,345	250	263	62	90
YMASG3	1876	0,70	0,270	0,251	222	239	59	89
YMASG4	1732	0,70	0,233	0,216	206	223	61	90
<b>Kiti fosforai [II]</b>								
$(Ba,Sr)_2SiO_4:Eu^{2+}$	2542	0,75	0,531	0,516	343	353	55	88
$Ca-\alpha-SrAlON:Eu^{2+}$	2425	0,76	0,479	0,462	356	369	53	88
$(Ca,Sr)S:Eu^{2+}$	2101	0,77	0,308	0,283	404	439	16	78
$(Ba,Sr)_2Si_5N_8:Eu^{2+}$	1704	0,73	0,186	0,169	298	329	39	84
<b>Įprasti šviesos šaltiniai</b>								
CW šviestukas	5000	0,82	1,171	1,278	394	361	65	91
WW šviestukas	3652	0,77	0,747	0,772	377	365	62	90
HPS lempa	1886	-	0,313	0,290	319	344	12	77
CIE A	2856	-	0,856	0,911	170	160	100	100

2.1 lentelė: Spektriniai, mezopinei regai skirtų, modeliųjų KFS<sup>α</sup>, parametrai. Čia  $L_P > 10 \text{ cd/m}^2$ ,  $L_1 = 0,3 \text{ cd/m}^2$  ir  $L_2 = 2 \text{ cd/m}^2$ .





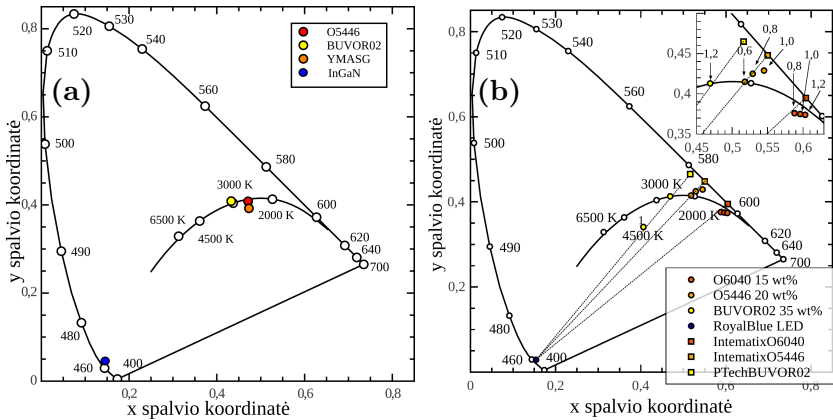
2.4 pav.: Modeliniai KFŠ SGS, pasižymintys minimaliu cirkadiniu poveikiu, sukomponuoti iš mėlyno šviesos diodo ir: a) prekinių fosforų FL juostų; b) straipsniuose aprašytų fosforų FL juostų [II].

Spektriniai modeliųjų liepsnos šviesos KFŠ parametrai pateikiami 2.1 lentelėje. Palyginimui, čia taip pat pateikti įprastų šviesos šaltinių – prekinių dvispalvių šiltai ir šaltai baltų (atitinkamai WW ir CW) KFŠ, aukšto slėgio natrio lempos (HPS), bei CIE A standartinio šviesmens – spektriniai parametrai. Lentelėje stulpeliai iš kairės į dešinę pateikia: modeliavimui naudoto fosforo pavadinimą, ribinį spindulinį našumą  $\eta_0$ , atsirandantį dėl Stokso poslinkio tarp mėlyno šviestuko EL ir fosforo FL smailių [4, 42], mezopinius CPF, SŠV ir SAR esant dviems skaisčio vertėms (0,3 ir 2  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) bei fotopinį SAR.

Iš 2.1 lentelės galime pastebėti, kad SGS, kurių SST  $\geq 4500$  K, pasižymi gana didelėmis CPF vertėmis, kurios kinta nuo 1,481 iki 2,03 esant 2  $\text{cd}/\text{m}^2$  skaisčiui (palyginimui, esant tai pačiai skaisčio vertei, CIE A šviesmens CPF = 0,911). Taip pat galime pastebėti, kad siūlomų liepsnos šviesos SGS CPF vertės maždaug 1,6–4,2 karto mažesnės negu standartinio šviesmens. Šie rezultatai puikiai koreliuoja su žmogaus fiziologija bei psichologija, kuri apibrėžiama Kruithof taisykle ir teigia, kad esant mažoms skaisčio vertėms žmonės mieliau renkasi žemos SST švie-

sos šaltinius, kuri auga didinat skaisčių [43, 44]. Lentelėje taip pat galime pastebėti, kad dėl akies jautrio funkcijos smailės poslinkio didesnių bangos ilgių link augant skaisčiui, liepsnos šviesos šviestukų spektrų SŠV vertė didėja, o CPF mažėja. Liepsnos šviesos šaltinių SŠV vertės kinta tarp 203 ir 493 lm/W, o dėl didesnio akies jautrio funkcijos ir oranžinės komponentės persiklojimo, SGS, sudaryti iš trumpesnio bangos ilgio oranžinių komponentių, pasižymi aukštesnėmis SŠV vertėmis. Dėl žalios komponentės trūkumo, dvispalviai liepsnos šviesos šaltiniai pasižymi itin prasta spalvų atgava, kurios vertės kinta tarp 16 ir 69. Tačiau, mezopinėje srityje, kuomet skaisčio vertės kinta tarp 0,01 ir 10 cd/m<sup>2</sup>, žmonių gebėjimas skirti spalvas yra suprastėjęs ir mezopinis SAR priklauso nuo skaisčio:  $R_{a,mes} = 100 - \gamma(L)(100 - R_a)$ , čia  $\gamma(L)$  – spalvų poslinkio perskaičiavimo daugiklis priklausantis nuo aplinkos skaisčio [34]. Taigi, mezopinėje srityje liepsnos šviesos KFŠ SAR vertės išauga iki 66–84 ir gerokai pranoksta šiuo metu plačiai naudojamus HPS šviestuvus ( $R_{a,mes} = 55$ ).

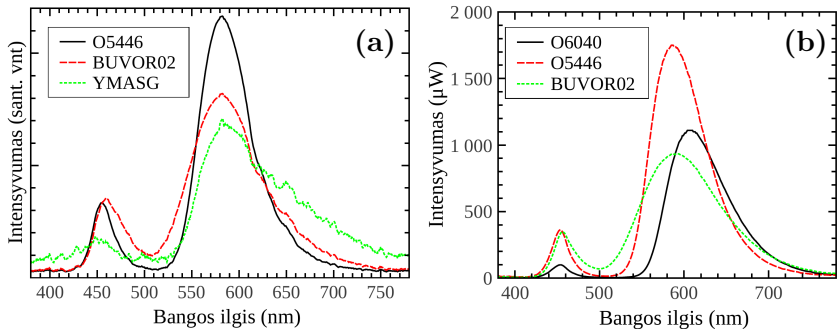
Lentelėje matyti, kad aukščiausia SŠV vertė pasižymi SGS turintis (Ca,Sr)S:Eu<sup>2+</sup> fosforo FL komponentę, kuri yra lygi 439 lm/W. Jis taip pat išsiskiria ypač mažu cirkadiniu poveikiu, kurio vertė yra vos 0,283. Nepaisant to, šio SGS SAR vertė yra vos 57 esant skaisčiui  $L_2$ . Daugiausiai žadantys SGS yra sudaryti iš silikatinių fosforų FL spektrinių komponentių – atitinkamai  $L_1$  ir  $L_2$  skaisčio vertėms, jie pasižymi gana aukštu SŠV (343–369 lm/W), mažu CPF (0,531–0,462) bei pakankama SAR (76–88). Todėl nepaisant to, kad prekinis WW šviestukas pasižymi kiek aukštesnėmis SŠV vertėmis (377–365 lm/W), dėl ženkliai mažesnio CPF liepsnos šviesos KFŠ yra pranašesni vakarinio ir naktinio gatvių apšvietimo srityje, kur dalis našumo gali būti paaukojama vardan mažesnio šviesos fotobiologinio poveikio bei taršos. Tokie šviestukai gali būti taikomi miegamuosiuose rajonuose, soduose, parkuose ar senamiesčio pastatų apšvietimui.



2.5 pav.: Liepsnos šviesos KFŠ spalvinės koordinatės CIE 1931 diagramoje. Fosforų žadinimui panaudotas a) VU FNI užaugintas mėlynas InGaN šviestukas; b) prekinis *Royal Blue* šviestukas.

