

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

ARŪNAS TUZIKAS

KIETAKŪNIO APŠVIETIMO SU VALDOMOMIS SPALVŲ PERTEIKIMO,
ERDVINĖMIS, FOTOCHEMINĖMIS IR FOTOBIOLOGINĖMIS SAVYBĖMIS
NIŠINIAI TAIKYMAI

Daktaro disertacijos santrauka
Medžiagų inžinerija (08T)

Vilnius, 2014

Disertacija rengta 2010-2014 metais Vilniaus universiteto Puslaidininkių fizikos katedroje ir Taikomųjų mokslų institute.

Mokslinis vadovas:

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

Konsultantas:

Prof. dr. Rimantas Vaicekauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto medžiagų inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

prof. habil. dr. Romanas Martavičius (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

prof. dr. Sérgio Miguel Cardoso Nascimento (Minho universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

dr. Gediminas Račiukaitis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);

doc. dr. Mikas Vengris (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2014 m. rugsėjo mėn. 5 d. 15 val. Nacionaliniame atviros prieigos mokslinės komunikacijos ir informacijos centre, A119 salėje. Adresas: Saulėtekio al. 5, LT-10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2014 m. liepos ... d.

Disertacija galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY
CENTRE FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

ARŪNAS TUZIKAS

NICHE APPLICATIONS OF SOLID-STATE LIGHTING WITH
CONTROLLABLE COLOUR-RENDITION, SPATIAL, PHOTOCHEMICAL,
AND PHOTOBIOLOGICAL PROPERTIES

Summary of doctoral dissertation
Materials science (08T)

Vilnius, 2014

The research work has been carried out in 2010-2014 at the Semiconductor Physics Department and the Institute of Applied Research, Vilnius University.

Scientific supervisor:

Prof. habil. dr. Artūras Žukauskas (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Science – 08T).

Consultant:

Prof. dr. Rimantas Vaicekauskas (Vilnius University, Physical Sciences, Computer Science – 09P).

Council of defence of the doctoral thesis on Materials Science at Vilnius University:

Chairman:

prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Centre for Physical Science and Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

Members:

prof. habil. dr. Romanas Martavičius (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electronics Engineering – 01T);

prof. dr. Sérgio Miguel Cardoso Nascimento (Minho University, Physical Sciences, Physics - 02P);

dr. Gediminas Račiukaitis (Centre for Physical Science and Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T);

doc. dr. Mikas Vengris (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended under open consideration in the Council of Materials Science on the 5th of September, 2014, 3 p. m. at the National Open Access Scholarly Communication and Information Centre, room A119. Address: Saulėtekio ave. 5, LT-10222, Vilnius, Lithuania.

The Summary of the dissertation has been distributed on the ... of July, 2014.

The dissertation is available at Vilnius University library and at the library of Centre for Physical Sciences and Technology.

Padėka

Norėčiau padėkoti darbo vadovui prof. Artūriui Žukauskui už įkvėpimą ir kūrybingą vadovavimą studijų metu.

Norėčiau išreikšti nuoširdžią padėką prof. Michael Shur už galimybę atlikti savo tyrimus stažuotėse Rensselaerio politechnikos institute.

Dėkoju konsultantui prof. Rimantui Vaicekuskui bei kolegai dr. Pranciškui Vitta už vertingas diskusijas ir pastabas, bei visiems draugams ir kolegoms už pagalbą.

Atskirai norėčiau padėkoti publikacijų bendraautoriams už gerą komandinį darbą bei tarpdalykinį bendradarbiavimą vykdant tyrimus ir ruošiant publikacijas.

Nuoširdžiai dėkoju savo tėvams, žmonai ir dukrytei už rūpestingumą ir palaikymą.

Tyrimai buvo iš dalies finansuoti Lietuvos mokslo tarybos bei JAV Nacionalinio mokslo fondo vykdant Inžinerijos mokslinių tyrimų centro programą.

Įvadas

Nors šviesos diodo (toliau šviestuko) atsiradimo istorija siekia 1907 metus, kai Henry Joseph Round žurnale *Electrical World* aprašė silicio karbido kristalo švytėjimą [1] kuris, kaip išaiškėjo vėliau, buvo sąlygotas injekcinės elektroliuminescencijos, tačiau tik pastarąjį dešimtmetį šviestukų taikymai bendrojo ar specializuoto apšvietimo srityse įgavo didelį mastą. Dėl didelio efektyvumo bei mažų matmenų šiandien jie tapo nepakeičiami vaizduoklių gamyboje (tiek mobiliuosiuose įrenginiuose, tiek kompiuterių monitoriuose bei televizoriuose) ir ima vyrauti tokiose taikymuose kaip biuro, gyvenamųjų gamybinių ir sandėliavimo patalpų, prekių, reklaminis, architektūrinis bei lauko apšvietimas. Nepaisant naujų galimybių, kurias teikia kietakūnė technologija, daugelyje nišinių taikymų sričių, tokių kaip dailės kūrinių apšvietimas ar gatvių apšvietimas, kol kas ne visos jos yra panaudojamos dėl sunkumų, susijusių su spektrinės galios skirstinio parinkimu bei optimizavimu pagal konkrečius apšvietimo kokybei keliamus reikalavimus ar apšvietimo erdvinio skirstinio parinkimu, užtikrinančiu geriausią balansą tarp elektros energijos taupymo ir tokių subjektyvių įverčių kaip pėsčiojo saugumo jausmas gatvėje.

Darbo tikslas:

Šis darbas yra skirtas ištirti kietakūnio apšvietimo su valdomomis spalvų perteikimo, erdvinėmis, fotocheminėmis ir fotobiologinėmis savybėmis galimus nišinius taikymus. Kaip nišinių taikymų pavyzdžiai, kuriuose ryškiausiai atsiskleidžia valdomo apšvietimo privalumai, buvo pasirinkti dailės kūrinių apšvietimas ir gatvių (lauko) apšvietimas.

Sprendžiami uždaviniai:

- Naudojant derinamo spektrinės galios skirstinio kietakūnį šviesos šaltinį, validuoti statistinę spalvų perteikimo vertinimo metriką.
- Ištirti skirtingų kultūrinių grupių pirmenybinius spalvų perteikimo pasirinkimus apšviečiant dailės kūrinius, turinčius skirtingą žinomumo lygį tyrime dalyvavusiems subjektams.
- Derinant kokybinius apšvietimo parametrus, tokius kaip susietoji spalvinė temperatūra (SST), spalvų sodrinimo gylis ir spalvinio taško nuokrypis nuo Planko lanko, įvertinti valdomo fotocheminio poveikio įtaką apšviečiamų dailės kūrinių regimajai išraiškai.

- Nustatyti pagrindinius subjektyvius faktorius, kuriais galima įvertinti išmaniąsias gatvių apšvietimo sistemas bei optimizuoti pėsčiųjų zonos apšvietos skirstinį vienoje iš gatvių.
- Pagrįsti mažo cirkadinio poveikio šviesos šaltinio su optimizuotu spektrinės galios skirstiniu naudojimą įvertinant fotobiologines ir šviesos taršos savybes bei ištirti reakcijos trukmę, skaisčio kontrasto aptikimo slenkstį ir spalvų diskriminavimą, esant mezopinėms apšvietimo sąlygoms.

Darbo mokslinis naujumas

Naudojant statistinę spalvų perteikimo įverčio metriką buvo nustatytos tokių žinomų objektų kaip vaisiai ir daržovės pirmenybinės apšvietimo spalvinės kokybės sąlygos.

Atsižvelgiant į spalvų perteikimo kokybę buvo ištirtas palankiausias apšvietimas, skirtingų kultūrinių grupių stebėtojams apšviečiant dailės kūrinius, pasižyminčius skirtingu turinio žinomumo lygiu.

Pasiūlytas fotocheminio poveikio apšviečiamiems paviršiams valdymo algoritmas, keičiantis apšvietimo spalvinės kokybės parametrus ir įvertinta tokio valdymo įtaka apšviečiamų dailės kūrinių regimajai išraiškai.

Naudojant išmaniąją gatvės apšvietimo instaliaciją nustatytas optimalus apšvietos skirstinys ir įvertinti faktoriai, turintys didžiausią įtaką tokio apšvietos skirstinio subjektyviam pasirinkimui.

Pasiūlytas mažo cirkadinio poveikio „liepsnos šviesos“ kietakūnis šviesos šaltinis ir įvertintos tokio šaltinio fotometrinės, kolorimetrinės, spalvų perteikimo, fotobiologinės, šviesinės taršos ir psichofizinės savybės.

Ginamieji teiginiai

- Išmanusis spalvų perteikimo variklis, pasižymintis tolydžiu keturspalvio spektrinės galios skirstinio (SGS) derinimu, gali būti naudojamas statistinei spalvų perteikimo metrikai validuoti, subjektyviai išskiriant apšvietimo sąlygas, pasižyminčias aukštu spalvų perteikimo tikslumu, padidinta ar sumažinta apšviečiamų paviršių spalvų sodrinimo geba bei subjektyviai pirmenybine spalvine kokybe.

- SST ir spalvų perteikimo kokybė, kuriai teikiama subjektyvi pirmenybė apšviečiant dailės kūrinius spalvų perteikimo varikliu, priklauso tiek nuo dailės kūrinio turinio, tiek nuo stebėtojo kultūrinės kilmės.
- Į išmanųjį spalvų perteikimo variklį įdiegta temdymo funkcija, leidžianti palaikyti fiksuotą fotocheminį poveikį apšviečiamiems paviršiams keičiantis generuojamos šviesos spalviui ir spalvų perteikimo savybėms, lemia ženklų apšviečiamų dailės kūrinių regimosios išraiškos kitimą.
- Svarbiausias faktorius, turintis įtaką apšvietos skirstinio subjektyviam pasirinkimui pėsčiųjų zonoje su išmanaus apšvietimo instaliacija, yra susijęs su geros savijautos pojūčiu, o mažiau svarbus faktorius – su aplinkos fizinėmis savybėmis. Pirmojo faktoriaus svoris labiausiai priklauso nuo arčiausiai stebėtojo esančio šviestuvo šviesinio srauto, kai tuo tarpu toliau nuo stebėtojo esančių šviestuvų srautas yra mažiau svarbus.
- Kietakūnio lauko apšvietimo energijos taupymo ir eksploatacinių savybių balansas gali būti realizuotas naudojant itin žemos SST (1800-1900 K) mėlynai gintarinius („liepsnos šviesos“) kietakūnius šviesos šaltinius, kurie pasižymi priimtiniu fotobiologiniu poveikiu, šviesine tarša bei psichofiziniu funkcionalumu, esant mezopinėmis apšvietimo sąlygomis.

Disertacijos santrauka

2. Spalvų perteikimo valdymas

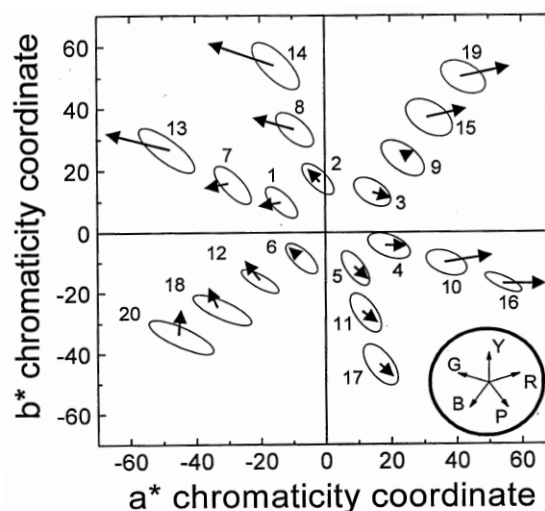
Šiame skyriuje aptariamos esami apšvietimo spalvinės kokybės vertinimo metodai bei išsamiai aprašoma statistinė spalvų perteikimo vertinimo metrika, kuria remiamasi vykdant tolimesnius šios disertacijos tyrimus, taip pat pristatomas spalvų perteikimo variklis, leidžiantis validuoti minėtąją metriką.

2.1. Statistinė spalvų perteikimo vertinimo metrika

Statistinė spalvų perteikimo kokybės metrika [2] grindžiama 1269 Munsello paletės spalvinių bandinių spalvos poslinkio vektorių, atsirandančių etaloninį šviesos šaltinį (juodąjį kūną ar dienos fazės šviesmenį) pakeitus testuojamu, analize ir remiasi keletu naujų principų:

- Visi spalvos poslinkio vektoriai yra surūšiuojami pagal spalvų perteikimo savybes priskiriant juos konkreitiems įverčiams (rodikliams).
- Spalvos poslinkio vektorių analizė nepriklauso nuo spalvų erdvės.
- Testuojamų šviesos šaltinių įverčiai išreiškiami vartotojui lengvai suprantamu formatu ir gali būti naudojami kuriant (optimizuojant) šviesos šaltinius pasižyminčius konkrečiomis spalvų perteikimo savybėmis.

