

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Ignas Reklaitis

**Pažangių nitridinių optoelektronikos prietaisų
kūrimas ir charakterizavimas**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08 T)

Vilnius 2016

Disertacija rengta 2011 – 2015 Vilniaus universiteto Taikomųjų mokslų institute bei Fizikos fakulteto Puslaidininkių fizikos katedroje.

Mokslinis vadovas – prof. dr. Roland Tomašiūnas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08 T).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkė – doc. dr. Renata Butkutė (Fizinių ir technologijų mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

Prof. dr. Michał Leszczyński (Varšuvos Aukšto slėgio fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

Prof. dr. Roaldas Gadonas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

Prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

Dr. Šarūnas Meškiniš (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama 2016 m. rugsėjo 26 d. 14⁰⁰ val. D401 auditorijoje Nacionaliniame fizinių ir technologijų mokslų centre, Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2016 m. rugpjūčio 22 d.

Su disertacija galima susipažinti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

Ignas Reklaitis

**Advanced III-nitride-based optoelectronic
devices: fabrication and characterization**

Summary of doctoral dissertation
Technological Science, Materials Engineering (08 T)

Vilnius 2016

Doctoral dissertation was prepared during the period of 2011-2015 years at Vilnius University Faculty of Physics and Institute of Applied Research.

Scientific supervisor – prof. dr. Roland Tomašiūnas (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08 T).

The thesis will be defended at the Vilnius University Materials Engineering council:

Chairman – doc. dr. Renata Butkutė (Center of Physical Science and Technology, Technological Science, Materials Engineering – 08T).

Members:

Prof. dr. Michał Leszczyński (Institute of High Pressure Physics, Technological Science, Materials Engineering – 08T),

Prof. dr. Roaldas Gadonas (Vilnius University, Technological Science, Materials Engineering – 08T),

Prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilnius University, Physical Science, Physics – 02P),

Dr. Šarūnas Meškiniš (Kaunas University of Technology, Technological Science, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended on 26th of September, 2016 at 2 PM in auditorium Nr. D401, at the National Center of Physical Science and Technology, Saulėtekio av. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania.

Summary of dissertation was sent on 22th of August, 2016.

The dissertation is available at the libraries of Vilnius University, Center of Physical Science and Technology and on the website:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Padėka

Visų pirma, dėkoju savo tėvams ir broliui už įkvėpimą ir paramą pradėti doktorantūros studijas. Esu labai dėkingas savo bakalauro ir magistrantūros studijų vadodui prof. Artūriui Žukauskui ir konsultantui dr. Pranciškui Vitta už jų nenuginčijamą indėlį formuojant mano kaip mokslininko ir eksperimentatoriaus įgūdžius. Branginu ne vieną padrašinintį žodį mano studijų metų išgirstą iš Pუსlaidininkų fizikos katedros vedėjo Gintauto Tamulaičio. Ypatingą padėką reiškiu savo doktorantūros studijų vadovui dr. Roland Tomašiūnui už parodytą pasitikėjimą sutinkant vadovauti mano doktorantūros darbui.

Esu labai dėkingas savo vyresniesiems kolegoms dr. Tadiui Malinauskui, dr. Arūnui Kadžiui, dr. Tomui Griniui, Reginai Beresnienei, Justinui Baužiui ir Gražinai Medeišienei už šiltą darbinę atmosferą. Dėkoju ir savo jaunesniesiems kolegoms Rolandui Kudžmai, Aurinai Arnatkevičiūtei, Mantui Dmukauskui, Mortai Marcinkutei, Eglei Bašinskaitei ir Bronislovui Razgui už jų indėlį į mano vykdytą tiriamąjį darbą. Taip pat dėkoju visiems straipsnių bendraautoriams už jų indėlį į bendrą rezultatą, kuris yra apibendrintas šioje disertacijoje.

Galiausiai nuoširdžią padėką reiškiu savo mylimai žmonai už jos kantrų palaikymą paskutiniame ir tuo pačiu sunkiausiame doktorantūros studijų etape - disertacijos rašyme.