### 2.2.2 Liepsnos šviesos KFŠ prototipai

2.5 pav. pateiktos CIE 1931 spalvinės diagramos vaizduojančios liepsnos šviesos KFŠ prototipų  $xy$  koordinatės. a) pav. vaizduoja prototipo, pagaminto naudojant VU FNI mokslininkų užaugintą InGaN šviestuką [41], spalvines koordinatės; b) pav. atvaizduotos prototipo, kurio gamybai buvo naudojamas prekinis *Lumileds Royal Blue* InGaN šviestukas. Iš paveikslų matyti, kad prototipai pasižymi žemomis spalvinėmis temperatūromis, o jų spalvinės koordinatės išsidėsčiusios labai arti Planko lanko. Nustatyta, kad beveik visų prototipų SGS  $D_{uv}$  vertės atitinka baltai šviesai keliamus reikalavimus ( $D_{uv} \leq \pm 0,006$ ): a) 0,0036, -0,0023 ir -0,0108 atitinkamai BUVOR02, O5446 ir YMASG pažymėtiems šviestukams, bei b) 0,0002, -0,0015 ir -0,0058 atitinkamai BUVOR02, O5446 ir O6040 pažymėtiems šviestukams. Dėl nedidelio YMASG fosforo našumo, šiam šviestukui buvo sunku pasiekti reikalavimus atitinkančią  $D_{uv}$  vertę.



2.6 pav.: Liepsnos šviesos KFŠ SGS. Fosforų žadinimui panaudotas a) VU FNI užaugintas mėlynas InGaN šviestukas; b) prekinis *Royal Blue* šviestukas.

Liepsnos šviesos KFŠ prototipų SGS pateikti 2.6 pav. a) pav. atvaizduoto spektro mėlyna komponentė buvo realizuojama pasitelkus VU FNI užaugintą šviestuką, o b) pav. atvaizduoto spektro – prekinį šviestuką. Iš grafikų matyti, kad visi SGS yra dvispalviai, sudaryti iš intensyvios oranžinės ir silpnesnės mėlynos komponentių. Dėl mažo fosforo našumo, 2.4 a) atvaizduotas YMASG SGS yra gana triukšmingas, tačiau bendras signalo ir triukšmo santykis kinta tarp 8 ir 14 %, taigi triukšmo įtaka spektriniam parametrams išlieka nedidelė. Fotometriniai ir spektriniai prototipų parametrai pateikiami 2.2 lentelėje. Iš lentelės matyti, kad dėl didesnio laboratorijoje užauginto šviestuko EL smailės bangos ilgio, šie šviestukai pasižymi kiek aukštesnėmis SST, CPF ir SŠV vertėmis. Nepaisant to, kaip ir modeliniai liepsnos šviesos šviestukai, pagaminti prototipai pasižymi mažu cirkadiniu poveikiu, dideliu našumu ir pakankama spalvų atgava, todėl yra tinkami fotobiologiškai draugiško mezopinio apšvietimo taikymams.

2.2 lentelė: Spektriniai liepsnos šviesos KFŠ parametrai.  $L_P > 10 \text{ cd/m}^2$ ,  $L_1 = 0,3 \text{ cd/m}^2$  and  $L_2 = 2 \text{ cd/m}^2$ .

Fosforas	SST, K	CPF		SŠV, lm/W		SAR		
		$L_1$	$L_2$	$L_1$	$L_2$	$L_P$	$L_1$	$L_2$
<b>Laboratorinis šviestukas</b>								
BUVOR02	3110	0,792	0,814	362	352	57	89	81
O5446	2533	0,568	0,551	370	383	32	82	66
YMASG	2389	0,697	0,690	256	259	57	89	78
<b>Prekinis šviestukas</b>								
BUVOR02	2585	0,600	0,596	336	338	61	90	80
O5446	2100	0,367	0,345	348	373	34	83	66
O6040	1345	0,223	0,199	229	257	34	83	66

## 2.3 Skyriaus apžvalga

Šioje dalyje buvo modeliuojami dvispalviai liepsnos šviesos KFŠ SGS, pasižymintys mažu cirkadiniu poveikiu. Apskaičiavus modelinių spektrų fotometrinius parametrus, nustatyta, kad jie pasižymi mažomis CPF vertėmis, todėl fotobiologiniu poveikiu yra pranašesni už įprastus šviestukus. Taip pat nustatyta, kad dėl sumažėjusio gebėjimo skirti spalvas prieblandoje, apskaičiuotos mezopinio SAR vertės, nenusileidžia įprastų šviestukų fotopinio SAR vertėms.

Antroje darbo dalyje, pasitelkus VU FNI užaugintą, bei prekinį InGaN šviestuką ir prekinis fosforus buvo kuriami liepsnos šviesos KFŠ prototipai, kurie, kaip ir modeliniai, pasižymėjo žemomis SST, mažais CPF bei pakankama SAR verte.

Tiek modelinių, tiek realių prototipų SŠV vertės yra kiek mažesnės nei prekinų dvispalvių šviestukų. Tačiau liepsnos šviesos KFŠ, dėl mažo cirkadinio poveikio, yra pranašesni taikymuose, kur dalis našumo gali būti paaukota vardan mažesnės šviesos taršos ir fotobiologinio poveikio todėl yra tinkami vakariniam miegamųjų rajonų, taip pat parkų, sodų ar statinių apšvietimui.



# 3 Konversijos fosfore šviestukai pasižymintys pirmenybine spalvų atgava

Šis skyrius aptaria KFŠ taikymus bendrajame apšvietime, kuris pasižymi įvairiomis spalvų atgavos savybėmis. Skyriaus pradžioje pristatomas teorinių KFŠ SGS optimizavimas. Vėliau aptariami ir charakterizuojami modeliniai KFŠ SGS pasižymintys spalvų sodrinimu, tikslia, bei pirmenybine spalvų atgava, sukomponuoti remiantis optimizavimo rezultatais. Skyriuje taip pat pristatomas ir charakterizuojamas KFŠ šviestuvo prototipas, pasižymintis pirmenybine spalvų atgava (PrefLED). Šis prototipas patvirtinamas psichofizikiniu eksperimentu, kurio rezultatai pateikiami skyriaus gale. Šis skyrius remiasi rezultatais, kurie taip pat pateikiami moksliniame straipsnyje, tarptautiniame patente bei konferencijos darbuose [I, VIII, IX].

## 3.1 Eksperimentinės metodikos

### 3.1.1 KFŠ, pasižymintys skirtingomis spalvų atgavos savybėmis modeliavimas

Kompiuterinis spektrų optimizavimas buvo atliktas Vilniaus Universiteto Matematikos ir informatikos fakulteto prof. Rimanto Vaicekausko. Visų pirma, siekiant optimizuoti konversijos fosfore šviestukų SGS, buvo kuriamas teorinis Gausinės formos mode-

lis, aprašantis tipinę fosforo FL juostą, kuris bangos ilgių skalėje išreiškiamas taip:

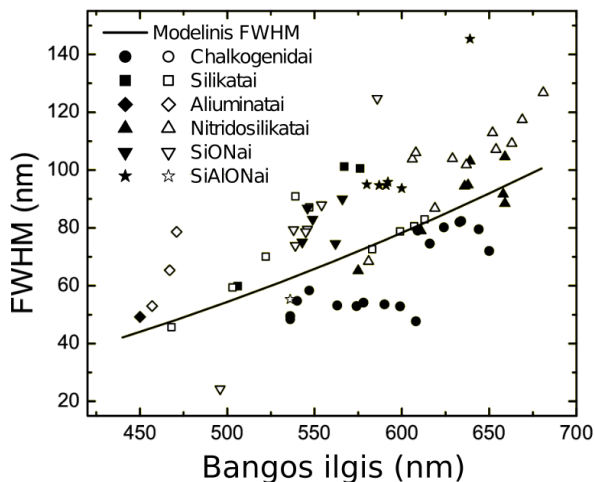
$$S_i d\lambda = k(\lambda/\lambda_{0i})^{-2} \exp[-4 \ln(2)(h^2 c^2 (\lambda^{-1} - \lambda_{0i}^{-1})/W^2)] d\lambda, \quad (3.1)$$

čia  $\lambda_{0i} = c/\nu_i$  ( $\nu_i$  – fotono energija ties smailės energijos skalėje),  $W$  spektro plotis ties pusė aukščio energijos skalėje (FWHM),  $k$  – normavimo daugiklis. Modelis patvirtintas 3.1 pav., kuriame juoda linija atvaizduota modelinio spektro FWHM priklausomybė nuo smailės bangos ilgio, o taškai žymi įvairių moksliniuose straipsniuose ar patentuose aprašytų  $\text{Eu}^{2+}$  legiruočių fosforų FWHM, ir smailės bangos ilgius. Burbuliukai, kvadratukai, rombukai, trikampiukai, apversti trikampiukai ir žvaigždutės atitinkamai žymi chalkogenidus (šarminių žemių metalų sulfidus [45, 46, 47] ir selenidus [36] bei tiogalatus [45, 38]), silikatus [48, 49], aluminatus [46, 50], nitridosilikatus [51, 52], oksini- nitridosilikatus ( $\text{SiONai}$ ) [53, 54, 55] ir oksini- nitridoaluminosilikatus ( $\text{SiAlONai}$ ) [56, 57].