Jei spalvų poslinkio vektoriaus ilgis neviršija interpoliuotos trijų žingsnių MacAdam'o elipsės [3] (2.1 pav. – 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11 ir 17 bandiniai), laikoma, kad bandinio spalva nesiskiria nuo apšviesto etaloniniu šaltiniu [4], šis bandinys priskiriamas tiksliai perteikiamiems ir įskaitomas į spalvų tikslumo rodiklį (CFI). Jei vektorius peržengia minėto dydžio elipsę į didesnio sodrio pusę (2.1 pav. – 8, 10, 13, 14, 15, 16 ir 19 bandiniai), laikoma, kad toks bandinys perteikiamas su didesniu sodriu ir įskaitomas į spalvų sodrinimo rodiklį (CSI). Priešingu atveju, kai spalvos poslinkio vektorius yra nukreiptas link balto taško, esančio diagramos centre (2.1 pav. – 12, 18 ir 20 bandiniai), laikoma, kad spalva perteikiama su sumažintu sodriu ir toks bandinys yra



2.1 pav. Spalvių diagrama su 20-čia spalvinių bandinių, apibrėžtų elipsinėmis sritimis. Spalvos, esančios elipsės apibrėžtoje srityje vizualiai nesiskiria nuo spalvos, esančios elipsės centre. Intarpas parodo penkis spalvų kryptis (raudona, geltona, žalia, mėlyna ir purpurinė) [P7].

įskaitomas į spalvų blukinimo rodiklį (CDI). Taip pat vertinami ir kiti atvejai, kuomet iškraipomas spalvos tonas bei spalvų šviesis pakinta daugiau nei 2% etaloninio šaltinio atžvilgiu. Įvertinus kiekvieną spalvinį bandinį, jie surūšiuojami pagal atitinkamus spalvos pokyčius ir iš jų kiekių išvedami procentiniai spalvų perteikimo rodikliai.

Psichofizinis statistinės spalvų perteikimo metrikos validavimas yra keblus dėl neapibrėžtai didelio kietakūnių šviesos šaltinių SGS skaičiaus. Subjektyvus greta esančių spalvinių bandinių palyginimas naudojant didelį skaičių šviesos šaltinių yra sunkiai realizuojamas techniškai bei vargina tyrime dalyvaujančius subjektus. Kita problema – tai metodologijos, galinčios optimizuoti šviesos šaltinius kaip subjektyviai pirmenybinius, stoka.

Šiame skyriuje pristatoma tolydžiai derinamomis spalvų perteikimo savybėmis pasižymintio šviesos šaltinio koncepcija, leidžianti psichofiziškai validuoti visas spalvų perteikimo metrikas, tarp jų ir statistinę.

2.2. Spalvų perteikimo variklis

Spalvų perteikimo inžinerijos koncepcija remiasi jautria apšviečiamų objektų spalvinių iškraipymų priklausomybe nuo šviesos spektrinės sudėties geltonojoje (530-610 nm) ir raudonoje (>610 nm) srityse. Spalvos poslinkio vektorių statistinė analizė atskleidė, kad šviesos šaltiniai, kurių spektrinėje sudėtyje yra smailės tiek geltonojoje, tiek raudonoje srityse, pasižymi mažu spalvų iškraipymu ir yra charakterizuojami kaip tiksliai perteikiantys apšviečiamų paviršių spalvas. Šviesos šaltiniai, SGS stokojantys geltonos spinduliuotės, pasižymi spalvų sodrinimo geba, o stokojantys raudonos spinduliuotės – spalvų blukinimo geba. Paprasčiausiai tokia koncepcija įgyvendinama, naudojant keturspalvį raudono (R), gintarinio (A), žalio (G) ir mėlyno (B) šviestukų telkinį. Baltos spalvos generavimas konkrečiu keturių pirminių spinduolių rinkiniu, panaudojant tris spalvų maišymo lygtys [4], leidžia realizuoti pasirinkto spalvio baltą šviesą, turint vieną laisvės laipsnį, kuris išreiškiamas kaip svertinės trispalvių RGB ir AGB šviestukų telkinių SGS sumos parametras. Keičiant trispalvių RGB ir AGB telkinių svorį keturspalviame SGS, galima gauti norimo spalvio baltą šviesą su begaliniu skaičiumi metamerinių SGS, pasižymintį skirtingomis spalvų perteikimo savybėmis:

$$S_{RAGB}(\lambda) = \sigma S_{AGB}(\lambda) + (1 - \sigma) S_{RGB}(\lambda) \quad (1)$$

Svertinės sumos parametro (svorio koeficiento) σ kitimo ribos yra intervale [0; 1].

Valdomo RAGB šviesos šaltinio prototipas buvo realizuotas naudojant bendrovės Philips Lumileds Lighting Luxeon® Rebel šeimos tiesioginės emisijos InGaN giliai mėlyną (smailės bangos ilgis ties 452 nm) ir žalią (523 nm), InGaN pagrindu veikiančią konversijos fosfore gintarinį (589 nm) ir tiesioginės emisijos AlGaInP raudoną (637 nm) šviestukus. Preciziniam šviestukų grupių dalinių spindulinių srautų valdymui buvo panaudota 10 skilčių impulsų pločio moduliacijos elektroniniai valdikliai, valdomi kompiuterio. Valdymo programinė įranga leido nustatyti norimą SST, bei tolygiai perrinkti metamerinius SGS, keičiant svorio koeficiento vertę visame derinimo intervale. 2.2 paveiksle pavaizduota eksperimentinė instaliacija (šviesdežė), kurios viršuje įtaisytas RAGB šviesos šaltinis, užtikrinantis 700 lx apšvietą. Šviesdežės padaryta iš pilko matinio plastiko, o jos matmenys 46 x 46 x 46 cm.

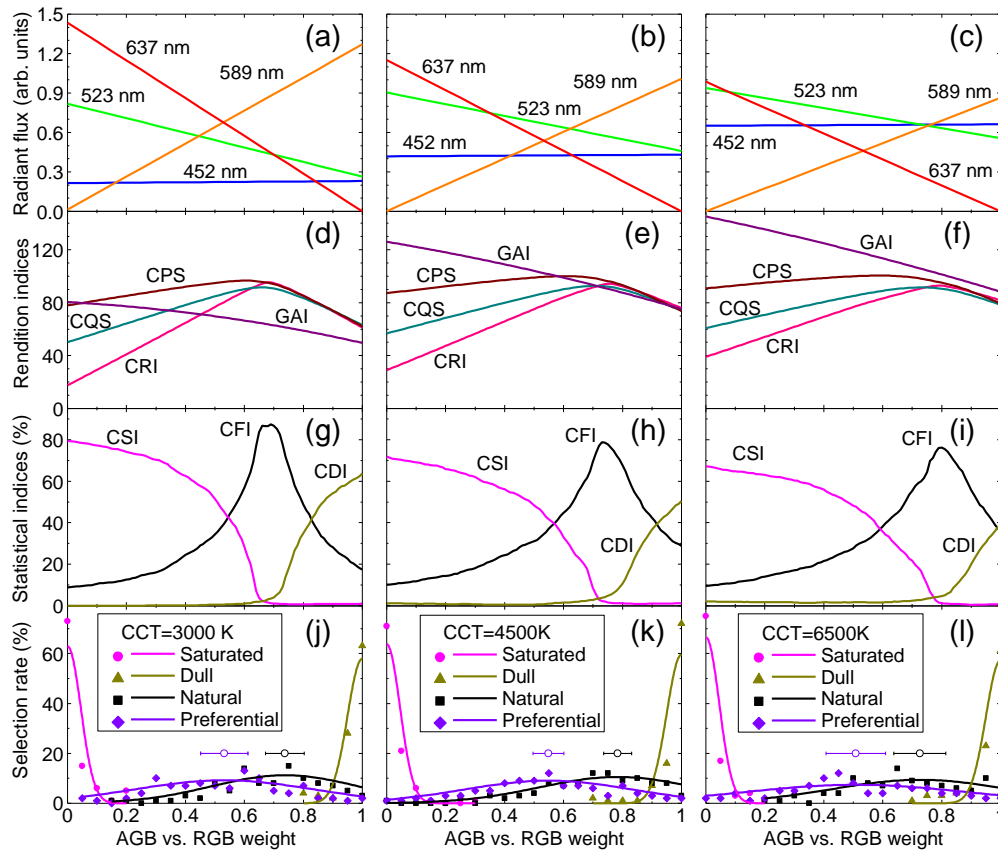


2.2 pav. Eksperimentinė instaliacija su derinamu RAGB šviesos šaltiniu viršuje ir viduje esančiais apšviečiamais objektais [P5].

Pasinaudojant 2.2 pav. pavaizduota instaliacija buvo tirti subjektyvūs įvairios spalvinės kokybės apšvietimo pasirinkimai. Tyrime dalyvavo 100 normalią regą turinčių subjektų: 41 moteris ir 59 vyrai. Jauniausiam tyrimo dalyviui buvo 14 metų, vyriausiam – 78 metai (amžiaus vidurkis – 27 metai). Tyrimo metu subjektai žiūrėjo į gerai žinomų objektų rinkinį, kurį sudarė vaisiai ir daržovės (žalias salotos lapas, pomidoras, bananas, citrina, žalsvos vynuogės, nektarinas ir apelsinas) ir žinomų prekės ženklų gėrimų skardinės (Coca-Cola®, Sprite® ir Pepsi®) (2.2 pav.). Subjektų buvo prašoma keičiant svorio koeficiento vertę pasirinkti apšvietimą, kurį jie galėtų apibūdinti kaip „labiausiai sodrinantį“, „labiausiai blukinantį“, „natūralų“ ir „pirmenybinį“, esant 3000 K, 4500 K ir 6500 K SST. Šviestuvo valdymas buvo realizuotas naudojant standartinės kompiuterio klaviatūros krypties klavišus. Tyrimo rezultatai pateikti 2.3 pav.

2.3 paveikslo (a), (b) ir (c) dalys vaizduoja šviestukų dalinių srautų kitimą kintant svorio koeficiento σ vertei, esant trims fiksuotoms SST vertėms, atitinkamai 3000 K, 4500 K ir 6500 K. Iš (1) lygties seka, kad gintarinės komponentės srautas tiesiškai didėja nuo 0 iki maksimalios vertės, didėjant σ vertei nuo 0 iki 1, o raudonos komponentės srautas

atitinkamai mažėja nuo maksimalios vertės iki 0. Tuo tarpu žalios ir mėlynos komponentių srautai kinta silpniau.



2.3 pav. Subjektyvių įvairios spalvinės kokybės apšvietimo pasirinkimų tyrimų rezultatai esant 3000 K (pirmas stulpelis), 4500 K (antras stulpelis) ir 6500 K (trečias stulpelis) SST [P5].

2.3 paveikslo (d), (e) ir (f) dalys vaizduoja dažniausiai naudojamų apšvietimo kokybės įverčių – bendrojo spalvų atgavos rodiklio (CRI) [5], spalvių aprėpties rodiklio (GAI) [6], bendrosios spalvinės kokybės skalės (CQS) [7] bei pirmenybinės spalvų skalės (CPS) [6] priklausomybes nuo svorio koeficiento vertės. 2.3 paveikslo (g), (h) ir (i) dalys vaizduoja statistinių rodiklių priklausomybes nuo svorio koeficiento vertės, o (j), (k), (l) dalys – tyrimo dalyvių subjektyvių pasirinkimų procentinio skaičiaus priklausomybę nuo svorio koeficiento, pasirenkant apšvietimą kaip „labiausiai sodrinantį“, „labiausiai blukinantį“, „natūralų“ ir „pirmenybinį“. Apibendrinat tyrimo rezultatus galima teigti, kad:

- labiausiai spalvas iškraipiančio apšvietimo, tai yra „labiausiai sodrinančio“ ir „labiausiai blukinančio“, subjektyvus identifikavimas koreliuoja atitinkamai su CSI ir CDI statistiniais rodikliais, kurie įgyja maksimalias vertes svorio koeficiento vertei esant atitinkamai ties 0 (šviečia tik RGB telkinio dalis) ir ties 1 (šviečia tik AGB telkinio dalis).

- Pasirinkimų Gauso skirstiniai, gauti tyrimų dalyviams identifikuojant „natūralų“ ir „pirmenybinį“ apšvietimą, yra labai platūs.
- Vidutinis AGB ir RGB svartinės sumos parametras, atitinkantis subjektyviai pasirinktą „natūralų“ apšvietimą (0.74 ± 0.07 , 0.78 ± 0.05 , ir 0.73 ± 0.09 atitinkamai esant 3000 K, 4500 K ir 6500 K SST) 95% patikimumo intervale, sutampa su didžiausiu CFI įverčiu (atitinkamai 0.69, 0.73 ir 0.80).
- Vidutinis AGB ir RGB svartinės sumos parametras, atitinkantis subjektyviai pasirinktą „pirmenybinį“ apšvietimą (0.53 ± 0.08 , 0.55 ± 0.05 , ir 0.51 ± 0.1 atitinkamai esant 3000 K, 4500 K ir 6500 K SST), yra per maždaug 0.22 paslinktas į sodrinančio apšvietimo pusę „natūralaus“ apšvietimo atžvilgiu.