1. Įvadas

Pasaulinis susidomėjimas III-grupės nitridais pasiekė kulminaciją po to kai buvo paskelbti 2014 m. Nobelio premijos lauretai fizikos srityje [1]. Tuo pačiu verta pastebėti, kad mokslininkų susidomėjimas šia tema kilo gerokai anksčiau. Nuo 1980-ųjų metų buvo stengiamasi surasti plačiatarpių puslaidininkių, tinkamų gaminti optoelektroninius arba didelės galios prietaisus. Daugelis tyrimų tuomet vyko su puslaidininkiais, tokiais kaip silicio karbidas, cinko oksidas, cinko selenidas ar deimantas, kurie atrodė labiau tinkami prietaisų gamybai, tačiau galiausiai GaN persverė svarstyklės ir tapo dominuojančiu moksliniams tyrimams ir komerciniams taikymams naudojamu plačiatarpiu puslaidininkiu. Nepaisant dominuojančio statuso ir įvertinimo Nobelio premija, GaN prietaisų technologija nėra tobula.

Vienas iš fundamentalių GaN technologijos iššūkių yra suderintų pagal gardelės konstantą padėklų, ant kurių galėtų būti vykdomas epitaksinio sluoksnio auginimas, stoka. Tai lėmė jog GaN technologija vykdoma hetero-epitaksijos būdu, dažniausiai ant itin pagal gardelės konstantą ir temperatūrinį plėtimosi koeficientą nesuderintų padėklų, pvz safyro, silicio karbido ar silicio. Natūralu, kad taip auginami sluoksniai pasižymi santykinai dideliu dislokacijų tankiu ($\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$), ribojančiu prietaisų darbinės charakteristikas.

Vyraujanti galio nitrido rinka yra InGaN/GaN kvantinių duobių pagrindu veikiantys šviestukai (angl. *Light emitting diode*, LED), kurie pradžioje savo vietą surado nišiniame apšvietime, o dabar vis giliau žengia ir į bendrojo apšvietimo sritį. Šviestukų veikimas yra pagrįstas elektroliuminescencijos reiškiniu, kurį pirmasis prieš daugiau nei 100 metų pastebėjo H.J. *Round* ir savo rezultatus paskelbė publikacijoje 1907 metais [2]. Šio reiškinio gilesniu tyrinėjimu užsiėmė O.V. *Losev*, apibendrinęs savo rezultatus 1928 metais [3]. Šie elektroliuminescencijos tyrimai buvo ilgokai primiršti, kol galiausiai, po 36 metų, 1962 metais, kelios nepriklausomos mokslininkų grupės vienu metu pranešė apie puslaidininkinio lazerio sukūrimą. Jo optiniam sužadanimui buvo naudojami galio arsenido pagrindu veikiantys prietaisai, kuriuos būtų galima laikyti šiuolaikinių šviestukų pirmtakais.

Artėja modernių šviestukų 55-metis, tačiau dėl geriausio būdo, kaip nu-

statyti užauginto GaN sluoksnio kokybę vertinant jo tinkamumą gamybos linijai, vis dar vyksta diskusijos. Paprastai epitaksinio sluoksnio charakterizavimas apima įprastus struktūrinius (skenuojančio elektronų pluoštelio mikroskopija, (angl. *Scanning electron microscope*, SEM), Rentgeno difraktometrija ir tt), elektrinius (voltfaradinį profiliavimą, Holo matavimus) ir optinius (stacionarūs fotoluminescencijos (angl. *Photoluminescence*, PL) matavimai ar matavimai su laikine skyra) metodus. Vienas paprasčiausių atlikimo ir rezultatų interpretavimo požiūriu yra foto liuminescencijos matavimas. PL matavimai su laikine skyra (angl. *Time-resolved photoluminescence*, TRPL), paprastai, atliekami bandinio sužaditimui naudojant trumpus lazerinius impulsus. Metodikos pagrindinis trūkumas, kad bandinio sužaditimo impulso galios tankis sukuria keliomis eilėmis didesnius nepusiausvyrųjų krūvininkų tankius, nei tuos, kurie yra pasiekiami įprastiniame šviestuko darbo režime. Taigi, charakterizavimo rezultatai yra ne iki galo korektiški. Gera alternatyva matavimams su laikine skyra yra PL matavimai su dažnine (angl. *Frequency domain lifetime measurement*, FDLM) skyra. Šiuo atveju, bandinio žaditimui dažniausiai naudojami pigūs, stabilūs ir tiesiogiai moduluojami šviestukai emituojantys trumpabangėje regimo ar ultravioletinio spektro srytyje. Vienas iš pagrindinių FDLM privalumų yra daug artimesnis įprastam optoelektroninio prietaiso darbo veikimui kvazi nenutrūkstamos veikos (angl. *Continuous wave*, CW), o ne impulsinis, bandinių sužaditimo režimas. Kone vienintelis šviestukinio sužaditimo trūkumas yra maža optinė galia, kuri savo ruožtu sukuria keliomis eilėmis mažesnius nepusiausvyrųjų krūvininkų tankius, nei tuos, kurie yra pasiekiami įprastiniame tiriamo šviestuko darbo režime. Šiame kontekste būtų itin patrauklu realizuoti paprastą ir nesudėtingą nepusiausvyrųjų krūvininkų gyvavimo trukmės matavimo būdą, kuris sugebėtų užpildyti šią sužaditimo intensyvumo spragą tarp dviejų egzistuojančių kraštutinių sužaditimo atvejų. Disertacijoje yra pristatoma tokia tyrimo metodika, taip pat eksperimentiniai rezultatai palyginami su abiem įprastais tyrimo būdais.