Optimalūs šviestukų SGS buvo ieškomi komponuojant tris 3.1 formule aprašomas komponentes į trispalvius mišinius, kurių SST buvo 3000, 4500 ir 6500 K. Šie spektrai buvo optimizuojami kiekvienai SST, ieškant maksimalių spalvinių parametrų funkcijų skirtingoms SŠV vertėms.

Patvirtinus teorinį modelį ir atsižvelgus į optimizacijos rezultatus, iš skirtingų fosforų FL komponentių, pasitelkus *MathWorks® MATLAB* programinę įrangą, buvo modeliuojami padidinto tikslumo, sodrinantys bei pirmenybine spalvų atgava pasižymintys SGS. Šiam tikslui buvo išmatuotos šių  $\text{Eu}^{2+}$  legiruočių fosforų FL: mėlyno  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$  (BAM, *Intematix* B101C-2, smailė 446 nm, FWHM 45 nm), žydro, žalio ir oranžinio silikatų (atitinkamai *Intematix* G1758, smailė 507 nm, FWHM 59 nm; EG3264, smailė 528 nm, FWHM 71 nm ir O6040, smailė 606 nm,



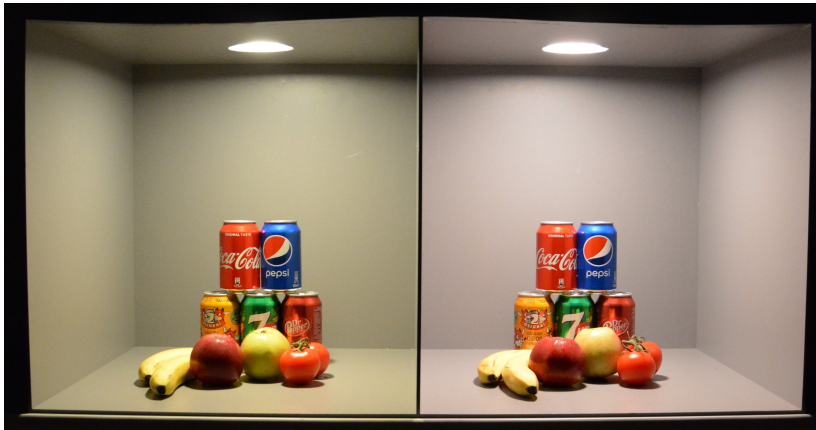


3.1 pav.: Įvairių fosforų, legiruotų  $\text{Eu}^{2+}$  jonais FL spektro pločio priklausomybė nuo smailės bangos ilgio. Pilnaviduriai ir tuščiaviduriai taškai žymi fosforus, kuriuos aproksimuojant 3.1 formule  $R^2$  įgyja vertes atitinkamai didesnes ir mažesnes už 0,99 [1].

FWHM 81 nm), bei raudono ir gilaus raudono nitridų (atitinkamai *PhosphorTech* HTR620, smailė 617 nm, FWHM 83 nm ir *Intematix* ER6436, smailė 625 nm, FWHM 87 nm). FL buvo registruojama *Avantes* spektrometru, fosforų žadinimui panaudojant mėlyną šviesos diodą, BAM fosforo FL matuojama žadinant UV šviestuku.

### 3.1.2 Pirmenybine spalvų atgava pasižymintio KFŠ šviestuvo gamyba

Pirmenybine spalvų atgava pasižymintis KFŠ šviestuvus buvo gaminamas tokiu pačiu principu kaip ir augalų šviestuvus. Šiuo atveju buvo naudojami du suvožti fosforo keitikliai. Žalias keitiklis buvo pagamintas iš silikatinio *Intematix G1758* fosforo (keitiklio



3.2 pav.: Eksperimentinis stendas, skirtas gretutinio išdėstymo šviesos šaltinių psichofizikiniam įvertinimui. Kairėje – halogeninis šviestuvus, dešinėje – pirmenybine spalvų atgava pasižymintis prototipas [IX]

storis 1 mm, koncentracija 25 wt %), o raudonas iš *Intematix ER6436* (keitiklio storis 0,3 mm, koncentracija 15 wt %). Ža-dinančioji mėlyna komponentė buvo realizuota pasitelkus 8 vnt. *Cree Royal Blue XP-E2* šviestukus.

### 3.1.3 Psichofizikinio eksperimento organizavimas

Siekiant atlikti prototipinio šviesos šaltinio psichofizikinį vertinimą buvo organizuojamas gretutinis kompozicijų išdėstymas, kuris yra žinomas, kaip patikimas metodas psichofizikiniam apšvietimo vertinimui [58]. Šiam tikslui panaudotas tolygaus pilko atspalvio eksperimentinis stendas padalintas į dvi lygias dalis. Abiejose stendo pusėse buvo išdėstyti tyrimo subjektams gerai pažįstami, įvairių spalvų vaisiai bei gaivieji gėrimai. Eksperi-mento išdėstymo nuotrauka atvaizduota 3.2 pav, čia kairioji pusė apšviesta halogeniniu šviestuvu, dešinioji, tiriamuoju prototipi-niu šviestuvu.

Ekspimento metu subjektai atliko S. Ishihara spalvų skirties testą, ir po spalvinės adaptacijos buvo po vieną kviečiami prie stendo. Čia eksperimentatorius jiems žodiniu būdu užduodavo klausimą, į kurį subjektai turėjo atsakyti pasirinkdami kairią arba dešinę kompoziciją. Klausimai pateikti 3.3 lentelėje. Kiekvienas subjektas eksperimentą pakartojo keturis kartus, sukeičiant kompozicijas ar šviestuvus vietomis, bet apie pokyčius neinformuojant subjektų. Viso dalyvavo 25 18–34 metų amžiaus (amž. vid. 26) savanoriai subjektai (13 moterų, 12 vyrų), iš kurių 3 buvo patyrę asmenys, dirbantys apšvietimo tyrimų grupėje.

## 3.2 Rezultatai

### 3.2.1 Modelinių KFŠ spektrai ir jų parametrai

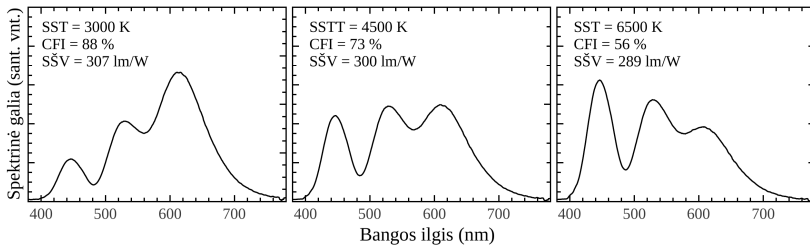
KFŠ, pasižyminčių skirtingomis spalvų atgavos savybėmis optimizavimo rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje. Čia surašyti apytiksliai optimalūs KFŠ fosforų FL smailių bangos ilgiai. Lentelėje matyti, kad spalvas blukinantis mišinys gali būti komponuojamas panaudojant mėlyną, bei dvi artimas žalią ir geltoną komponentes (atitinkamai, 535 ir 580 nm). Tačiau kaip tik tokiu SGS pasižymi plačiai naudojamas šaltai baltas šviestukas su YAG:Ce fosforu, kuriame plati fosforo FL juosta atstoja ir žalią, ir geltoną komponentes. Dėl šios priežasties spalvas blukinantis mišinys darbe toliau nenagrinėjamas.