Atliktas tyrimas naudojant tolydžiai derinamą RAGB šviesos šaltinį leido validuoti statistinę apšvietimo kokybės vertinimo metriką.

3. Dailės kūrinių apšvietimas naudojant spalvų perteikimo variklį

Trečiajame skyriuje apžvelgiami dailės kūrinių apšvietimo reikalavimai bei pristatomi spalvų perteikimo variklio pritaikymo dailės kūrinių apšvietimui pagal du kriterijus tyrimai: a) įvertinant apšvietimo spalvinei kokybei teikiamos subjektyvios pirmenybės priklausomybę nuo dailės kūrinio turinio ir žiūrovų kultūrinės kilmės; b) parodant regimosios išraiškos pokytį, atsirandantį dėl apšvietos lygio kitimo, kuomet fiksuojama apšvietimo fotocheminė įtaka apšviečiantiems paviršiams, kintant kokybiniams apšvietimo parametrams.

3.1. Žiūrovų kultūrinės kilmės įtaka dailės kūrinių pirmenybiniam apšvietimui

Panaudojant 2 skyriuje aprašytą spalvų perteikimo variklį buvo atlikti apšvietimo spalvinei kokybei teikiamos pirmenybės įverčiai apklausus dviejų skirtingų kultūrinių grupių atstovus. Tyrime dalyvavo 205 normalią regą turintys dalyviai, kurių didžioji dalis sudarė Rensselaerio Politechnikos Instituto (Troja, Niujorko valstija, JAV) studentai bei darbuotojai. 101 jų buvo neseniai atvykę iš Kinijos Liaudies Respublikos, o 104 – ilgiau gyvenantys Jungtinėse Amerikos Valstijose (3.1 lentelė).

Tyrimo pristatymas bei užduotys dalyviams buvo pateikiamos kinų kalba – kinams bei anglų kalba – amerikiečiams. Buvo atlikti du tyrimai. Pirmame tyrime buvo apšviečiami abiejų kultūrų atstovams gerai pažystami objektai, aprašyti 2 skyriuje – vaisiai ir daržovės.

Antrame tyrime buvo apšviečiami trys paveikslai, kurių turinio interpretavimo galimybė skirtingų kultūrinių grupių atstovams buvo nevienoda (3.1 pav.).

3.1 lentelė. Tyrimo dalyvių skaičius ir charakteristikos [P10].

Kultūrinė kilmė	Vyrai	Moterys	Suma	Amžiaus intervalas (vidurkis)
Amerikiečiai	79	25	104	18-32 (23)
Kinai	77	24	101	19-33 (22)
Viso	156	49	205	18-33 (22)



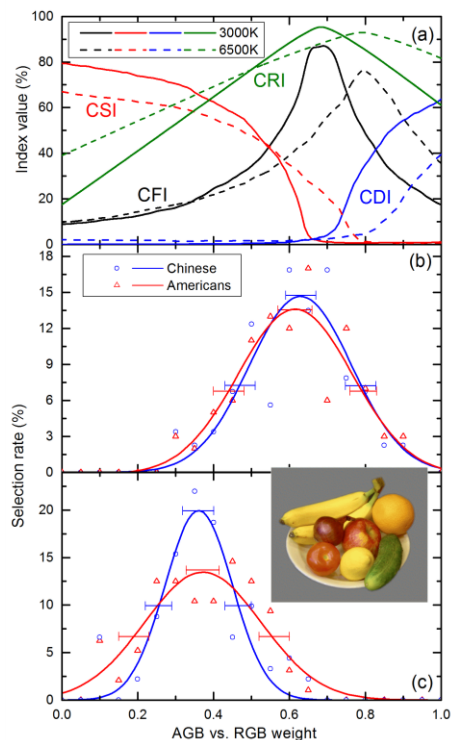
3.1 pav. Trijų tyrime naudotų paveikslų vaizdai: Ugnies tema (I), Šventasis Jurgis nugalį drakoną (II), Vilniaus senamiestis (III) [P10].

Pirmasis paveikslas (3.1 pav. (I); nežinomas autorius) nutapytas akrilinais dažais ant drobės ir vaizduoja spalvingą ugnies temą. Pastarasis motyvas yra aiškus abiejų kultūrinių grupių atstovams. Antrasis paveikslas (3.1 pav. (II); nežinomas autorius), nupieštas ant kartono ir vaizduoja Šventąjį Jurgį, nugalintį drakoną. Ši kūrinio tema labiau žinoma krikščioniškosios ar daugiakultūrės grupės atstovams, tokiems kaip amerikiečiai, nei kinams. Trečiasis dailės kūrinys (3.1 pav. (III); autorius E. Kuokštis) tapytas akvarele ir vaizduoja Vilniaus senamiesčio vaizdą. Dėl postimpresionistinio dailės kūrinio stiliaus ir vaizduojamos vietovės, kurioje nė vienas tyrimo dalyvis nebuvo lankęsis, galima spėti, kad pastarojo kūrinio tematika buvo vienodai nežinoma abiem tiriamoms kultūrinėms grupėms.

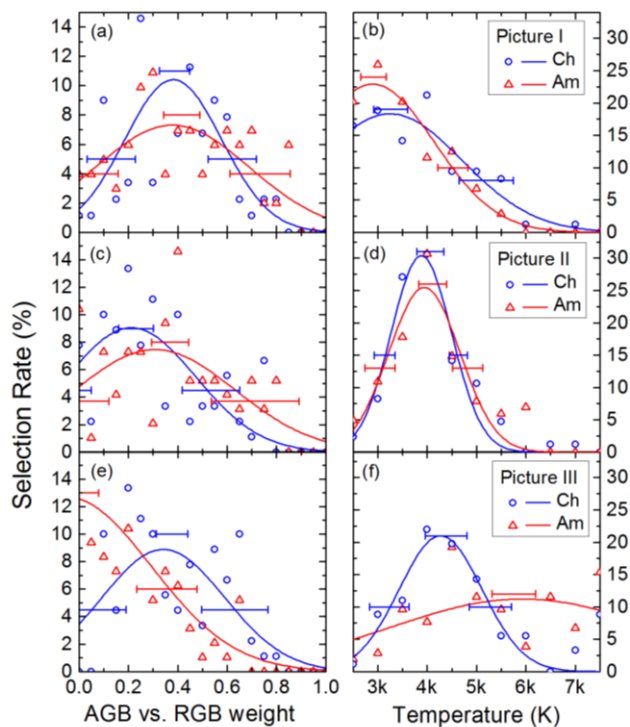
Tyrimo dalyvių buvo prašoma keičiant spalvų atgavos variklio AGB ir RGB telkinių svorio koeficientą rasti apšvietimo sąlygas kai apšviečiamų gerai žinomų objektų spalva gali būti apibūdinami kaip „natūrali“ ir „pirmenybinė“ esant fiksuotai 3000 K spalvinės temperatūros vertei (pirmasis tyrimas) bei keičiant SST ir svorio koeficientą rasti pirmenybines skirtingų dailės kūrinių apšvietimo sąlygas (antrasis tyrimas).

3.2 paveiksle pavaizduoti pirmojo tyrimo rezultatai. 3.2 (a) paveikslas vaizduoja statistinių spalvų perteikimo rodiklių bei bendrojo spalvų atgavos rodiklio (CRI) priklausomybes nuo AGB ir RGB svertinės sumos parametro esant 3000 K ir 6500 K

spalvinėms temperatūroms. 3.2 (b) paveikslas vaizduoja tyrimo dalyvių pasirinkimų skaičiaus Gauso skirstinius identifikuojant aukščiausią spalvų perteikimo tikslumą. 3.2 (c) paveikslas vaizduoja tyrimo dalyvių pasirinkimų Gauso skirstinius identifikuojant pirmenybinį apšvietimą.



3.2 pav. Pirmenybinio apšvietimo pasirinkimo apšviečiant gerai pažystamus objektus, tyrimo rezultatai [P10].



3.3 pav. Pirmenybinio apšvietimo pasirinkimo, apšviečiant 3.1 pav. pavaizduotus dailės kūrinius, tyrimo rezultatai: (a) ir (b) – apšviečiant pirmąjį paveikslą; (c) ir (d) – antrąjį; (e) ir (f) – trečiąjį [P10].

3.3 paveikslas vaizduoja pageidaujamo apšvietimo, apšviečiant 3.1 pav. pavaizduotus dailės kūrinius, tyrimo rezultatus.

3.2 lentelėje apibendrinama abiejų tyrimų rezultatų informacija.

3.2 lentelė. Pasirinkimų kiekio Gauso skirstinių smailės padėtys bei pločiai (FWHM) apšviečiant vaisius ir daržovės bei dailės kūrinius [P10].

Objektai, užduotis	amerikiečiai			kinai		
	SST (K)	AGB/RGB		SST (K)	AGB/RGB	
		σ_p	FWHM		σ_p	FWHM
Vaisiai, daržovės, „natūralus“	3000	0,63±0,04	0,35±0,07	3000	0,64±0,04	0,33±0,07
Vaisiai, daržovės, „pirmenybinis“	3000	0,37±0,04	0,37±0,07	3000	0,36±0,04	0,21±0,07
I paveikslas, „pirmenybinis“	2900±260	0,38±0,07	0,78±0,14	3250±370	0,39±0,06	0,46±0,08
II paveikslas, „pirmenybinis“	3920±280	0,31±0,07	0,85±0,23	3900±280	0,21±0,08	0,47±0,15
III paveikslas, „pirmenybinis“	5950±460	0,00±0,07	1,29±1,09	4260±430	0,35±0,07	0,59±0,11

Vertinant tyrimo rezultatus galima teigti, kad:

- apšviečiant abiejų kultūrinių grupių atstovams gerai žinomus objektus, pasirinkto apšvietimo, „natūraliausiai“ perteikiančio apšviečiamų objektų spalvas, pasirinkimų skirstinys (tiek plotis, tiek smailės padėtis) sutapo, o skirstinio smailės padėtis buvo ties aukščiausia CFI rodiklio verte (3.2 pav. (b)). Tai gali būti aiškinama tuo, kad „natūraliausio“ apšvietimo parinkimo metu, tyrimo dalyviai matomus objektus lygino su savo atmintyje esančiais įvaizdžiais [P5,8], kurie labiau sąlygojami žmogaus psichofiziologijos, nei kultūrinių skirtumų. Šis tyrimas taip pat parodė, kad pasirenkant „natūraliausią“ apšvietimą kitas „spalvų atminties“ efektas [9], pasireiškiantis spalvas sodrinančio apšvietimo priskyrimu natūraliam, nėra stebimas.
- Aukščiau minėtų skirstinių sutapimas patvirtina 2 skyriuje aprašytos statistinės apšvietimo spalvinės kokybės vertinimo metrikos validavimą.
- Pasirenkant pirmenybinio apšvietimo sąlygas, pasirinkimų kiekio skirstinių smailės buvo tarp aukščiausių CFI ir CRI rodiklių verčių [P5,10,11] (3.2 pav. (c)). Panašūs rezultatai buvo stebėti ir [12,13] darbuose, kur tyrimo dalyviai pirmenybė teikė labiau sodrinančiam apšvietimui, ar apšvietimui, turinčiam didesnę GAI rodiklį. Vertinant skirtumus tarp atskirų kultūrų grupių atstovų buvo stebėtas pasirinkimų skirstinių nesutapimas (3.2 pav. (c)).
- Apšviečiant abiejų kultūrinių grupių atstovams gerai žinomus objektus, tokius kaip vaisiai ir daržovės, ar net paveikslus su žinomu turiniu (I paveikslas), pirmenybinio apšvietimo pasirinkimų skirstinio smailė buvo pasislinkusi į sodrinančiojo apšvietimo pusę ir nepriklausė nuo stebėtojo kultūrinės kilmės (3.3 pav. (a)). Minėtų objektų apšvietimo SST pasirinkimų skirstinys (3.3 pav. (b)) taip pat nepriklausė nuo stebėtojo kultūrinės kilmės. Šie tyrimai siejasi su tarpkultūriniais dviejų spalvų kombinacijų sukeltamų emocijų palyginimais [14]. Skirtingų kultūrinių grupių pasirinkimų skirstinio plotis, pasirenkant AGB ir RGB telkinių svorio koeficientą, buvo skirtingas. Amerikiečių grupės skirstinio plotis buvo beveik du kartus didesnis nei kinų (3.2 lentelė).
- Apšviečiant mažiau žinomus objektus atskirų kultūrinių grupių pasirinkimų nesutapimas gali būti aiškinamas šių grupių ypatumais, tokias kaip grupės nario savęs kaip kolektyvo dalies identifikavimas, išreiškiamas individualumo ir

kolektyviškumo rodikliu (IDV) [15]. JAV populiacijos IDV įvertis yra 91, kai tuo tarpu kinų – 20.