Nustačius, jog epitaksinio sluoksnio kokybė yra tinkama produkcijos linijai, jis gali būti panaudojamas puslaidininkinių prietaisų gamybai. Pirmas *Amano* bandymas šviestuką pagaminti GaN pagrindu rėmėsi *p*-tipo kontakto suformavimu ant epitaksinio sluoksnio viršaus, o *n*-tipo — ant darinio

šoninės sienelės. Tokia geometrija yra itin paprasta ir puikiai tinka greitam darinio patikrinimui, tačiau yra netinkama masinei produkcijai, kuri remiasi planarine prietaisų formavimo technologija. Tam kad GaN prietaisus būtų galima gaminti įprastiniu planariniu būdu, buvo pritaikyta sauso ėsdinimo technologija, nes dėl didelio kristalo cheminio inertiškumo, šlapių ėsdiklių atrasta nebuvo. Pagrindinis šio gaminimo metodo trūkumas — būtinybė naudoti brangų ir laikui imlų fotolitografijos procesą, kuris atsiperka nebent masinės produkcijos atveju, nes litografijos šablonų gamyba yra resursams imlus procesas. Šiuo požiūriu, būtų patrauklu jei egzistuotų paprasta alternatyva fotolitografijai, pavienių protipų ar nedidelio kiekio nišinių prietaisų formavimui. Mokslo tiriamosios laboratorijos visame pasaulyje siūlo įvairius šios problemos sprendimus, tokius kaip bešablonę elektronų ar jonų pluoštelio bei lazerinę litografiją, tai leidžia išvengti būtinybės gaminti fotolitografijos šablonus. Disertacijos autorius atliko tiriamąjį darbą šioje srityje ir pasiūlė naują tiesioginio GaN šviestukų prototipo gamybos metodą panaudodamas ultratrumpų lazerinių impulsų abliaciją. Pristatomame darbe šiuo būdu sukurto prietaiso savybės yra palygintos su įprastiniu būdu pagamintu LED.

Natūralu, kad pagamintą prietaisą reikia charakterizuoti. Tam atlikti, kaip ir epitaksinių sluoksnių charakterizavimo atveju, yra pasiūlytas ne vienas metodas. Dažniausiai yra naudojami liuksamperiniai, voltamperiniai, išorinio kvantinio našumo (angl. *External quantum efficiency*, EQE) ar elektroliuminescencijos (EL) matavimai. Paskutiniu metu yra daug diskutuojama apie InGaN pagrindu veikiančių šviestukų išorinio kvantinio našumo kritimą (angl. *droop*), didinant tiesioginę prietaisu tekančią srovę. Šio reiškinių interpretacijai dažnai yra taikomas vadinamasis ABC modelis. Taigi, būtų pravartu jei egzistuotų paprastas metodas leidžiantis eksperimentiškai įvertinti *Shockley-Read-Hall* (A), bimolekulinį (B) ir Ožė (C) rekombinacijos koeficientus, kas įgalintų įvertinti įrenginio efektyvumą, bei jį ribojančius faktorius. Nors toks metodas jau egzistuoja — mažo sužadavimo PL matavimai su laikine skyra (angl. *Small-signal time-resolved photoluminescence*, SSTRPL), kurie leidžia įvertinti veikiančio šviestuko vidinį kvantinį našumą (angl. *Internal quantum efficiency*, IQE) ir ABC koeficientus, neatliekant sudėtingų matavimo absoliutiniais vienetais, t.y.