Modeliniai KFŠ SGS, pasižymintys tikslia spalvų atgava trims SST vertėms (3000, 4500 ir 6500 K) pavaizduoti 3.3 pav. Visi SGS sudaryti naudojant tuos pačius prekinis fosforus: mėlyną BAM (*Intematix* B101C-2;  $\lambda_{\text{peak}} = 446$  nm, FWHM = 45 nm), žalią silikatą (*Intematix* EG3264,  $\lambda_{\text{peak}} = 528$  nm, FWHM = 71 nm) ir raudoną nitridą (*PhosphorTech* HTR620;  $\lambda_{\text{peak}} = 617$  nm, FWHM = 83 nm). SGS CFI vertės: 88 %, 73 % ir 56 %,

3.1 lentelė: Siūlomi optimalūs KFŠ, pasižyminčių skirtingomis spalvų atgavos savybėmis, fosforų FL smailių bangos ilgiai [I].

Spalvų atgavos savybė	Didelio tikslumo	Spalvas sodrinanti	Spalvas blukinanti	Pirmenybinė
Giliai mėlyna		445		
Mėlyna	460		460	460
Žydra		510		510
Žalia	530		535	
Geltona			580	
Raudona	615			610
Giliai raudona		625		

SŠV vertės: 307 lm/W, 300 lm/W ir 289 lm/W atitinkamai 3000, 4500 ir 6500 K SST vertėms. 3000 K SST SGS parametrai labai artimi optimaliems parametrams, pateiktiems I. Aukštesnių spalvinių temperatūrų CFI ir LER vertės kiek mažesnės už optimalias dėl teorinių ir realių fosforų FL spektrų nesutapimo.



3.3 pav.: KFŠ SGS, pasižymintys tikslia spalvų atgava skirtingoms SST vertėms. Adaptuota pagal I.

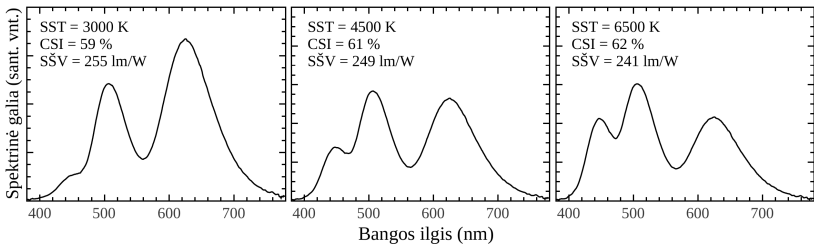
Modeliniai KFŠ SGS, sodrinantys spalvas, trims SST vertėms (3000, 4500 ir 6500 K) pavaizduoti 3.4 pav. Visi SGS sudaryti naudojant tuos pačius prekinius fosforus: mėlyną BAM,

žydrą silikatą (*Intematix G1758*,  $\lambda_{\text{peak}} = 507 \text{ nm}$ , FWHM = 59 nm) ir giliai raudoną nitridą (*Intematix ER6436*;  $\lambda_{\text{peak}} = 625 \text{ nm}$ , FWHM = 87 nm). SGS CSI vertės: 59 %, 61 % ir 62 %, SŠV vertės: 255 lm/W, 249 lm/W ir 241 lm/W atitinkamai 3000, 4500 ir 6500 K SST vertėms. Šios vertės yra artimos optimalioms vertėms, pateiktoms **I**.

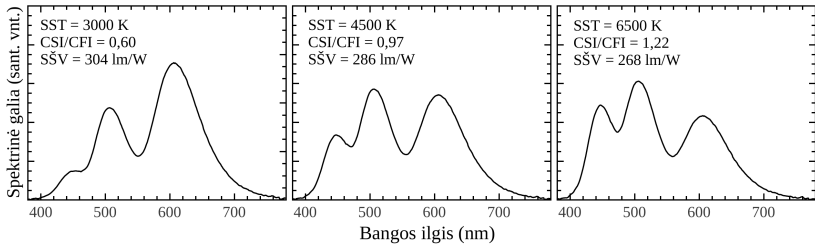
Modeliniai KFŠ SGS, pasižymintys pirmenybine spalvų atgava trims SST vertėms (3000, 4500 ir 6500 K) pavaizduoti 3.5 pav. Visi SGS sudaryti naudojant tuos pačius prekinis fosforus: mėlyną BAM, žydrą silikatą G1758 ir oranžinį silikatą (*Intematix O6040*;  $\lambda_{\text{peak}} = 606 \text{ nm}$ , FWHM = 81 nm). SGS CSI/CFI vertės: 0,6, 0,97 ir 1,22, SŠV vertės: 304 lm/W, 286 lm/W ir 268 lm/W atitinkamai 3000, 4500 ir 6500 K SST vertėms. Modelinių SGS CSI/CFI vertės patenka į pirmenybinės spalvų atgavos intervalą 0.3–3. SŠV vertės kiek mažesnės už optimalias, pateiktas **I**, dėl realių fosforų FL ir teorinių spektrų nesutapimo.

### 3.2.2 SGS savybių priklausomybė nuo temperatūros

Sumodeliuotų, skirtingų SST SGS spalvinės atgavos savybių priklausomybė nuo temperatūros pateikiama 3.6 pav. Raudona linija žymi ribą, kurią kirtus prarandamos būdingosios SGS savybės. Iš grafiko matyti, kad tikslia spalvų atgava pasižymintys 3000 ir

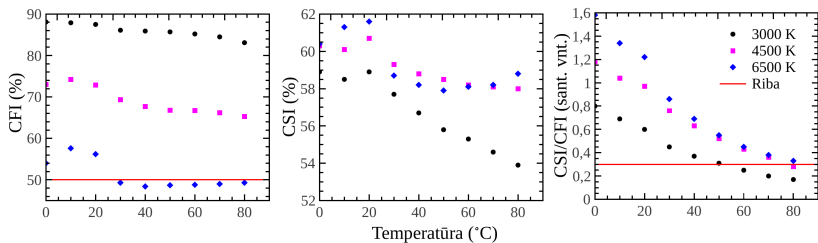


3.4 pav.: KFŠ SGS, pasižymintys spalvų sodrinimu skirtingoms SST vertėms. Adaptuota pagal **I**.



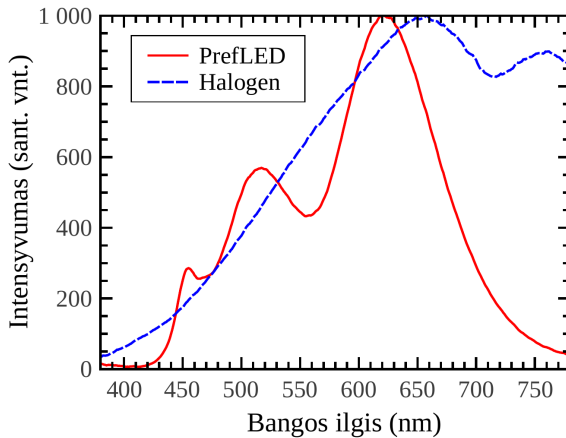
3.5 pav.: KFŠ SGS, pasižymintys pirmenybine spalvų atgava skirtingoms SST vertėms. Adaptuota pagal I.

4500 K SST SGS yra gana stabilūs ir tikslios spalvų atkūrimo savybės neprarandamos visame išmatuotų temperatūrų intervale. To negalima pasakyti apie 6500 K spektrą, kuris savybes praranda jau 30 °C temperatūroje. Stabiliausias iš visų mišinių yra spalvas sodrinantis SGS, kuris šias savybes pateiktoms trims SST vertėms išlaiko visame išmatuotų temperatūrų intervale. Iš grafiko taip pat matyti, kad visų SST SGS, pasižymintys pirmenybinėmis spalvų atgavos savybėmis, keliant temperatūrą pamažu praranda savo savybes. Pirmiausiai, ties 50 °C savybes praranda 3000 K mišinys, o ties 80 °C ir 4500 bei 6500 K mišiniai.



3.6 pav.: Skirtingų SST modelių SGS spalvinės atgavos savybių priklausomybė nuo temperatūros. Iš kairės į dešinę atitinkamai pateikiamos tikslios spalvų atgavos, sodrinančio ir pirmenybinio mišinio charakteristikos.