- Antrojo paveikslo pirmenybinio apšvietimo pasirinkimų skirstiniai parodė, kad kultūriniai grupei, kuriai pažįstama krikščioniškų paveikslų tematika (amerikiečiai), nebuvo poreikio pasodrinti perteikiamas spalvas, kai tuo tarpu kinų kultūrinės grupės pasirinkimų kiekio skirstinys buvo labiau pasislinkęs į sodrinančiojo apšvietimo pusę (3.3 pav. (c)). SST pasirinkimų skirstinys šiuo atveju abejoms grupėms sutapo (3.3 pav. (d)).
- Didžiausi pasirinkimų nesutapimai buvo stebėti apšviečiant III paveikslą. Pasirenkant AGB RGB telkinių svorio koeficientą, amerikiečių skirstinio maksimumas sutapo su labiausiai sodrinančiu apšvietimu, o kinų kultūrinės grupės atstovams tokio spalvų sodrinimo poreikio nebuvo. Tuo tarpu SST pasirinkimas parodė, kad kinai pirmenybę teikia šaltai baltai (~4300 K), o amerikiečiai – dienos šviesai (~6000 K). Toks aukštos spalvinės temperatūros poreikis gali būti aiškinamas, skirtingu dailės kūrinio turinio vertinimu. Toks efektas buvo stebėtas ir [16] darbe.

Atlikti tyrimai atskleidė, kad dailės kūrinių apšvietimo spalvinė kokybė turi būti parenkama atsižvelgiant tiek į dailės kūrinio tematiką, tiek į žiūrovų kultūrinę kilmę.

3.2. Dailės kūrinių apšvietimas su kontroliuojamu fotocheminiu poveikiu

Šioje darbo dalyje naudojamas 2 skyriuje aprašytas spalvų perteikimo variklis, papildytas fotocheminės žalos kontrolės moduliu, kuris keičia išėjimo srautą taip, kad kintant šviesos spalviui ir spalvų perteikimo savybėms, pasirinktų apšviečiamų medžiagų patiriama fotocheminė žala [17] išlieka pastovi. Patobulinto spalvų perteikimo variklio veikimas demonstruojamas trimis režimais, kuriems esant pasirenkama tinkamiausia apšviečiamų dailės kūrinių vaizdinė išraiška: a) SST parinkimas, kuris yra svarbus dailės kūrinių apšvietimo kriterijus, ir kurį keičiant, skirtingai nei darbuose [P10,16,18-21], mūsų atveju yra palaikomas aukščiausias spalvų perteikimo tikslumas; b) sodrinimo gylio Γ , išreiškiamo per AGB/RGB svorio koeficientą kaip $\Gamma = 1 - \sigma$ parinkimas, taip pat nagrinėtas [P10,22,23-25] publikacijose; c) spalvio paslinkimas nuo balto taško išilgai izotemperatūrinės linijos, kuris gali būti aktualus dailės kūrinių vaizdinei rekonstrukcijai ar vaizdinimui, naudojant kvazibaltą šviesą [26,27].

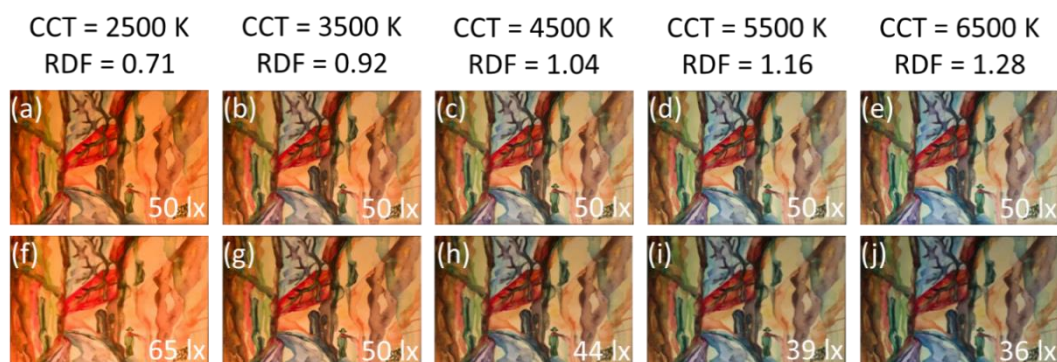
3.2.1. Spalvinės temperatūros parinkimas

SST parinkimo demonstracijai buvo pasirinktas postimpresionistinis E. Kuokščio darbas tapytas akvarele (3.1 pav. III). 3.3 lentelėje pateiktos santykinio žalos rodiklio (RDF [17,28]) vertės skirtingoms medžiagoms, esant įvairioms SST vertėms. Pastarasis rodiklis parodo šviesos fotocheminės žalos apšviečiamiems paviršiams santykį su šviesiniu srautu, normuojant į atitinkamą CIE standartinio šviesmens A santykį.

3.3 lentelė. Santykinis žalos rodiklis skirtingoms medžiagoms esant įvairioms SST vertėms [P15].

Susietoji spalvinė temperatūra (K)		2500	3500	4500	5500	6500
RDF skirtingoms medžiagoms	Žemos kokybės popierius	0,23	0,31	0,36	0,41	0,46
	Skudurinis popierius	0,69	0,92	1,04	1,18	1,29
	Aliejiniai dažai ant drobės, akvarelė ant skudurinio popieriaus	0,71	0,92	1,04	1,16	1,28
	Tekstilė	0,73	0,91	1,01	1,12	1,22

3.4 (a)-(e) vaizdai parodo, kaip atrodo skirtingos SST šviesos apšviečiamas paveikslas kai fiksuojamas pastovus apšvietos lygis (50 lx). Šiuo atveju, didėjant SST šviesos fotocheminis poveikis taip pat didėja (RDF įvertis pateiktas virš paveikslo). Fiksuojant fotocheminį poveikį ties 3500 K matome, kad apšvietos lygis mažėjant SST – didėja ir atvirkščiai (3.4 pav. (f)-(j)).



3.4 pav. (a)-(e) paveikslas „Vilniaus senamiestis“ (E. Kuokštis, 2004) vaizdai esant skirtingai SST, kai apšvietos lygis fiksuotas ties 50 lx. (f)-(j) Tas pats paveikslas esant skirtingai SST, kai fiksuojamas fotocheminis poveikis ties 3500 K SST. Apšvietos lygis nurodytas apatiniame dešiniajame vaizdų kampe [P15].

3.2.2. Sodrinimo gylio parinkimas

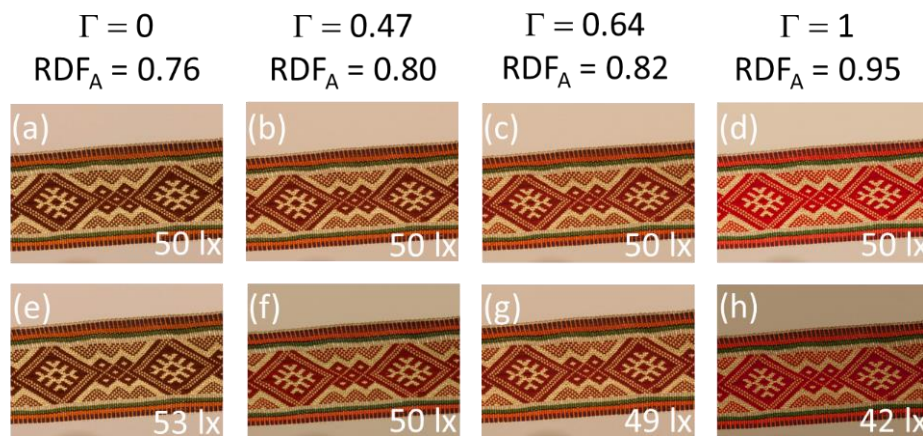
Sodrinimo gylio parinkimo demonstravimui buvo apšviečiama lietuvių tautinė juosta, nuausta 1977 metais ir lig šiol demonstruota esant natūraliam apšvietimui, dėl ko dalies pigmentų spalva buvo pakitusi (t.y. išblukusi). Sodrinimo gylio keitimo metu SST buvo fiksuota ties 3000 K, kas atitinka įprastos halogeninės lempuotės spinduliuotę. 3.4 lentelėje pateikti skirtingų medžiagų RDF įverčiai esant skirtingai sodrinimo gebai. Čia nurodytos sodrinimo gylio vertės, kurios atitinka apšvietimą su didžiausia blukinimo geba ($\Gamma = 0$),

didžiausiu spalvų perteikimo tikslumu ($\Gamma = 0.47$), pirmenybės teikimu ($\Gamma = 0.64$) ir didžiausia sodrinimo geba ($\Gamma = 1$).

3.4 lentelė. Santykinis žalos indeksas skirtingoms medžiagoms esant įvairioms sodrinimo gylio vertėms [P15].

Sodrinimo gylis Γ		0	0,47	0,64	1
RDF skirtingoms medžiagoms	Žemos kokybės popierius	0,28	0,27	0,27	0,23
	Skudurinis popierius	0,75	0,79	0,80	0,91
	Aliejiniai dažai ant drobės, akvarelė ant skudurinio popieriaus	0,77	0,80	0,81	0,89
	Tekstilė	0,76	0,80	0,82	0,95

3.5 pav. (a)-(d) rodo tautinės juostos vaizdą, kai apšvietos lygis fiksuotas ties 50 lx. Esant fiksuotam fotocheminės žalos poveikiui, atitinkančiam apšvietimą su didžiausiu spalvų perteikimo tikslumu ($\Gamma = 0.47$), didėjant apšvietimo sodrinimui, apšvietos lygis mažinamas (3.5 pav. (e)-(h)).



3.5 pav. (a)-(d) rodo lietuvių tautinės juostos vaizdus esant skirtingam sodrinimo gyliui, kai apšvietos lygis fiksuotas ties 50 lx. (e)-(h) rodo tos paties juostos vaizdus, kai fiksuotas apšvietimo fotocheminis poveikis. Apatiniame dešiniajame vaizdų kampe nurodytas apšvietos lygis [P15].

3.2.3. Spalvinio taško slinkimas išilgai izotemperatūrinės linijos

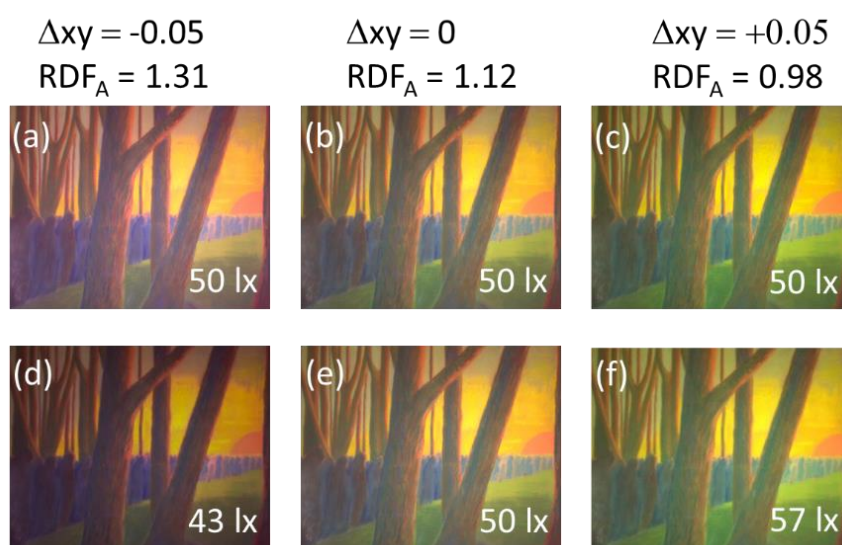
Apšvietimo spalvinio taško parinkimo slenkant jį išilgai izotemperatūrinės linijos ties 4874 K (atitinka CIE standartinio šviesmenį B) demonstravimui pasirinktas M. K. Čiurlionio darbas iš ciklo „Laidotuvių simfonija“, tapytas 1909 m. pastele ant popieriaus. 3.5 lentelėje pateikti RDF įverčiai skirtingoms medžiagoms kai apšvietimo spalvinis taškas yra ant izotemperatūrinės linijos ir spalvių diagramoje pasislinkęs nuo jos per ± 0.05 xy.