nerieikia naudoti integruojančios sferos ir kalibruotų matavimo prietaisų — tai nėra optimalus siekiant šio tikslo. Žymesnis metodo trūkumas yra matavimo trukmė. Vienas matavimas užtrunka valandas ir reikalauja brangios sužadavimo bei detektavimo sistemos. Taigi, tolesnis matavimo technikos plėtojimas tam, kad ABC ir IQE koeficientų nustatymas būtų dar paprastesnis vis dar yra aktualus GaN tyrėjų bendruomenei. Šio tikslo įgyvendinimui disertacijos autorius sugebėjo pritaikyti matavimų su dažnine skyra įrangą, kad realizuotų veikiančio šviestuko charakteristikų tyrimą mažam sužadavimui panaudojant violetinį lazerinį diodą (angl. *Laser diode*, LD).

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas buvo patobulinti šiuo metu naudojamus procesus InGaN šviestukų gamyboje, tokius kaip: epitaksinių darinių charakterizavimą, prietaisų prototipų gamybą ir veikiančių diodų charakterizavimą, bei praktiškai ištirti siūlomų metodų veikimą. Siekiant įgyvendinti užsibrėžtą tikslą, buvo nustatyti tokie uždaviniai:

1. Išplėtoti ir patikrinti InGaN/GaN epitaksinių sluoksnių matavimo metodiką, besiremiančią fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimais. Metodikai keliami reikalavimai — rezonasinis kvantinių duobių sužadavimas bei padidintas optinio sužadavimo tankis, iki verčių palyginamų su veikiančio prietaiso elektriškai sukuriamu sužadavimu.
2. Sukurti paprastesnį GaN šviestukų prototipų gamybos metodą, apimančią būtinybę naudoti fotolitografijos procesą, panaudojant ultratrupus lazerinius impulsus.
3. Pritaikyti fotoluminescencijos su dažnine skyra metodiką, esant mažo sužadavimo sąlygai (angl. *Small-signal frequency-domain lifetime measurements*, SSFDLM), taip išplečiant veikiančio šviestuko *Shockley-Read-Hall*, spindulinės bei Ožė rekombinacijos koeficientų nustatymo tikslumą.

Darbo naujumas ir svarba

Nors GaN ir jo dariniai jau tikrai nėra nauja tyrimų sritis, tačiau ji vis dar susilaukia didėjančio mokslinės bendruomenės dėmesio. Šį susidomėjimą sąlygoja tai, jog nėra iki galo suprasti procesai ribojantys prietaisų efektyvumą. Tai pasakytina apie visas gamybos grandis, tiek užauginto sluoksnio kokybės vertinimą, tiek prietaisų gaminimą ar jau veikiančio šviestuko parametrų tyrimą.

Šiame darbe du kraštiniai InGaN šviestukų epitaksiniai dariniai, spinduliuojantys šviesą mėlynojoje ir žaliojoje spektro srityse, buvo ištirti panaudojant fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimo metodą. Eksperimentinė įranga buvo patobulinta violetinį lazerinį diodą panaudojant kaip žadinimo šaltinį, užtikrinantį rezonansinį kvantinių duobių sužadinimą ir leidžiantį tyrimą atlikti sąlygomis artimomis veikiančiam šviestukui.

Femtosekundinio lazerio abliacijos procesas naudojant pusiau planarinę prietaisų formavimo geometriją, leido sukurti norimos geometrijos veikiančių šviestuko prototipą, išvengiant būtinybės naudotis fotolitografijos procesu.

Fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimo stendo pertvarkymas į mažo sužadinimo matavimo režimą (SSFDM) leido eksperimentiškai nustatyti veikiančio šviestuko diferencinę krūvininkų gyvavimo trukmę greičiau ir platesniame srovių intervale, nei tai galima padaryti naudojant įprastą mažo signalo matavimo metodą su laikine skyra (SSTRPL).