### 3.2.3 Pirmenybine spalvų atgava pasižyminčio KFŠ prototipo savybės

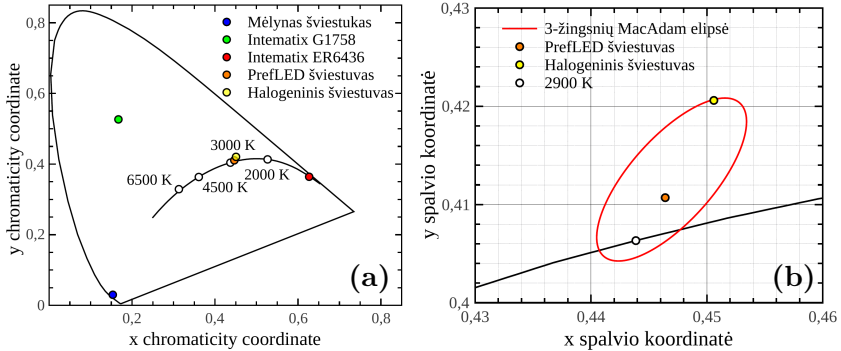


3.7 pav.: PrefLED prototipo bei eksperimente naudoto halogeninio šviestuvo SGS [IX].

Sukonstruoto pirmenybine spalvų atgava pasižyminčio KFŠ prototipo (PrefLED) SGS pateiktas 3.7 pav. Iš paveikslo matyti, kad šviestuvo spektras sudarytas ir trijų komponentių mėlynoje (455 nm), žalioje (517 nm) ir giliai raudonoje (621 nm) srityse. Būtent tamsiai raudona komponentė suteikia PrefLED šviestuvui savybę šiek tiek sodrinti apšviečiamų objektų spalvas. Paveiksle taip pat atvaizduotas MR16 halogeninės lempos SGS, kurio forma primena juodo kūno spinduliuotę, tačiau dėl MR reflektoriaus turi lokalų minimumą tolimoje raudonoje srityje ties maždaug 710 nm.

3.8 (a) pav. pateiktos sukonstruoto PrefLED prototipo bei palyginimui naudoto halogeninio šviestuvo  $xy$  spalvinės koordinatės CIE 1931 diagramoje. Paveiksle taip pat pažymėtos prototipe panaudotų mėlyno šviestuko bei žalio ir raudono fosforų spalvinės koordinatės. 3.8 (b) pav. pateikiamas papildintas spalvų

diagramos vaizdas bei 3 žingsnių MacAdam elipsė. Kaip matyti, PrefLED prototipo, halogeninio šviestuvo bei 2900 K juodo kūno spinduolio spalvinės koordinatės telpa į elipsės ribas, taigi abu tiriami šaltiniai gali būti lyginami bei apibūdinami kaip 2900 K SST šviesos šaltiniai.



3.8 pav.: (a) CIE 1931 diagrama vaizduojanti PrefLED šviestuvo bei jo gamybai naudotų fosforų ir mėlyno šviestuko, o taip pat ir halogeninio šviestuvo spalvines koordinates; (b) padidintas diagramos vaizdas, kuriame pažymėtos 2900 K juodo kūno, PrefLED bei halogeninio šviestuvų spalvinės koordinatės, bei 3-žingsnių MacAdam elipsė [IX].

3.2 lentelėje pateikiami tiriamų šviesos šaltinių bei standartinio CIE A šviesmens spektriniai parametrai. Iš lentelės matyti, kad PrefLED prototipas pasižymi itin maža nuokrypio nuo Planco lanko  $D_{uv}$  verte ir atitinka baltai šviesai keliamus reikalavimus. Lentelėje matyti, kad halogeninis šviestuvai pasižymi itin tikslia spalvų atgava, kadangi jo spalvų tikslumo rodiklio (CFI) bei  $R_a$  vertės atitinkamai siekia 97 % ir 96. PrefLED šviestuvo gebėjimas tiksliai atkurti spalvas kur kas mažesnis, jo CFI ir  $R_a$  vertės atitinkamai tėra 47 % ir 87. Tačiau dėl giliai raudonos komponentės, kitaip nei halogeninis šviestuvai, PrefLED



prototipas geba sodrinti spalvas – jo spalvų sodrinimo rodiklis (CSI) siekia 29 %, o CSI/CFI santykis yra lygus 0,64, ir patenka į pirmenybinį apšvietimą atitinkantį intervalą (0,3–3). Tiek halogeniniui, tiek PrefLED šviestuvui, naujojo spalvų atgavos rodiklio  $R_f$  vertės per daug nenukrypsta nuo  $R_a$ , o spalvų gamos ploto rodiklis  $R_g$  abiemis šviestuvams yra vienodas ir siekia 96. Halogeninis šviestuvas pasižymi kiek mažesne CPF verte, tačiau tiek PrefLED, tiek halogeninio šviestuvo CPF vertės panašios į CIE A CPF vertes (1) ir atitinkamai yra lygios 1,01 ir 0,851.

3.2 lentelė: PrefLED prototipo bei halogeninio šviestuvo fotometriniai parametrai. Palyginimui pateiktos ir standartinio CIE A šviesmens charakteristikos [IX].

Šviestuvas	SST, K	$D_{uv}$	SŠV, lm/W	CFI, %	CSI, %	$R_a$	$R_f$	$R_g$	CPF
PrefLED	2900	0.0014	271	47	29	87	82	96	1,01
Halogenas	2912	0.0046	170	97	0	96	95	96	0,851
CIE A	2856	0	155	100	0	100	100	100	1

### 3.2.4 Psichofizikinio eksperimento rezultatai

Psichofizikinio tyrimo rezultatai pateikiami histogramoje 3.3 pav. Skaičiai  $x$  ašyje žymi klausimus, kurie buvo užduodami subjektams eksperimento metu, ir yra pateikiami 3.3 lentelėje.  $y$  ašis žymi pasirinkimų vidurkius. Kaip matyti iš histogramos, subjektai buvo linkę teikti pirmenybę PrefLED šviestuvui, jis apibūdinamas kaip šviesesnis, spalvingesnis, ryškesnis, patrauklesnis, vaizdingesnis ir prabangesnis. Taip pat, subjektai PrefLED prototipą mieliau rinkosi aktyvių aplinkų, tokių kaip, biuras, gamyklinės patalpos, prekybos ir pramogų centras, maisto prekių parduotuvė ar restoranas apšvietimui. Prototipas taip pat buvo pasirenkamas kaip tinkamesnis virtuvės, svetainės bei vonios

kambario apšvietimui namuose. Tuo tarpu halogeninis šviestuvus buvo apibūdinamas kaip natūralusis bei labiau raminantis ir buvo pasirinktas kaip tinkamesnis namų, ypač miegamojo, apšvietimui. Tikėtina, kad subjektai, nesąmoningai jausdami mažesnę halogeninio šviestuvo cirkadinię poveikį, jį rinkosi ramiose aplinkose.

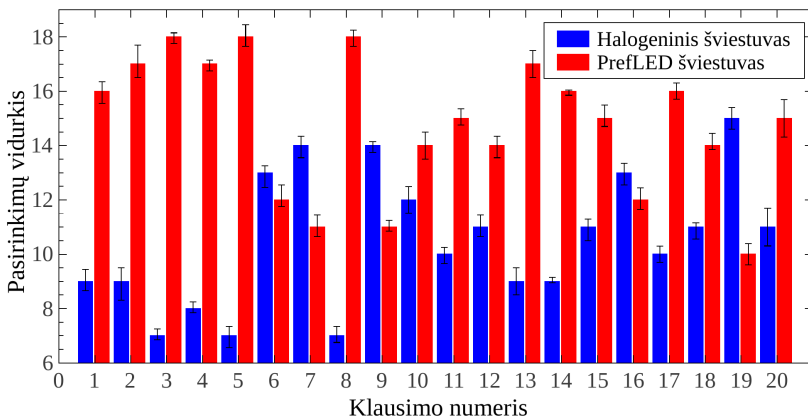
Svarbu paminėti, kad analizuojant rezultatus, būtina atsižvelgti į tai, kad jie atspindi monokultūrinės (eksperimentas buvo organizuojamas Lietuvoje) ir gana jaunos amžiaus grupės pasirinkimus. Siekiant gauti bendresnius rezultatus, tyrimą galima išplėsti ir atlikti kituose regionuose, bei įvairiose amžiaus grupėse.

3.3 lentelė: Klausimai, užduoti subjektams psichofizikinio eksperimento metu [IX].