3.6 pav. (a)-(c) rodo paveikslą slenkant apšvietimo spalvinį tašką išilgai izotemperatūrinės ašies, kai apšvietos lygis fiksuotas ties 50 lx. Esant fiksuotam fotocheminiam poveikiui, šviesos spalvį paslinkus link purpurinės srities, apšvietos lygis

mažėja ir atvirkščiai, spalvų paslinkus link žalios srities – apšvietos lygis didėja (3.6 pav. (d)-(e)).

3.5 lentelė. Santykinis žalios rodiklis skirtingoms medžiagoms, esant įvairiam spalvinio taško poslinkiui išilgai 4870 K izotemperatūrinės linijos (sodrinimo gylis $\Gamma = 0.5$) [P15].

Spalvio poslinkis Δxy		-0,05	0	+0,05
Spalvio koordinatė x		0,341	0,348	0,35
Spalvio koordinatė y		0,302	0,352	0,401
	Žemos kokybės popierius	0,42	0,37	0,28
RDF	Skudurinis popierius	1,34	1,13	0,98
skirtingoms medžiagoms	Aliejiniai dažai ant drobės, akvarelė ant skudurinio popieriaus	1.31	1.12	0.98
	Tekstilė	1.27	1.09	0.96



3.6 pav. (a)-(c) pastele tapyto M. K. Čiurlionio darbo iš ciklo „Laidotuvių simfonija“ vaizdai, kai apšvietimo spalvi slenkamas išilgai izotemperatūrinės 4870 K SST linijos esant fiksuotai 50 lx apšvietai. (d)-(f) tas pats dailės kūrinys, apšviečiamas esant fotocheminiam poveikiui fiksuotam ties $\Delta xy = 0$ [15].

Apibendrinant dailės kūrinių apšvietimo su kontroliuojamu fotocheminiu poveikiu tyrimo rezultatus galima teigti kad:

- Naudojant spalvų perteikimo variklį su papildytu fotocheminės žalios kontrolės moduliu galima valdyti fotocheminę įtaką apšviečiamiems paviršiams.
- Stebimas regimosios išraiškos pokytis, atsiradęs dėl apšvietos lygio kitimo, kuomet fiksuojama apšvietimo fotocheminė įtaka apšviečiantiems paviršiams, kintant kokybiniais apšvietimo parametrams (SST, sodrinimo gyliui, spalvio poslinkiui nuo balto taško išilgai izotemperatūrinės linijos).

- Keičiant kokybinius apšvietimo parametrus apšviečiamo dailės kūrinio regimoji išraiška gali būti parinkta taip, kad būtų kompensuota dėl senėjimo pakitusi paveikslų pigmentų spalva tokiu būdu atliekant paveikslų vaizdinę rekonstrukciją.

4. Išmaniojo gatvių apšvietimo apšvietos skirstinio optimizavimas

Ketvirtasis skyrius yra skirtas išmanaus kietakūnio apšvietimo taikymams gatvių apšvietimui. Čia pristatomi apšvietimo skirstinio pėsčiųjų zonai optimizavimo rezultatai, gauti įvertinus subjektyvius poreikius.

4.1. Eksperimento instaliacija ir metodika

Tyrimai buvo atlikti naudojant išmaniają gatvių apšvietimo instaliaciją [P3] Vilniaus universiteto studentų miestelyje (4.1 pav.). Šeši valdomo šviesos srauto šviestuvai, pakabinti 10 m aukštyje, 30 m atstumu vienas nuo kito, apšvietė gatvės atkarpą. Kiekvieną šviestuvą sudarė 66 didelės galios konversijos fosfore šviestukai (gamintojo Cree modelis XR-E), emituojantys 3060 K SST spinduliuotę, kurios bendrasis spalvų atgavos rodiklis 82. Vidutinis skaistis ant grindinio paviršiaus buvo 1.7 cd/m^2 .



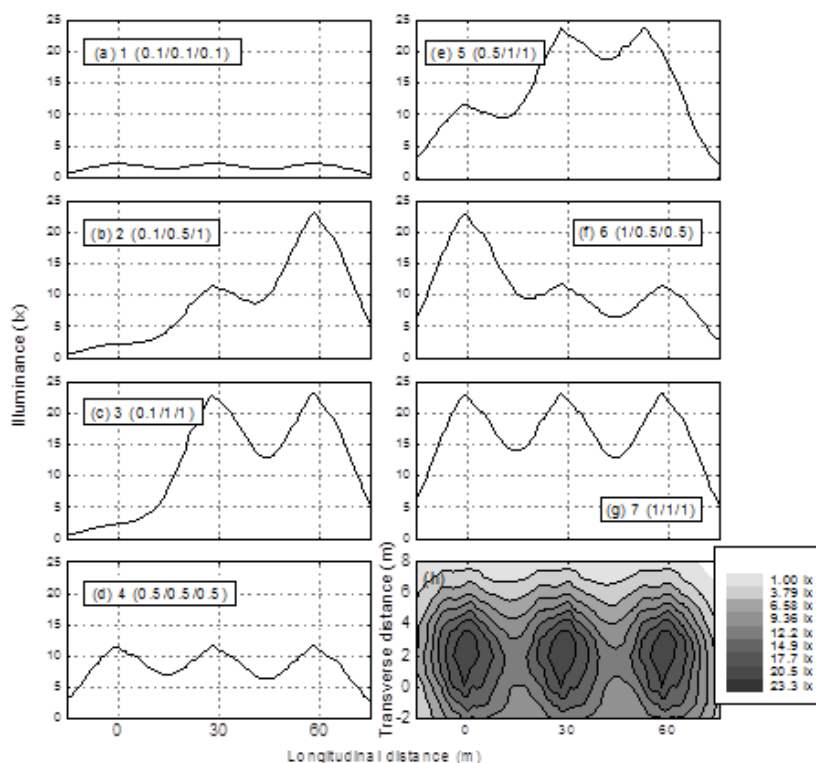
4.1 pav. Išmaniosios gatvių apšvietimo instaliacijos vaizdas.

Šviesos srauto valdymui buvo panaudota mikrokontrolerinė sistema, susidedanti iš Atmel bendrovės ATmega šeimos mikrokontrolerio ATmega128 bei bendrovės Propox komunikacijos modulio MMnet01 suderinto su IEEE 802.3 standartu. Šviestuvai tarp pusavyje buvo sujungti komunikacijos jėgos linija bendrovės TP-LINK moduliais TL-PA201 užtikrinančiais 200 Mbps duomenų perdavimo spartą. Tokia valdymo sistema leido kompiuterį prisijungus prie vieno iš šešių šviestuvų šviesos srautą valdyti visoje apšvietimo instaliacijoje.

Buvo tiriami 7 apšvietos skirstiniai (žiūrėti 4.2 pav.). Pasinaudojant semantinio diferencialo [29,30] bei Likerto [31] skalių metodika atlikti priimtinausio apšvietimo profilio subjektyvaus pasirinkimo įvertinimai. Minėtosios metodikos yra dažnai naudojamos vertinant interjero [32-34] bei atvirų miesto erdvių [35] apšvietimą.

Apšvietimo erdvinio skirstinio vertinimo semantinio diferencialo skale tyrimuose dalyvavo 21 mergina - studentės, kurių amžius 20-25 metų, 11 iš jų dalyvavo vertinime

Likerto skale. Prieš kiekvieną tyrimą jos buvo trumpai supažindinamos su tyrimų tikslais ir instruktuojamos, kaip pildyti klausimynus. Atsakius į visus klausimus, atsitiktinai buvo keičiama apšvietimo situacija. Vienos sesijos metu buvo sukuriamos visos apšvietimo situacijos.



4.2 pav. (a)-(g) – septyni apšvietos erdviniai skirstiniai išilgai testuojamosios gatvės.; (h) dvimatis apšvietos erdvinis skirstinys, kai šviestuvai šviečia visu pajėgumu [P13].

4.2. Įvertinimo, naudojant semantinio diferencialo skalę rezultatai

Semantinio diferencialo skalės įverčiui buvo parinktos šios būdvardžių poros:

1. jaukus/nejaukus; 2. tolimas/artimas; 3. tamsus/šviesus; 4. skatinantis/sulaikantis;
5. brangus/pigus; 6. nelygus/lygus; 7. raminantis/bauginantis; 8. gašdinantis/drąsinantis;
9. bjaurus/grąžus; 10. nesaugus/saugus; 11. platus/siauras; 12. atskleidžiantis/paslepiantis.

Gauti rezultatai buvo apdoroti naudojant faktorių analizę (naudojant programų paketą „Statistica 7“). Išskirti du faktoriai, kurių pirmasis susijęs su subjektyviu geros savijautos pojūčiu, o antrasis – su aplinkos fizinėmis savybėmis. Tyrimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje.

Siekiant gauti statistiškai patikimus duomenis išskiriant rezultatus, gautus su skirtingais apšvietimo profiliais, buvo pasitelktas Wilcoxon suderintų porų testas [36], kuris atskleidė, kad:

- Statistiškai reikšmingi skirtumai buvo gauti, kai apšvietos skirstinį lėmė skirtingas apšvietos lygis po pirmuoju (ties stebėtoju) šviestuvu, o tolimesnių šviestuvų srautas

buvo fiksuotas (lyginant (c), (e) ir (g) profilius bei (b), (d) ir (f) profilius 4.2 paveiksle);

- Tarp apšvietos skirstinių, kuriuos lėmė tas pats apšvietos lygis po pirmuoju šviestuvu ir skirtingas apšvietos lygis toliau (lyginant (a), (b) ir (c) profilius, bei (d) ir (e) profilius 4.2 paveiksle), statistiškai reikšmingi skirtumai nebuvo stebėti;
- Subjektyviam apšvietos skirstinio įverčiui įtaką daro tik arčiausiai stebėtojo esančio šviestuvo sukuriama apšvieta.

4.1 lentelė. Apšvietos skirstinių įvertinimo, naudojant semantinio diferencialo skalę, rezultatai. Pateiktas vidutinis atsako įvertis ir faktorių svoriai kiekvienai būdvardžių porai. Faktorių įverčiai, viršijantys 0.7 paryškinti [P13].

Pora	Apšvietos skirstinys							Faktorius 1	Faktorius 2
	1	2	3	4	5	6	7		
	0,1/0,1/0,1	0,1/0,5/1	0,1/1/1	0,5/0,5/0,5	0,5/1/1	1/0,5/0,5	1/1/1		
1	-1,48	-1,38	-0,90	-0,40	0,95	0,76	1,38	0,87	0,20
2	0,29	0,48	0,14	-0,25	-0,24	-0,67	-0,25	-	-
3	-1,76	-1,52	-1,05	-0,35	0,52	1,14	2,38	0,58	0,69
4	-0,81	-0,86	-0,71	-0,65	-0,14	0,57	1,00	0,39	0,34
5	-1,81	-1,33	-1,48	-0,95	0,00	0,38	1,63	0,60	0,58
6	-0,76	-0,57	-0,57	0,15	0,52	0,43	1,50	0,04	0,80
7	-1,57	-1,10	-0,67	-0,15	0,67	0,43	1,31	0,84	0,26
8	-1,57	-1,05	-0,76	-0,25	0,67	0,67	1,44	0,77	0,51
9	-0,95	-0,43	-0,48	0,20	0,33	0,67	1,00	0,75	0,32
10	-1,95	-1,38	-1,19	-0,35	0,71	0,67	1,75	0,63	0,68
11	-1,86	-1,14	-1,14	-0,60	0,76	0,05	1,25	0,33	0,82
12	-2,10	-1,43	-1,05	-0,60	0,48	0,57	1,81	0,46	0,78
Įvertis	-1,36	-0,98	-0,82	-0,35	0,44	0,47	1,35		

4.3. Įvertinimo, naudojant Likerto skalę, rezultatai

Teiginiai, naudoti apšvietimo profilio įtakos įvertinimui Likerto skale, suskirstyti į penkias grupes ir pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Likerto skalės teiginiai ir jų grupės [P13].

Teiginys	Grupė
1. Šioje gatvėje yra daugybė vietų, kur gali tykoti nusikaltėliai	Prieglobstis
2. Man svarbu, kad būdamas (-a) gatvėj galėčiau matyti žvaigždes	Maskavimasis
3. Šioje gatvėje lengva įžiūrėti net menkiausius dalykus	Vaizdingumas
4. Jaučiu, kad šioje gatvėje ką nors iškrėtęs (-usi) būčiau nesučiuptas (-a)	Ištrūkimas
5. Nenorėčiau eiti šia gatve vienas (-a)	Saugumas
6. Šitaip apšviesta gatvė tik padidins vandalų skaičių	Ištrūkimas
7. Šioje gatvėje jaučiuosi saugiai	Saugumas
8. Gatvės apšvietimas niekada nebus taip kaip paveikslėliuose	Maskavimasis
9. Nenorėčiau vairuoti automobilio esant tokiam gatvės apšvietimui	Vaizdingumas
10. Šioje gatvėje lengvai pasprukčiau nuo užpuoliko	Ištrūkimas
11. Mane erzina toks gatvės apšvietimas	Vaizdingumas
12. Jeigu reiktų, galėčiau prasmukti į kitą gatvės galą ne kieno nepastebėtas (-a)	Prieglobstis
13. Iš tiesų aš niekada neatkreipiau dėmesio į gatvės apšvietimą	Maskavimasis
14. Man patinka kad šią gatvę gaubia nakties tamsa	Prieglobstis
15. Manau, kad šioje gatvėje galėtų įvykti užpuolimas	Saugumas

Tokių teiginių pasirinkimas įtakotas Appletono teorijos [37], vertinančios saugumo jausmą.