Ginamieji teiginiai

1. Violetinio lazerinio diodo pritaikymas InGaN kvantinių duobių fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimo metodikoje leidžia iki 15 W/cm^2 vertės padidinti InGaN epitaksinių darinių tyrimų sužadinimo galios tankį, o tai kelia ir tyrimų rezultatų aktualumą.
2. Pusiau planarinė nitridinių šviestukų formavimo ultratrumpais impulsais technologija, apeinanti būtinybę naudotis fotolitografijos procesu ir brangiais šablonais, įgalina gaminti šviestukų prototipus pigiau ir iki 50 % sparčiau.
3. Naujai išplėtotu mažo fotoluminescencijos signalo su dažnine skyra

matavimo būdu nustatyti veikiančio InGaN šviestuko rekombinacinių kanalų koeficientai sutampa su tais, kurie buvo nustatyti mažo fotoluminescencijos signalo matavimo su laikine skyra metodu. Taip pat matavimus su dažnine skyra buvo galima atlikti esant iki 50 kartų mažesniems bandinio sužadavimo lygiams, nei pasitelkiant mažo signalo fotoluminescencijos matavimus su laikine skyra.

2. Disertacijos santrauka

Disertaciją sudaro VI skyriai. Ji prasideda įvadu, kurio turinys atitinka ir šios santraukos įvado turinį. Jį seką skyrius skirtas aptarti doktorantūros studijų metu tirtus bandinius. Trečiame skyriuje aprašomas šviesos diodų darinių fotoluminescencijos tyrimo metodas su dažnine skyra ir eksperimentiniai rezultatai. Tolimesniame skyriuje aprašomi šviestuko prototipo formavimo rezultatai. Penktasis disertacijos skyrius yra skirtas veikiančio šviestuko charakteristikų tyrimų aptarimui. Galiausiai, atskiru skyriumi yra apibendrinamos eksperimentinių rezultatų svarbiausios išvados.

2.1 Bandiniai

Renkantis disertacijos temą buvo planuojama tyrinėti Lietuvoje išaugintus bandinius, tačiau galiausiai visi tirti bandiniai buvo įsigyti iš užsienio mokslo tiriamųjų įmonių. Taip nutiko dėl kol kas dar nestipriai išvystytos vietinės puslaidininkų inžinerijos infrastruktūros. Sugedus vieninteliam nitridinių epitaksinių sluoksnių auginimo aparatui, neretai keletą mėnesių trukdavo jo remonto darbai. Sukantis iš šios padėties, tyrimams buvo panaudojami kitų institucijų išauginti bandiniai. Deja, kaip yra įprasta tokiais atvejais, sluoksnių augintojai apie gautus bandinius pateikia itin mažai informacijos.

Dvi modernios InGaN/GaN šviestukų epitaksinės struktūros buvo suteiktos partnerių iš Europos komisijos finansuojamo projekto FP7-ICT project No. FP7-318388 „NEWLED“ ir naudotos epitaksinių sluoksnių tyrimui PL su dažnine skyra metodu. Abi struktūros buvo išaugintos OSRAM Opto Semiconductors GmbH Vokietijoje, metalo organikos nusodinimo iš garų fazės (angl. *Metalorganic chemical vapour deposition*, MOCVD) būdu ant safyro padėklų. Šių bandinių emisijos smailės buvo ties 450 nm ir 530 nm, toliau santraukoje jie įvardinami, kaip „mėlynasis“ ir „žaliojo“ bandiniai, atitinkamai. Abiejų bandinių aktyviąją sritį sudarė 5 kvantinės duobės ir barjerai (duobės storis 3 nm, o barjero 5 nm). Iš PL spektro matuojant kambario ir 10 K temperatūrose, buvo nustatyta, jog „mėlynojo“ bandinio vidinis kvantinis našumas IQE yra 57 %, o „žaliojo“ — 28 %.