Kuris vaizdas atrodo...	
1 šviesesnis	6 jaukesnis
2 ryškesnis	7 raminantis
3 spalvingesnis	8 prabangesnis
4 patrauklesnis	9 natūralus
5 vaizdingesnis	10 labiau patinka
Kurį apšvietimą rinktumėtės...	
11 biure	16 namuose
12 gamyklinėse patalpose	17 virtuvėje
13 prekybos ir pramogų centre	18 svetainėje
14 maisto prekių parduotuvėje	19 miegamajame
15 restorane	20 vonioje

### 3.3 Skyriaus apžvalga

Šiame skyriuje buvo nustatyta, kad teorinių SGS, pasižyminčių skirtingomis spalvų atgavos savybėmis, modifikuotos Gausinės komponentės pakankamai gerai aprašo realių  $Eu^{2+}$  fosforų FL



3.9 pav.: Psichofizikinio eksperimento rezultatai. Skaičiai  $x$  ašyje žymi klausimų, pateiktų 3.3 lentelėje, numerius, o skaičiai  $y$  ašyje žymi pasirinkimų vidurkius [IX].

juostas, todėl yra tinkamos naudoti KFŠ SGS optimizavimui. Remiantis tokių teorinių SGS optimizavimo rezultatais, naudojant realių fosforų FL spektrus, buvo sumodeliuoti KFŠ SGS pasižymintys skirtingomis spalvų atgavos savybėmis.

Atsižvelgiant į SGS, pasižyminčio pirmenybine spalvų atgava, optimizavimo ir modeliavimo rezultatus, sukonstruotas pirmenybinės spalvų atgavos KFŠ šviestuvo prototipas – PrefLED. Šis šviestuvai psichofizikinio eksperimento metu buvo lyginamas su įprastu, tos pačios SST halogeniniu šviestuvu. Eksperimento metu PrefLED prototipas buvo įvertintas kaip šviesesnis, ryškesnis, spalvingesnis ir patrauklesnis. Be to, jis buvo įvardijamas, kaip labiau tinkamas aktyvių aplinkų, tokių kaip biuras, gamyklinės patalpos ar laisvalaikio zonos, apšvietimui. PrefLED šviestuvai taip pat buvo pasirenkamas kaip tinkamesnis virtuvės, svetainės bei vonios kambario apšvietimui. Tuo tarpu halogeninis šviestuvai buvo įvardijamas kaip labiau raminantis ir natūralus, todėl buvo renkamas namų, ypač miegamojo apšvietimui.



# Išvados

Šio darbo metu buvo atliekama KFŠ, skirtų nišiniams taikymams spektrinė inžinerija. Pirmoje dalyje buvo nagrinėjama KFŠ taikymo galimybė šiltadaržiuose, antroje – fotofiziologiškai draugiškame gatvių apšvietime, o trečioje – bendrajame apšvietime pasižyminčiame įvairiomis spalvų atgavos savybėmis. Toliau pateikiamos visą darbą apibendrinančios išvados:

1. Papildomas legiravimas  $\text{Ce}^{3+}$  jonais gadolinio galio granatuose, legiruotuose  $\text{Cr}^{3+}$  jonais, stipriai gesina liuminescenciją, todėl yra nenaudingas KFŠ taikymams.
2. Zolių-gelių metodu susintetinti galio granatai, legiruoti  $\text{Cr}^{3+}$  jonais, pasižymi plačia FL juosta tolimoje raudonoje spektro srityje, sutampančia su augalo pigmento Pfr sugertimi, todėl yra tinkami KFŠ, skirtų augalininkystei, taikymams.
3. Tirtų fosforų FL intensyvumas ir kvantinė išeiga gali būti sėkmingai optimizuojamos keičiant  $\text{Cr}^{3+}$  koncentraciją bei bandinių iškaitinimo temperatūrą.
4. Temperatūriniai galio granatų matavimai parodė, kad iki 90 °C šiems fosforams nebūdingas temperatūrinis gesinimas, todėl jie yra tinkami KFŠ taikymams.
5. Zolių-gelių metodu susintetintas YGG, legiruotas 8 mol %  $\text{Cr}^{3+}$  ir iškaitintas 1400 °C, pasižymėjo aukščiausia kvan-

tinės išeigos verte lygia 46 %, todėl buvo panaudotas KFŠ tenkinančio augalų fotomorfogenezinius poreikius gamybai.

6. Modelinių bei realių liepsnos šviesos KFŠ SGS pasižymėjo pakankama mezopinio SAR verte, todėl yra tinkami gatvių apšvietimo taikymams mezopinėje srityje.
7. Modelinių bei realių liepsnos šviesos KFŠ prototipų SGS pasižymi mažesniu cirkadiniu poveikiu, negu įprasti šviesos diodai, todėl gali būti taikomi gatvių apšvietimui aplinkose, kuriose pageidautina sumažinta šviesos tarša bei fotobiologinis poveikis.
8. SGS, sudėtyje turintis silikatinio fosforo legiruoto  $\text{Eu}^{2+}$  FL komponentę pasižymi pakankamai aukšta SŠV ir SAR vertėmis bei mažu CPF, todėl iš tirtų fosforų yra labiausiai tinkami liepsnos šviesos KFŠ, pasižymintiems maža CPF verte.
9. SGS, pasižymintys skirtingomis spalvų atgavos savybėmis, sukomponuoti iš  $\text{Eu}^{2+}$  legiruotų fosforų FL juostų, atskleidė, kad KFŠ optimizavimo tikslais, fosforų FL smailės gali būti aproksimuojamos modifikuota Gauso forma.
10. Sukurtas PrefLED prototipas buvo patvirtintas psichofizikiniu eksperimentu ir pripažintas kaip šviesesnis, ryškesnis, spalvingesnis bei patrauklesnis, taip pat, kaip labiau tinkamas naudoti aktyviose erdvėse. Tuo tarpu halogeninis šviestuvai buvo apibūdinami kaip natūralus ir raminantis, bei labiau tinkamas ramiose aplinkose, ypač miegamajame.

# Literatūra

- [1] P. Mottier, *LEDs for Lighting Applications* (John Wiley & Sons, Inc, London, 2009).
- [2] A. Nardelli, E. Deuschle, L. D. de Azevedo, J. L. N. Pessoa, E. Ghisi, Assessment of light emitting diodes technology for general lighting: A critical review, *Renew. Sust. Energ. Rev.* **75**, 368 – 379 (2017).
- [3] A. Žukauskas, *Puslaidininkiniai Šviestukai* (Progretus, Vilnius, 2008).
- [4] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes* (Cambridge University Press, 2018), 3 edition.
- [5] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevičius, M. Shur, Rendering a color palette by light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett* **93**, 021109 (2008).
- [6] S. Ye, F. Xiao, Y. Pan, Y. Ma, Q. Zhang, Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties, *Mater. Sci. Eng. R* **71**, 1–34 (2010).
- [7] J. Zhang, R. Hu, X. Yu, B. Xie, X. Luo, Spectral optimization based simultaneously on color-rendering index and color quality scale for white led illumination, *Opt. Laser Technol.* **88**, 161 – 165 (2017).
- [8] W. A. Thornton, A validation of the color-preference index, *J. Illum. Eng. Soc.* **4**(1), 48–52 (1974).
- [9] A. Liu, A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, M. Shur, Cultural preferences to color quality of illumination

- of different artwork objects revealed by a color rendition engine, *IEEE Photonics J.* **5**(4), 6801010–6801010 (2013).
- [10] Y. Ohno, Color quality metrics—recent progress and future perspective, in *The 15th International Symposium of Science and Technology of Lighting* (2016).
- [11] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Petrušis, M. Shur, Color rendition engine, *Opt. Express* **20**, 5356–5367 (2012).
- [12] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. D. Rollag, Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor, *J. Neurosci.* **21**(16), 6405–6412 (2001).
- [13] K. Thapan, J. Arendt, D. J. Skene, An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, *J. Physiol.* **535**(1), 261–267 (2001).
- [14] S. Davis, D. K. Mirick, Circadian disruption, shift work and the risk of cancer: a summary of the evidence and studies in Seattle, *Cancer Causes Control* **17**(4), 539–545 (2006).
- [15] M. Hatori, C. Gronfier, R. N. Van Gelder, P. S. Bernstein, J. Carreras, S. Panda, F. Marks, D. Sliney, C. E. Hunt, T. Hirota, et al., Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies, *NPJ Aging Mech. Disease* **3**(1), 9 (2017).
- [16] <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/press-release/>.
- [17] D. Singh, C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, B. Roth, Leds for energy efficient greenhouse lighting, *Renew. Sust. Energy Rev.* **49**, 139 – 147 (2015).
- [18] N. Yeh, J. Chung, High-brightness LEDs - energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation, *Renew. Sust. Energy Rev.* **13**, 2175 (2003).