Šiam tyrimui atlikti buvo pasirinkti trys apšvietos skirstiniai, pateikti 4.2 pav. (b), (e) ir (f). Apšvietos skirstinio įtakos įvertinimo Likerto skale rezultatai, bei rezultatų faktorių analizės svoriai pateikti 4.3 lentelėje. Išskirtų faktorių reikšmės tos pačios kaip ir 4.2 skyriuje.

4.3 lentelė. Apšvietos skirstinių įvertinimo, naudojant Likerto skalę, rezultatai. Pateikti vidutiniai įverčiai, suminis įvertis bei faktorių svoriai. Faktoriai, kurių svoris didesnis nei 0,7, paryškinti [P13].

Teiginys	Apšvietos skirstinys			Faktorius 1	Faktorius 2
	2	5	6		
	0,1/0,5/1	0,5/1/1	1/0,5/0,5		
1	-0,64	-0,4	0,42	-	-
2	-0,18	0	0,08	-	-
3	-1,27	-0,6	1	0,79	0,39
4	0,18	0	-0,75	-	-
5	-0,18	-0,3	0,75	-	-
6	-0,55	0,2	1,25	0,53	0,59
7	-0,73	-0,5	0,92	0,76	0,52
8	0,18	-0,3	-0,08	-	-
9	0,09	0,8	1,5	0,18	0,9
10	-0,36	-0,5	-0,33	-	-
11	-0,64	0,2	1,25	0,44	0,74
12	0,27	-0,3	-1,25	-	-
13	-1,09	-1	-1,17	-	-
14	-1	-0,4	-0,83	-	-
15	-1,18	-0,6	-0,08	0,89	0,13
Įvertis	-0,5	-0,2	0,32		

Rezultatai atskleidė, kad:

- Faktorius daugiausiai įtakoja su vaizdingumu ir saugumo jausmu susiję pojūčiai;
- Faktoriaus svoris išauga kartu su padidėjusia ties stebėtoju esančio (pirmojo) šviestuvo generuojama apšvieta.

5. Žemo cirkadinio poveikio kietakūnis šviesos šaltinis, skirtas lauko apšvietimui

Šiame skyriuje pasiūlytas žemo cirkadinio poveikio kietakūnis šviesos šaltinis, skirtas lauko apšvietimui. Įvertintos tokio šaltinio fotometrines, kolorimetrines, spalvų perteikimo, fotobiologinės ir šviesinės taršos savybės bei atlikti tyrimai, įvertinantys psichofizines savybes (reakcijos trukmės bei kontrasto ir spalvų diskriminavimo).

5.1. Žemo cirkadinio poveikio SGS įvertinimas

Eksperimentinį žemo cirkadinio poveikio šviesos šaltinį sudarė bendrovės Philips Lumileds Lighting Luxeon® Rebel šeimos konversijos fosfore LXM2-PL01 ir tiesioginės emisijos LXML-PR02 InGaN šviestukų telkinys, kurių SGS smailės padėtys yra atitinkamai ties 594 nm ir 452 nm. Šviestukai bei jų daliniai srautai buvo parinkti taip, kad jų telkinio mezopinis šviesinis efektyvumas (MLER) [38] būtų mažiausias, o generuojamos šviesos spalvis atitiktų bendrovės Philips gaminamos SON-T PIA PLUS 70W modelio aukšto slėgio natrio garų lempos (HPS) spinduliuotės spalvį.

5.1 lentelėje pateikti palyginamų šviesos šaltinių („liepsnos šviesos“ telkinio ir HPS lempos) a) fotometriniai ir kolorimetriniai, b) spalvų perteikimo, c) melatonino sekrecijos slopinimo, d) Relėjaus sklaidos, sukeliančios nepageidaujamą dangaus skliauto švytėjimą, ir e) akies stiklakūnio skaidrumo įverčiai. Indeksu S/P pažymėtas skotopinės ir fotopinės šviesos srautų santykis, (M)MSI_A – (mezopinis) melatonino sekrecijos slopinimo rodiklis [39-41], (M)CLI_A – (mezopinis) cirkadinis rodiklis [42], (M)GVI_A – (mezopinis) įtakos Relėjaus sklaidai rodiklis [43,44], MLYI₇₅ – akies tinklainės apšvietimo sumažėjimo dėl natūralaus stiklakūnio pageltimo, atsirandančio senstant, rodiklis 75 metų amžiaus stebėtojams [45,46]. Visi duomenys normuoti į CIE standartinio šviesmens A duomenis. Iš pateiktų duomenų matosi, kad liepsnos šviesos kietakūnio šaltinio generuojama šviesa pasižymi geresniu spalvų perteikimu, mažesniu melatonino sekrecijos slopinimu, mažesne šviesine tarša. Būtina paminėti kad pastarieji du parametrai stipriai priklauso nuo SST.

5.1 lentelė. Žemos spalvinės temperatūros šviestukų telkinio ir HPS šviesos šaltinio kokybinių įverčių palyginimas.

		Šviestukų telkinys		HPS
		SST	1859	1886
Fotometrines ir kolorimetrines savybes	Spalvio koord.	x	0,5424	0,5390
		y	0,4101	0,4104
	S/P	0,49	0,54	
	(M)LER (lm/W) fotopinis	0,1 cd/m ²	295	325
2 cd/m ²		347	376	
fotopinis		358	387	
Spalvų perteikimo savybės	R _a ekviv. fotopinis	0,1 cd/m ²	90	86
		2 cd/m ²	68	55
		fotopinis	37	12
	CFI	9	9	
	CSI	1	0	
CDI	79	39		
Melatonino sekrecijos slopinimas	(M)MSI _A	0,1 cd/m ²	0,28	0,36
		2 cd/m ²	0,24	0,31
		fotopinis	0,23	0,30
	(M)CLI _A	0,1 cd/m ²	0,29	0,38
2 cd/m ²		0,25	0,33	
fotopinis	0,24	0,32		
Taršos indeksas	(M)GVI _A	0,1 cd/m ²	0,35	0,40
		2 cd/m ²	0,30	0,35
		Fotopinis	0,29	0,34
Akies skaidrumas	MLYI ₇₅	0,1 cd/m ²	0,94	0,94
		2 cd/m ²	0,95	0,95
		fotopinis	0,96	0,96

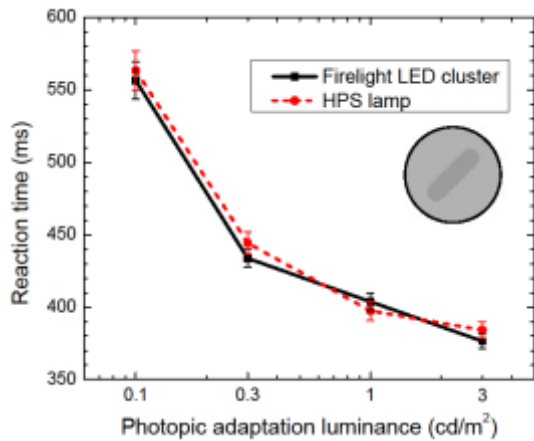
5.2. Psichofizinis įvertinimas

Palyginant pasiūlytą kietakūnį šviesos šaltinį su įprasta HPS lempa, atlikti trys šviesos kokybės vertinimo tyrimai, susiję su vairuotojų ir pėsčiųjų funkcinių savybių įvertinimu gatvėje tamsiuoju paros metu: a) reakcijos į achrominį stimulą trukmės matavimai [47-50]; b) skaisčio kontrasto slenksčio aptikimo [47,50-52]; ir c) spalvų diskriminacijos [46,53,54]. Tyrimai buvo atlikti esant keturioms skaisčio vertėms: 0,1; 0,3; 1,0 ir 3,0 cd/m², aprėpiančioms standartines vairavimo ar pasivaikščiojimo nakties metu sąlygas. Tyrime dalyvavo keturi gerai apmokyti bei su tyrimo metodiką susipažinę respondentai. Žemiau pateiktuose paveiksluose pavaizduoti atlikto tyrimo rezultatai.

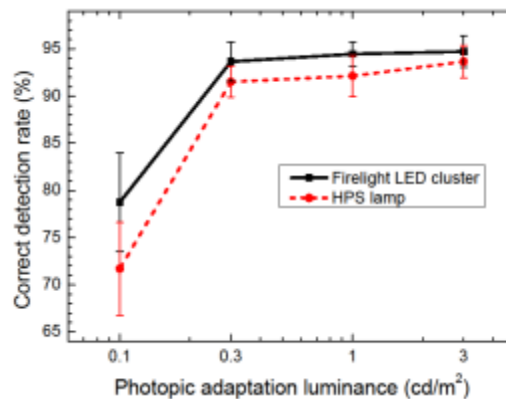
5.1 paveikslas vaizduoja subjektų reakcijos į pasisukantį achrominį stimulą, esantį periferiniame regėjimo lauke, trukmės priklausomybę nuo adaptacijos skaisčio kiekvienam iš dviejų šviesos šaltinių. Skaisčiui mažėjant nuo 3 iki 0.1 cd/m² reakcijos trukmė, abiejų šaltinių atvejais, išauga nuo maždaug 380 ms iki 560 ms. Tame pačiame eksperimente užfiksuotų teisingų sprendimų identifikuojant stimulo pasisukimo kryptį, santykinė procentinė dalis (5.2 pav.) rodo, kad liepsnos šviesos šaltinis lemia mažesnę klaidų skaičių.

5.3 paveikslas vaizduoja skaisčio kontrasto aptikimo slenksčio priklausomybę nuo adaptacijos skaisčio. Pastaroji kreivė buvo gauta naudojant A5 formato korteles, kuriose buvo pavaizduoti 5×9 tolygiai didėjančio Vėberio kontrasto bespalviai bandinėliai, apimantys kontrasto skalę nuo -0.3 iki +0.3. Tyrimo dalyvių buvo prašoma nurodyti bandinėlį kuriame jie vos gali įžiūrėti skaisčio kontrastą. Gauti rezultatai rodo, kad skaisčio kontrasto slenksčio aptikimas nepriklauso nuo tirtų metamerinių šaltinių spektrinės galios skirstinio.

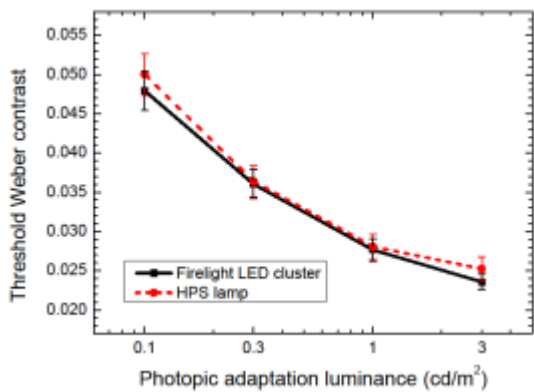
5.4 paveikslas rodo Franswortho-Munsello 100 bandinių testo klaidų įverčio priklausomybę nuo adaptacijos skaisčio. Matyti, kad liepsnos šviesos šaltinis sąlygoja mažesnę spalvų diskriminavimo klaidų skaičių. Šis rezultatas gali būti aiškinamas aukštesne liepsnos šviesos šviestuvo spalvų atgava.



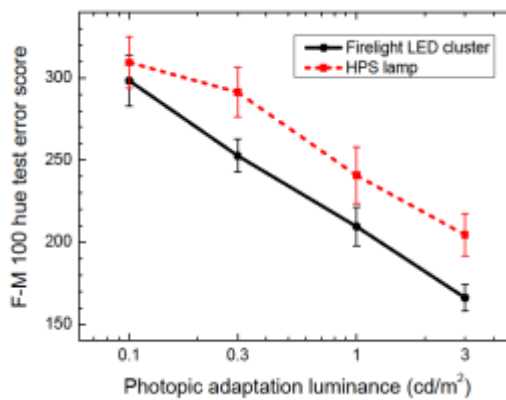
5.1 pav. Reakcijos į achrominį pasisukantį stimulą trukmės priklausomybė nuo adaptacijos skaisčio. Dešinėje įterptas besisukančio stimulus vaizdas [P12].