- [19] D. Despommier, Farming up the city: the rise of urban vertical farms, *Trends in biotechnology* **31**(7), 388–389 (2013).
- [20] P. Daukantas, Optics in agriculture, *Optics and Photonics News* **28**(11), 42–49 (2017).
- [21] S. Kim, E. Hahn, J. Heo, K. Paek, Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro, *Sci. Hort.* **101**, 143–151 (2004).
- [22] E. Taulavuori, K. Taulavuori, J. K. Holopainen, R. Julkunen-Tiitto, C. Acar, I. Dincer, Targeted use of LEDs in improvement of production efficiency through phytochemical enrichment, *J. Sci. Food Agric.* **97**(15), 5059–5064 (2017).
- [23] M. McDonald, *Photobiology of Higher Plants* (John Wiley & Sons Ltd, 2003).
- [24] G. Tamulaitis, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, K. Breivė, R. Ulinskaitė, A. Brazaitytė, A. Novičkovas, A. Žukauskas, High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation, *J. Phys D: Appl. Phys.* **38**, 3182–3187 (2005).
- [25] J. de Mello, H. Wittmann, R. Friend, An improved experimental determination of external photoluminescence quantum efficiency, *Adv. Mater* **9**(3), 230–232 (1997).
- [26] J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy* (Springer, Berlin, 2006).
- [27] K. Petermann, G. Huber, Broad band fluorescence of transition metal doped garnets and tungstates, *J. Lumines.* **31**, **32**, 71–77 (1984).
- [28] M. Seltzer, Interpretation of the emission spectra of trivalent chromium-doped garnet crystals using Tanabe-Sugano diagrams, *J. Chem. Educ.* **72**(10), 886–888 (1995).

- [29] B. Struve, G. Huber, The effect of the crystal field strength on the optical spectra of  $\text{Cr}^{3+}$  in gallium garnet laser crystals, *Appl. Phys. B* **36**, 195–201 (1985).
- [30] A. Katelnikovas, J. Jurkevičius, K. Kazlauskas, P. Vitta, T. Jüstel, A. Kareiva, A. Žukauskas, G. Tamulaitis, Efficient cerium-based sol–gel derived phosphors in different garnet matrices for light-emitting diodes, *J. Alloys Compd.* **509**(21), 6247 – 6251 (2011).
- [31] H. Orucu, G. Ozen, J. Collins, B. D. Bartolo, Temperature dependence of the luminescence spectra of garnet crystals doped with chromium ions, *Opt. Mater.* **31**(7), 1065 – 1070 (2009).
- [32] S. Healy, C. Donnelly, T. Glynn, G. Imbusch, G. Morgan, Temperature dependence of the luminescence of  $\text{GSGG}:\text{Cr}^{3+}$ , *J. Lumines.* **46**, 1–7 (1990).
- [33] R. Martín-Rodríguez, R. Valiente, F. Rodríguez, M. Bettinelli, Temperature and pressure dependence of the optical properties of  $\text{Cr}^{3+}$ -doped  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  nanoparticles, *Nanotechnology* **22**(26), 265707 (2011).
- [34] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, Optimization of solid-state lamps for photobiologically friendly mesopic lighting, *Appl. Optics* **51**(35), 8423–8432 (2012).
- [35] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames, O. B. Shchekin, P. J. Schmidt, H. Bechtel, C.-H. Chen, O. Steigelmann, All-nitride monochromatic amber-emitting phosphor-converted light-emitting diodes, *Phys. Status Solidi-R* **3**(7-8), 215–217 (2009).
- [36] X. Zhang, L. Liang, Q. Su, Luminescence properties of  $(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{S}:\text{Eu}^{2+}$  phosphors for white LEDs application, *Mater. Lett.* **59**, 749–753 (2005).
- [37] R. J. Xie, N. Hirosaki, K. Sakuma, Y. Yamamoto, M. Mitomo,  $\text{Eu}^{2+}$ -doped  $\text{Ca}-\alpha\text{-SiAlON}$ : a yellow phosphor for white

- light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **84**(26), 5404–5406 (2004).
- [38] H. Menkara, C. Summers, B. Wagner, Light-emitting device having thio-selenide fluorescent phosphor, US Patent 7,109,648 (2006).
- [39] A. Katelnikovas, T. Bareika, P. Vitta, T. Jüstel, H. Winkler, A. Kareiva, A. Žukauskas, G. Tamulaitis,  $Y_{3-x}Mg_2AlSi_2O_{12}:Ce_x^{3+}$  phosphors – prospective for warm-white light emitting diodes, *Opt. Mater.* **32**(9), 1261–1265 (2010).
- [40] National Electrical Manufacturers Association, *American National Standard for Electric Lamps – Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products*, ANSI C78.377-2008 (2008).
- [41] I. Reklaitis, T. Grinys, R. Tomašiūnas, T. Puodžiūnas, L. Mažulė, V. Sirutkaitis, C. Lin, C. Yang, A new geometrical approach for rapid LED processing by using femtosecond laser, *Opt. Laser. Eng.* **74**, 17 – 21 (2015).
- [42] H. F. Ivey, Color and efficiency of luminescent light sources, *J. Opt. Soc. Am.* **55**(5), 576–576 (1965).
- [43] A. A. Kruithof, Tubular luminescence lamps for general illumination, *Philips Tech. Rev.* **6**, 65–96 (1941).
- [44] A. Petrulis, L. Petkevičius, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, Exploring preferred correlated color temperature in outdoor environments using a smart solid-state light engine, *LEUKOS* **14**(2), 95–106 (2018).
- [45] R. Mueller-Mach, G. Mueller, M. Krames, T. Trottier, High-power phosphor converted light-emitting diodes based on III-nitrides, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **8**, 339–345 (2002).

- [46] W. Yen, M. Weber, *Inorganic Phosphors: Compositions, Preparation and Optical Properties* (CRC Press, Boca Raton, 2004).
- [47] Y. Hu, W. Zhuang, H. Ye, S. Zhang, Y. Fang, X. Huang, Preparation and luminescent properties of  $(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{S}:\text{Eu}^{2+}$  red-emitting phosphor for white LED, *J. Lumines.* **111**, 139–145 (2005).
- [48] T. Barry, Fluorescence of  $\text{Eu}^{2+}$ -activated phases of binary alkaline earth orthosilicate systems, *J. Electrochem. Soc.* **115**, 118–1184 (1968).
- [49] S. Liu, S. Cheng, Y. Li, Aluminum-silicate based orange-red phosphors with mixed divalent and trivalent cations, US Patent 7,648,650 (2010).
- [50] Y. Dong, N. Wang, S. Cheng, Y. Li, Aluminate based blue phosphors, US Patent 7,390,437 (2008).
- [51] M. Yamada, T. Naitou, K. Izuno, H. Tamaki, Y. Murazaki, M. Kameshima, T. Mukai, Red-enhanced white-light-emitting diode using a new red phosphor, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L20 (2003).
- [52] S. Liu, D. Tao, X. Yuan, Y. Li, Nitride based red-emitting phosphors, US Patent 8,274,215 (2012).
- [53] R. Mueller-Mach, G. Mueller, M. Krames, H. Höpfe, F. Stadler, W. Schnick, T. Juestel, P. Schmidt, Highly efficient all-nitride phosphor-converted white light-emitting diode, *Phys. Status Solidi A* **202**, 1727–1732 (2005).
- [54] F. Stadler, O. Oeckler, H. Höpfe, M. Möller, R. Pöttgen, B. Mosel, P. Schmidt, V. Duppel, A. Simon, W. Schnick, Crystal structure, physical properties and HRTEM investigation of the new oxonitridosilicate  $\text{EuSi}_2\text{O}_2\text{N}_2$ , *Chem. Eur. J.* **12**, 6984–6990 (2006).

- [55] V. Bachmann, C. Ronda, O. Oeckler, W. Schnick, A. Meijerink, Color pint tuning for  $(\text{Ca,Sr,Ba})\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$  for white LEDs, *Chem. Mater.* **21**, 316–325 (2009).
- [56] J. van Kreveld, J. van Rutten, H. Mandal, H. Hintzen, R. Metselaar, Luminescence properties of terbium-, cerium-, or europium-doped  $\alpha$ -sialon materials, *J. Solid State Chem.* **165**, 19–24 (2002).
- [57] N. Hirosaki, R. Xie, K. Kimoto, T. Sekiguchi, Y. Yamamoto, T. Suehiro, M. Mitomo, Characterization and properties of green-emitting  $\beta$ -SiAlON: $\text{Eu}^{2+}$  powder phosphors for white light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 211905 (2005).
- [58] K. Houser, S. Fotios, M. Royer, A test of the s/p ratio as a correlate for brightness perception using rapid-sequential and side-by-side experimental protocols, *Leukos* **6**(2), 119–137 (2009).

# Mokslinių straipsnių disertacijos tema sąrašas

- I A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Zabaliūtė, A. Petrulis, and M. Shur, Colour rendition engineering of phosphor-converted light-emitting diodes, *Opt. Express* **21**(22), 26642–26656 (2013).
- II A. Zabaliūtė, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, Phosphor converted LEDs with low circadian action for outdoor lighting, *Opt. Lett.* **39**(3), 563–566 (2014).
- III A. Zabaliūtė, S. Butkutė, A. Žukauskas, P. Vitta, A. Kareiva, Sol-gel synthesized far-red Cr-doped garnet phosphors for phosphor-conversion LEDs that meet the photomorphogenetic needs of plants, *Appl. Opt.* **53**(5), 907–914 (2014).
- IV S. Butkutė, A. Zabaliūtė, R. Skaudžius, P. Vitta, A. Beganškienė, A. Žukauskas, A. Kareiva, Sol-gel synthesis, characterization and study of substitution effects in different gallium-containing garnets, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* **76**(1), 210–219 (2015).
- V A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, R. P. Petrauskas, S. Butkutė, A. Žukauskas, A. Kareiva, Cr<sup>3+</sup> Doped Itrium and Gallium Garnet Phosphor for Phosphor-Conversion Light Emitting Diodes, *Lith. J. Phys.* **55**(3), 200–207 (2015).
- VI A. Zabaliūtė, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, “Fotobiologiškai draugiškas konversijos fosfore šviestukas”, Lietuvos respublikos patentas, Nr. 6215 (2015).

- VII A. Zabaliūtė, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, Photobiologically Friendly Phosphor Converted Light-Emitting Diode, PCT patentinė paraiška EP3060624 A1 (2016).
- VIII A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Zabaliūtė, A. Petrulis, Solid-state sources of light for preferential colour rendition, JAV patentas US9370072 B2, Europos patentas EP2962530 B1 (2016).
- IX A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, P. Vitta, A. Petrulis, A. Žukauskas, Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes of Preferential Color Properties, *Proceedings of 13th AIC Congress 2017* (Jeju, South Korea, 16th–20th, October, 2017) OS21. Konferencijos darbai.

## Mokslinių konferencijų disertacijos tema sąrašas

1. A. Zabaliūtė, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Petrulis, A. Žukauskas „Spektrinio galios skirstinio inžinerija konversijos fosfore šviestukuose, pasižymintčiuose įvairiomis spalvų atgavos savybėmis“, The fourth conference of young scientists „Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai“ (Vilnius, 2014 m. vasario 11 d.) p. 46. Žodinis pranešimas.
2. A. Zabaliūtė, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Petrulis, and, A. Žukauskas, „Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes with Advanced Color Rendition Properties“ Conference on LED and Its Industrial Application „LEDIA'14“, (Jokohama, Japonija, 2014 m. balandžio 22–24 d.) p. 24p-LEDp6-32.
3. A. Zabaliūtė, S. Butkutė, A. Žukauskas, P. Vitta, A. Kareiva, „Far-Red Cr-Doped Garnets for the Control of Photomorphogenesis in Plants Using Phosphor-Conversion LEDs“ Conference on LED and Its Industrial Application

„LEDIA'14“, (Jokohama, Japonija, 2014 m. balandžio 22–24 d.) p. 22p-LED2-2. Žodinis pranešimas.

4. A. Zabaliūtė, S. Butkutė, A. Žukauskas, P. Vitta, A. Kareiva, „Far-Red Cr-doped Garnet Phosphor-Conversion LEDs that Meet the Photomorphogenetic Needs of Plants“, 16th Int. Conf.-Scool „Advanced Materials and Technologies“ Book of Abstracts (Palanga, 2014 m. rugpjūčio 21–31 d.) p. 97. Geriausio žodinio pranešimo apdovanojimas.
5. H. Dapkus, A. Zabaliūtė-Karaliūnė, R. P. Petrauskas, S. Butkutė, A. Žukauskas, A. Kareiva, „Cr<sup>3+</sup> Doped Ytrium and Gallium Garnet Phosphor for Phosphor-Conversion Light Emitting Diodes“, 58th Scientific Conference for Young Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings“. Programme and Abstracts (Vilnius, 2015 m. kovo 24–27 d.) p. 228.
6. H. Dapkus, A. Zabaliūtė-Karaliūnė, P. Vitta, A. Žukauskas, „The Development and Characterization of Phosphor Converted LED Lamps for Niche Applications“, 18th Int. Conf.-Scool „Advanced Materials and Technologies“ Book of Abstracts (Palanga, 2016 m. rugpjūčio 27–31 d.) p. 82.
7. A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, P. Vitta, „Konversijos fosfore šviestukų, skirtų nišiniams taikymams, prototipavimas“, The conference for Ph.D. students and young researchers „FizTeCh“ (Vilnius, 2016 m. spalio 26–27 d.) Žodinis pranešimas, geriausio pranešimo apdovanojimas.
8. H. Dapkus, A. Zabaliūtė-Karaliūnė, P. Vitta, „Development and characterization of phosphor converted LED lamps for niche applications,“ 60th Scientific Conference for Young Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings“. Programme and Abstracts (Vilnius, 2017 m. kovo 14–17 d.) p. 72. Žodinis pranešimas.
9. A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, P. Vitta, A. Petruelis, A. Žukauskas, „The Design and Characterization of



Phosphor-Converted LED Luminary of Preferential Colour properties“, 19th Int. Conf.-School „Advanced Materials and Technologies“ Book of Abstracts (Palanga, 2017 m, rugpjūčio 27–31 d.) p. 81.

10. A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, P. Vitta, A. Petrulis, A. Žukauskas, „Pirmenybinėmis spalvinėmis savybėmis pasižyminčio konversijos fosfore šviestuko prototipavimas ir charakterizavimas“ The 42nd Lithuanian National Conference of Physics, Programme and abstracts book, (Vilnius, 2017 m. spalio 4–5 d.) p. S3-24.
11. A. Zabaliūtė-Karaliūnė, H. Dapkus, P. Vitta, A. Petrulis, A. Žukauskas, „Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes of Preferential Color Properties“, 13th AIC Congress „AIC 2017“ Book of Abstracts (Čedžu, Korėjos respublika, 2017 m. spalio 16–20 d.) p. 159. Žodinis pranešimas.



# Trumpos žinios apie autorę

<b>v. pavardė</b>	Akvilė Zabaliūtė-Karaliūnė
<b>g. data</b>	1989/01/18
<b>el. paštas</b>	akvile.zabaliute@tmi.vu.lt
<b>Išsilavinimas</b>	
nuo 2013	<b>doktorantūra 08T</b> , Fizikos fakultetas, Vilniaus universitetas, Vilnius
2011–2013	<b>magistrantūra, cum laude 08T</b> , Fizikos fakultetas, Vilniaus universitetas, Vilnius
2007–2001	<b>bakalauro studijos, 02P</b> , Fizikos fakultetas, Vilniaus universitetas, Vilnius
2003–2007	<b>vidurinis išsilavinimas</b> , Žemynos gimnazija, Vilnius
1995–2003	<b>pagrindinis išsilavinimas</b> , S. Stanevičiaus vid. mokykla, Vilnius
<b>Darbo patirtis</b>	
2011–2017	<b>inžinierė</b> , Taikomųjų mokslų institutas, Vilniaus universitetas
nuo 2017	<b>j.m.d.</b> Fotonikos ir nanotechnologijų institutas, Vilniaus universitetas
<b>Apdovanojimai</b>	
2014	geriausio stendinio pranešimo apdovanojimas <i>16<sup>th</sup> International conference-school: Advanced Materials and Technologies</i>
2016	geriausias žodinis pranešimas jaunųjų mokslininkų ir doktorantų konferencijoje <i>FizTech</i>
<b>Kita</b>	
kalbos	lietuvių (gimt.), anglų (puikiai), švedų ir norvegų (pgr.)
šeima	ištekėjusi, 1 vaikas
pomėgiai	muzika, kendo, literatūra, kinas

Vilniaus universiteto leidykla  
Universiteto g. 1, LT-01513 Vilnius  
El. p. [info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt),  
[www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)  
Tiražas 25 egz.