5.2 pav. Teisingų pasisukančio stimulus fiksavimų procentinės dalies priklausomybė nuo adaptacijos skaisčio [P12].



5.3 pav. Skaisčio kontrasto vos aptinkamo slenksčio priklausomybė nuo adaptacijos skaisčio [P12].



5.4 pav. Franswortho-Munsello 100 bandinių testo klaidų įvertio priklausomybė nuo adaptacijos skaisčio [P12].

Apibendrinimas

Sukurtas keturspalvis (RAGB) kietakūnis šviesos šaltinis – spalvų perteikimo variklis, leidžiantis tolygiai keisti apšvietimo spalvinės kokybės parametrus. Atlikti psichofiziniai tyrimai atskleidė, kad subjektai tapatina sodrinantį, blukinantį bei „natūraliausią“ apšvietimą su atitinkamais statistinės metrikos rodikliais – CSI, CDI ir CFI. Apšvietimas, tyrimo dalyvių identifikuotas kaip „pirmenybinis“ buvo tarpinis tarp „natūralaus“ ir sodrinančio.

Naudojant spalvų perteikimo variklį, leidžiantį valdyti šviesos susietąją spalvinę temperatūrą bei spalvų sodrinimo gylį, buvo iširtos pirmenybinės apšvietimo sąlygos, atsižvelgiant į skirtingų kultūrinių grupių atstovų poreikius. Apšviečiant dailės kūrinius, kurių tematika skirtingų kultūrinių grupių atstovams gali būti suvokiama nevienodai, buvo aptikti apšvietimo spalvinei kokybei teikiamos pirmenybės skirtumai kinų ir amerikiečių

kultūrinėms grupėms. Visais atvejais kinų kultūrinės grupės pasirinkimų skirstinys buvo siauresnis nei amerikiečių. Pirmenybinės spalvų kokybės apšvietimo įverčiai (tiek sodrinimo gylis, tiek SST) taip pat priklausė nuo paveikslo turinio.

Pademonstruotas spalvų perteikimo variklis, papildytas fotocheminio poveikio apšviečiamiesiems paviršiams kontrolės moduliu. Fiksuojant fotocheminę žalą, vizualiai pasireiškiančią apšvietos lygio kitimu keičiant apšvietimo spalvinės kokybės parametrus, buvo parodyta, kaip keičiasi regimoji apšviečiamų objektų išraiška keičiant SST ir sodrinimo gylį bei apšvietimo spalvų slenkant išilgai izotemperatūrinės linijos.

Naudojant semantinio diferencialo bei Likerto skales, įvertinti septyni apšvietos skirstiniai išmaniojoje gatvės apšvietimo instaliacijoje, sudarytoje iš valdomo šviesos srauto šviestuvų. Rezultatai parodė, kad tiek subjektyvus geros savijautos pojūtis, tiek aplinkos fizinių savybių įtaka priklauso nuo apšvietos lygio, sukuriama arčiausiai pėsčiojo esančiu šviestuvu, kai tuo tarpu toliau nuo pėsčiojo esančių šviestuvų srautas turi mažesnę įtaką.

Pristatytas žemos spalvinės temperatūros („liepsnos šviesos“) šviestukų telkinys, optimizuotas mezopinėms lauko apšvietimo sąlygoms. Palyginus su aukšto slėgio natrio garų lempa, šis šviesos šaltinis pasižymi mažesniu melatonino sekrecijos slopinimu, mažesne šviesine tarša, didesniu vyresnių žmonių akies stiklakūnio skaidrumu, panašia reakcija į periferinį stimulą trukme ir skaisčio kontrasto slenksčio aptikimu bei geresne spalvų diskriminacija.

Cituojamos literatūros sąrašas

1. H. J. Round, “A note on carborundum,” *Electr. World* **49**, 309 (1907).
2. A. Žukauskas, R. Vaicekuskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevičius, P. Vitta, and M. S. Shur, “Statistical approach to color quality of solid-state lamps,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **15**, 1753–1762 (2009).
3. D. L. Macadam, “Visual sensitivities to color differences in daylight,” *J. Opt. Soc. Am.* **32**, 247–273 (1942).
4. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae* (Wiley, 2000).
5. Commission Internationale de l’Éclairage, “Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources,” *Pub. CIE* 13.3, 1995.
6. M. S. Rea and J. P. Freyssinier-Nova, “Color rendering: A tale of two metrics,” *Color Res. Appl.* **33**, 192–202 (2008).
7. W. Davis and Y. Ohno, “Toward an improved color rendering metric,” *Proc. SPIE* **5941**, 59411G (2005).
8. K. Smet, W. R. Ryckaert, M. R. Pointer, G. Deconinck, and P. Hanselaer, “Colour appearance rating of familiar real objects,” *Color Res. Appl.* **36**, 192–200 (2010).

9. K. A. G. Smet, W. R. Ryckaert, M. R. Pointer, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "Memory colours and colour quality evaluation of conventional and solid-state lamps," *Opt. Express* **18**, 26229–26244 (2010).
10. W. A. Thornton, "A validation of the color-preference index," *J. Illum. Eng. Soc.* **4**, 48–52 (1974).
11. N. Narendran and L. Deng, "Color rendering properties of LED light sources," *Proc. SPIE* **4776**, 61–67 (2002).
12. O. Masuda and S. M. Nascimento, "Best lighting for naturalness and preference," *J. Vis.* **13**, 4 (2013).
13. S. M. C. Nascimento and O. Masuda, "Psychophysical optimization of lighting spectra for naturalness, preference, and chromatic diversity," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, A144–A151 (2012).
14. X.-P. Gao, J. H. Xin, T. Sato, A. Hansuebsai, M. Scalzo, K. Kajiwara, S.-S. Guan, J. Valdeperas, M. J. Lis, and M. Billger, "Analysis of cross-cultural color emotion," *Color Res. Appl.* **32**, 223–229 (2007).
15. G. Hofstede, G. J. Hofstede, and M. Minkov, *Cultures and Organizations: Software of the Mind, Third Edition* (McGraw-Hill, 2010).
16. M. Scuello, I. Abramov, J. Gordon, and S. Weintraub, "Museum lighting: Optimizing the illuminant," *Color Res. Appl.* **29**, 121–127 (2004).
17. Commission Internationale de l'Éclairage, "Control of damage to museum objects by optical radiation," Pub. CIE 157, 2004.
18. M. Scuello and I. Abramov, "Museum lighting: Why are some illuminants preferred," *J. Opt. Soc. Am. A* **21**, 306–311 (2004).
19. P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, and S. M. C. Nascimento, "Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 623–630 (2008).
20. P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, J. A. Carvalhal, and S. M. C. Nascimento, "Psychophysical estimation of the best illumination for appreciation of Renaissance paintings," *Visual Neurosci.* **23**, 669–674 (2006).
21. S. M. C. Nascimento and O. Masuda, "Best lighting for visual appreciation of artistic paintings—experiments with real paintings and real illumination," *J. Opt. Soc. Am. A* **31**, A214–A219 (2014).
22. R. S. Berns, "Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study," *Color Res. Appl.* **36**, 324–334 (2011).
23. F. Viénot, G. Coron, and B. Lavédrine, "LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts," *J. Cult. Herit.* **12**, 431–440 (2011).
24. C. Cuttle, "A proposal to reduce the exposure to light of museum objects without reducing illuminance or the level of visual satisfaction of museum visitors," *J. Amer. Inst. Conserv.* **39**, 229–244 (2000).
25. D. Vazquez-Molini, A. Alvarez Fernandez-Balbuena, A. Garcia Botella, J. A. Herraiz, M. Del Egido, and R. Ontañón, "Advanced LED lighting system applied to cultural heritage goods," in *Colour and Light in Architecture*, P. Zennaro, ed. pp. 341–348 (2010).
26. S. Boissard and M. Fontoynt, "Optimization of LED-based light blendings for object presentation," *Color Res. Appl.* **34**, 310–320 (2009).
27. R. H. Lafontaine, "Seeing through a yellow varnish: a compensating illumination system," *Stud. Conserv.* **31**, 97–102 (1986).
28. C. Cuttle, "Damage to museum objects due to light exposure," *Lighting Res. Technol.* **28**, 1–9 (1996).
29. J. G. Snider and C. E. Osgood, *Semantic Differential Technique: a Sourcebook* (Aldine, 1969).
30. D. K. Tifler and M. S. Rea, "Semantic differential scaling: Prospects in lighting research," *Lighting Res. Technol.* **24**, 43–51 (1992).
31. W. M. K. Trochim and J. P. Donnelly, *The Research Methods Knowledge Base* (Atomic Dog/Cengage Learning, 2008).
32. K. W. Houser and D. K. Tiller, "Measuring the subjective response to interior lighting: Paired comparisons and semantic differential scaling," *Lighting Res. Technol.* **35**, 183–195 (2003).
33. L. Loe, K. P. Mansfield, and E. Rowlands, "Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study," *Lighting Res. Technol.* **26**, 119–133 (1994).
34. P. R. Boyce, J. A. Veitch, G. R. Newsham, C. C. Jones, J. Heerwagen, M. Myer, and C. M. Hunter, "Lighting quality and office work: two field simulation experiments," *Lighting Res. Technol.* **38**, 191–223 (2006).

35. S. Mumcu, T. Duzenli, and A. Ozbilen, "Prospect and refuge as the predictors of preferences for seating areas," *Sci. Res. Essays* **5**, 1223–1233 (2010).
36. S. Siegel, *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences* (McGraw-Hill, 1956).
37. J. Appleton, *The Experience of Landscape* (Wiley, 1996).
38. Commission Internationale de l'Éclairage, "Recommended system for mesopic photometry based on visual performance," *Pub. CIE 191*, 2010
39. D. Gall, "Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung," *Licht* **54**, 1292–1297 (2002).
40. G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, and M. D. Rollag, "Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor," *J. Neurosci.* **21**, 6405–6412 (2001).
41. K. Thapan, J. Arendt, and D. J. Skene, "An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans," *J. Physiol.-London* **535**, 261–267 (2001).
42. M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, and R. Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system," *J. Biol. Rhythm.* **44**, 386–396 (2012).
43. F. Falchi, P. Cinzano, C. D. Elvidge, D. M. Keith, and A. Haim, "Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility," *J. Environ. Manage.* **92**, 2714–2722 (2011).
44. A. Bierman, "Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow?" *Lighting Res. Technol.* **44**, 449–458 (2012).
45. D. Lang, "Energy efficient lighting for the biological clock," *Proc. SPIE* **7954**, 795402 (2011).
46. P. L. Turner and M. A. Mainster, "Circadian photoreception: ageing and the eye's important role in systemic health," *Br. J. Ophthalmol.* **92**, 1439–1444 (2008).
47. A. L. Lewis, "Visual performance as a function of spectral power distribution of light sources at luminances used for general outdoor lighting," *J. Illum. Eng. Soc.* **28**, 37–42 (1999).
48. Y. He, M. Rea, A. Bierman, and J. Bullough, "Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times," *J. Illum. Eng. Soc.* **26**, 125–138 (1997).
49. J. D. Bullough and M. S. Rea, "Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels," *Lighting Res. Technol.* **32**, 194–198 (2000).
50. R. Lingard and M. Rea, "Off-axis detection at mesopic light levels in a driving context," *J. Illum. Eng. Soc.* **31**, 33–39 (2002).
51. S. A. Fotios and C. Cheal, "Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 2: Preferred appearance and visual acuity," *Lighting Res. Technol.* **43**, 159–172 (2011).
52. P. R. Boyce and L. D. Bruno, "An evaluation of high pressure sodium and metal halide light sources for parking lot lighting," *J. Illum. Eng. Soc.* **28**, 16–32 (1999).
53. P. R. Boyce, "Illuminance, lamp type and performance on a colour discrimination task," *Lighting Res. Technol.* **8**, 195–199 (1976).
54. M. P. Royer, K. W. Houser, and A. M. Wilkerson, "Color discrimination capability under highly structured spectra," *Color Res. Appl.* **37**, 441–449 (2012).

Publikacijų disertacijos tema sąrašas

- P1. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, and M. S. Shur, "Solid-state lighting with tailored colour quality," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Science and Technology of Light Sources and 3rd International Conference on White LEDs and Solid State Lighting*, M. Haverlag, G. M. W. Kroesen, and T. Taguchi, eds. (FAST-LS, 2010), pp. 363–364.

- P2. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, P. Vitta, and M. S. Shur, “Statistical approach to color rendition properties of solid state light sources,” Proc. SPIE **8123**, 81230X (2011).
- P3. P. Vitta, R. Stanikūnas, **A. Tuzikas**, I. Reklaitis, A. Stonkus, A. Petrulis, H. Vaitkevičius, and A. Žukauskas, “Energy-saving approaches to solid state street lighting,” Proc. SPIE **8123**, 81231H (2011).
- P4. P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, and M. S. Shur, “Lighting engine for art and museum display,” in *Proceedings of the 13th International Symposium on Science and Technology of Lighting*, R. Devonshire and G. Zissis, eds. pp. 343–344 (2012).
- P5. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, and M. S. Shur, “Color rendition engine,” Opt. Express **20**, 5356–5367 (2012).
- P6. P. Vitta, L. Dabašinskas, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, D. Meškauskas, and A. Žukauskas, “Concept of intelligent solid-state street lighting technology,” Electron. Electrotech. **18**, 37–40 (2012).
- P7. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, and M. S. Shur, “Polychromatic solid-state light sources for the control of colour saturation of illuminated surfaces,” PCT Publ. No WO2013009157 (2013).
- P8. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, and A. Zabaliūtė, “Solid-state sources of light for preferential colour rendition,” Patent App. No. PCT/LT2013/000004 (2013).
- P9. **Tuzikas**, A. Liu, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Petrulis, and M. S. Shur, “Displaying artwork with tunable colour quality,” in *Proceedings of the 12th Congress of the International Colour Association*, L. MacDonald, S. Westland, and S. Wuerger eds., vol. 1, pp. 43–46 (2013).
- P10. A. Liu, **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, and M. Shur, “Color preferences revealed by statistical color rendition metric,” Proc. SPIE **8835**, 883508 (2013).
- P11. A. Liu, **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, and M. S. Shur, “Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine,” IEEE Photonics J. **5**, 6801010 (2013).

- P12. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, R. Stanikūnas, A. Švegžda, P. Eidikas, and P. Vitta, “Firelight LED source: Toward a balanced approach to the performance of solid-state lighting for outdoor environments,” *IEEE Photonics J.* **6**, 8200316 (2014).
- P13. V. Viliūnas, H. Vaitkevičius, R. Stanikūnas, P. Vitta, R. Bliumas, A. Auškalnyte, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, L. Dabašinskas, and A. Žukauskas, “Subjective evaluation of luminance distribution for intelligent outdoor lighting,” *Lighting Res. Technol.* **46** 421–433 (2014).
- P14. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, P. Vitta, A. Petrulis, “Daugiaspalviai kietakūniai šviesos šaltiniai skirti fotochemiškai jautrių objektų apšvietimui,” (2014) (Patent Application submitted to Lithuanian Patent Bureau).
- P15. **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, P. Vitta, and M. S. Shur, “Artwork visualization using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety,” *Opt. Express* **22**, 16802–16818 (2014).
- P16. **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, P. Vitta, and M. Shur, “Smart lighting engine for artwork-specific illumination with controlled photochemical safety,” in *Proceedings of the 14th International Symposium on Science and Technology of Lighting* (2014).
- P17. A. Petrulis, **A. Tuzikas**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, and A. Žukauskas, “Validation of the Kruithof rule in an outdoor environment using a smart solid-state lighting engine,” in *Proceedings of the 14th International Symposium on Science and Technology of Lighting* (2014).

Pranešimai konferencijose

- C1. P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, and M. S. Shur, “Colour rendition engineering by a tetrachromatic solid-state lamp,” *7th International New Exploratory Technologies Conference* (Turku, Finland, October 19-21, 2010). *Conference Proceedings*, p. 89 (oral presentation).
- C2. R. Stanikūnas, A. Švegžda, H. Vaitkevičius, P. Vitta, **A. Tuzikas**, I. Reklaitis, and A. Žukauskas, “Visual search strategies in the contrast sensitivity task in mesopic and photopic conditions,” *16th European Conference on Eye Movements* (Marseille, France, August 21-25, 2011), *J. Eye Mov. Res.* **4**(3), p. 160 (poster presentation).

- C3. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, P. Vitta, and M. S. Shur, “Statistical approach to color rendition properties of solid state light sources,” *11th International Conference on Solid State Lighting SPIE Optics+Photonics* (San Diego, California, USA, August 22-24, 2011). *Optical Engineering+Applications, Technical Summaries*, p. 30 (poster presentation).
- C4. P. Vitta, R. Stanikūnas, **A. Tuzikas**, I. Reklaitis, A. Stonkus, A. Petrulis, H. Vaitkevičius, and A. Žukauskas, “Energy-saving approaches to solid state street lighting,” *11th International Conference on Solid State Lighting SPIE Optics+Photonics* (San Diego, California, USA, August 22-25, 2011), *Optical Engineering+Applications, Technical Summaries*, p. 24 (poster presentation).
- C5. **A. Tuzikas**, “Color rendition engineering,” *13th International Conference-School Advanced Materials and Technologies* (Palanga, Lithuania, August 27-31, 2011). *Programme and Abstract Book*, p. 85 (poster presentation).
- C6. P. Vitta, **A. Tuzikas**, D. Meškauskas, I. Reklaitis, R. Stanikūnas, H. Vaitkevičius, A. Žukauskas, “Energijos taupymo būdai naudojant sumanų kietakūnį gatvių apšvietimą”, *39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija* (Vilnius, Lithuania, October 6-8, 2011). *Programa ir pranešimų tezės*, p. 33 (oral presentation).
- C7. **A. Tuzikas**, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Petrulis, A. Žukauskas, M. S. Shur, “Apšvietimo spalvinės kokybės valdymas kietakūniu šviesos šaltiniu”, *39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija* (Vilnius, Lithuania, October 6-8, 2011). *Programa ir pranešimų tezės*, p. 28 (oral presentation).
- C8. P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, and M. S. Shur, “Lighting engine for art and museum display,” *13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting* (Troy, NY, USA, June 24-29, 2012). *Conference Program and Paper Abstracts*, p 32 (oral presentation).
- C9. P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, and M. S. Shur, “Illumination with tuneable polychromatic LED clusters: Finding individual preferences to colour rendering,” *9th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices* (Berlin, Germany, July 22-27, 2012). *Programme and Abstract Book*, p. 141 (oral presentation).
- C10. **A. Tuzikas**, P. Vitta, A. Petrulis, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, and M. S. Shur, “Solid-state lighting for conserving and intelligent art display,” *9th International*

- Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices* (Berlin, Germany, July 22-27, 2012). *Programme and Abstract Book*, p. 178 (oral presentation).
- C11. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, A. Zabaliūtė, and P. Vitta, “Solid- state sources of light for mesopic illumination with minimized circadian action,” *Renewable Energy and the Environment Optics and Photonics Congress* (Eindhoven, Netherlands, November 11-14, 2012). *Programme and Abstract Book*, p. JT5A.4 (oral presentation).
- C12. A. Liu, **A. Tuzikas**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, A. Žukauskas, and M. S. Shur, “Cultural effect on the preferred color quality of illumination revealed by a color rendition engine,” *Renewable Energy and the Environment Optics and Photonics Congress* (Eindhoven, Netherlands, November 11-14, 2012). *Programme and Abstract Book*, p. JT5A.3 (oral presentation).
- C13. A. Zabaliūtė, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, and A. Žukauskas, “Kietakūniai šviesos šaltiniai, pasižymintys pirmenybine spalvų atgava”, *40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija* (Vilnius, Lithuania, June 10-12, 2013). *Programa ir pranešimų tezės*, p. 95 (poster presentation).
- C14. A. Petrulis, P. Eidikas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, R. Vaicekauskas, R. Stanikūnas, A. Švegžda, A. Žukauskas, “Kietakūniai mezopiniai šviesos šaltiniai, skirti fotobiologiškai draugiškam apšvietimui”, *40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija* (Vilnius, Lithuania, June 10-12, 2013). *Programa ir pranešimų tezės*, p. 171 (poster presentation).
- C15. **A. Tuzikas**, A. Liu, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Petrulis, M. S. Shur, “Dailės kūrinių eksponavimas, esant derinamai apšvietimo spalvinei kokybei”, *40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija* (Vilnius, Lithuania, June 10-12, 2013). *Programa ir pranešimų tezės*, p. 9 (oral presentation).
- C16. **A. Tuzikas**, A. Liu, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Petrulis, and M. S. Shur, “Displaying artwork with tuneable colour quality,” *12th Congress of the International Colour Association* (Newcastle upon Tyne, UK, July 8–12, 2013). *Book of Abstracts*, p. 20 (oral presentation).
- C17. **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, and R. Vaicekauskas, “Enhancing aesthetic pleasure for paintings with tuneable colour quality,” *15th International Conference - School*

- Advanced Materials and Technologies* (Palanga, Lithuania, August 27-31, 2013). *Programme and Abstract Book*, p. 98 (poster presentation).
- C18. A. Žukauskas, V. Viliūnas, H. Vaitkevičius, R. Stanikūnas, P. Vitta, R. Bliumas, A. Auškalnytė, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, and L. Dabašinskas, “Investigation of the subjective factors for the assessment of luminance distributions of intelligent outdoor lighting installations,” *10th Biennial Conference on Environmental Psychology* (Magdeburg, Germany, September 22-25, 2013). *Time Schedule & Abstracts*, pp. 199–200 (poster presentation).
- C19. A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, **A. Tuzikas**, A. Petrulis, P. Eidikas, A. Zabaliūtė, R. Stanikūnas, and A. Švegžda, “Photobiologically safe and psychophysically acceptable firelight LEDs for outdoor lighting,” *10th Biennial Conference on Environmental Psychology* (Magdeburg, Germany, September 22-25, 2013). *Time Schedule & Abstracts*, p. 63 (poster presentation).
- C20. P. Vitta, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Eidikas, A. Zabaliūtė, R. Stanikūnas, A. Švegžda, **A. Tuzikas**, and A. Petrulis, “Extra low colour temperature solid-state sources for artificial night lighting,” *1st International Conference on Artificial Light at Night* (Berlin, Germany, October 28-30, 2013). *Abstract Book*, p. 111 (oral presentation).
- C21. 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 Applications* (Pacifico Yokohama, Japan, April 22-24, 2014). *Extended Abstracts*, p. 24p-LEDp6-32 (poster presentation).
- C22. A. Petrulis, **A. Tuzikas**, P. Vitta, R. Vaicekauskas, and A. Žukauskas, “Validation of the Kruthof rule in an outdoor environment using a smart solid-state lighting engine,” *14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting* (Como, Italy, June 22-27, 2014). *LS14 Conference Program*, CP117 (poster presentation).
- C23. **A. Tuzikas**, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, A. Petrulis, P. Vitta, and M. Shur, “Smart lighting for artworks with controlled photochemical safety,” *14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting* (Como, Italy, June 22-27, 2014). *LS14 Conference Program*, CP75 (poster presentation).

- C24. P. Vitta, R. Vaicekauskas, P. Eidikas, A. Zabiliūtė, R. Stanikūnas, A. Švegžda, **A. Tuzikas**, and A. Žukauskas, “Fire-light LEDs for blue-balanced outdoor lighting,” *13th International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems SPIE Optics+Photonics* (San Diego, California, USA, August 17-21, 2014). *Conference Program*, Paper 9190-13 (oral presentation).
- C25. **A. Tuzikas**, A. Petrulis, R. Vaicekauskas, M. S. Shur, and A. Žukauskas, “Smart restorative illumination of artwork and museum exhibits,” *13th International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems SPIE Optics+Photonics* (San Diego, California, USA, August 17-21, 2014). *Conference Program*, Paper 9190-23 (oral presentation).

Gyvenimo, mokslinės ir kūrybinės veiklos aprašymas (CV)

Vardas: Arūnas
Pavardė: Tuzikas
Gimimo data: 1983 10 03
Gimimo vieta: Klaipėda
Tautybė: lietuvis
El. paštas: arunas.tuzikas@tmi.vu.lt

Išsilavinimas

2000-2002 Klaipėdos „Vėtrungės“ gimnazija.
2002-2006 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas (bakalauro laipsnis).
2008-2010 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas (magistro laipsnis, Cum Laude).
2010-2014 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas (doktorantas).

Mokslinės stažuotės

2011, 2012 Rensselaerio politechnikos institutas, Integrinės elektronikos centras
(Troja, Niujorko valstija, JAV).
2013 KaHo Sint-Lieven'o universitetas, Šviesos ir apšvietimo laboratorija
(Gentas, Belgija).

Darbo patirtis

2012-dabar
UAB „LEDigma“, Keramikų g. 1, LT-10233 Vilnius
Produktų plėtros direktorius

2010-dabar
VU Taikomųjų mokslų institutas, Saulėtekio al. 9, LT-10222 Vilnius
Jaunesnysis mokslo darbuotojas

2009-2010
UAB „Baltled“, Panerių g. 64, LT-03202 Vilnius,
Optoelektronikos inžinierius

2005-2009
UAB „Precizika metrology“, Žirmūnų g. 139, LT-09120 Vilnius
Elektronikos inžinierius

2003-2004
VU Taikomųjų mokslų institutas, Saulėtekio al. 10, LT-10222 Vilnius
Inžinierius