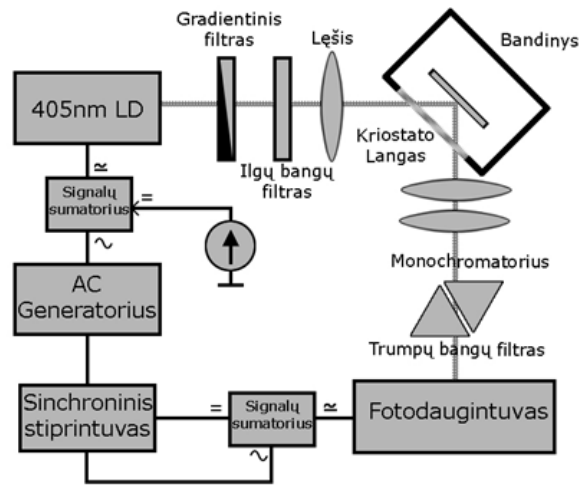
Bandinys naudotas LED prototipo gamybai buvo nusipirktas iš japonų įmonės Nitride Semiconductors Co. Ltd. Aktyvųjų sluoksnių čia taip pat sudarė 5 InGaN/GaN kvantinės duobės, kurios MOCVD būdu buvo suformuotos ant safyro padėklo. Iš šios struktūros buvo suformuotos dvi partijos šviestukų, viena — naudojant lazerinę abliaciją, o kita — pasitelkiant įprastą fotolitografijos ir sauso išdžiovymo procedūrą Cl_2 ir Ar dujų plazma, šviestukų *mesa* struktūrų formavimui. Bandinio fotoluminescencijos spektro smailė buvo ties 456 nm, o nustatytas *IQE* siekė 17 %.

Veikiančio šviestuko Shockley-Read-Hall, spindulinės bei Ožė rekombinacijos koeficientai buvo nustatyti GaN diodui, kuris, partnerių iš Vokietijos OSRAM Opto Semiconductors GmbH, buvo užaugintas MOCVD būdu, lustas suformuotas naudojant fotolitografiją ir sausą išdžiovimą, bei supakuotas į komerciškai naudojamą *Golden Dragon+* LED korpusą. Šis bandinys buvo specialiai pagamintas tam, kad būtų galima palyginti SSTRPL ir SSFDLM matavimus. Prieš pradėdant SSFDLM matavimus Lietuvoje, SSTRPL matavimai buvo atlikti *Technische Universität Berlin*. Šviestuko EL emisijos smailė buvo ties 445 nm.

2.2 „Mėlynosios“ ir „žaliosios“ InGaN šviestukų epitaksinių struktūrų liuminescencijos gesimo trukmės matavimai su dažnine skyra

Krūvininkų gyvavimo trukmę yra įprasta laikyti vienu pagrindiniu, puslaidininkį charakterizuojančiu, parametru [4]. Nors pirmieji liuminescencijos gesimo trukmės matavimai buvo atlikti naudojantis dažninės skyros metodu [5] (angl. *Frequency-domain lifetime measurements*, FDLM), tačiau vystantis lazeriams, matavimai su laikine skyra [6] (angl. *Time-resolved photo luminescence*, TRPL) tapo vyraujančiu matavimo būdu. FDLM matavimai pasižymi itin žemais sužadavimo galios tankiais [7], tuo tarpu TRPL atveju vyrauja itin didelio sužadavimo tankio sąlygos [8]. Šiame skyrelyje aptarti tyrimai, kurių metu buvo kuriama matavimo metodika, leidžianti bent dalinai užpildyti susidarantį sužadavimo tankių tarpą tarp dviejų dažnai naudojamų matavimo metodų, tam kad žadinimo sąlygas priartintume prie tiriamam prietaisui — šviestukui — įprastų veikimo sąlygų.

2.2.1 Eksperimentinė metodika



2.1 pav. Eksperimento schema, naudota atliekant PL matavimus su dažnine skyra [P2].

Taikomųjų mokslų institute naudojama eksperimento schema [9] buvo pakoreguota, pašalinant dichroinį veidrodį, o sužadanimui vietoje ultravioletinio LED panaudojant violetinį LD (žr. 2.1 pav.). Toks pakeitimas, neskaitant padidėjusio spinduliuotės intensyvumo, leido realizuoti rezonansinę InGaN/GaN kvantinių duobių sužadimą, kuomet visa LD spinduliuotė yra sugerama duobės srityje, o apvaskaliniai sluoksniai lieka pusiausvyros būsenos. Kadangi kolimuota lazerio spinduliuotė neužtikrino norimo galios tankio, ji į bandinio paviršių buvo fokusuojama sferiniu lęšiu. LD buvo tiekama pastovi srovė, užtikrinanti jo darbą tiesinėje liuksamperinės charakteristikos srityje. Taip pat per signalų sumatorių buvo teikiama ir harmoniškai kintanti srovės komponentė. Tokiu būdu harmoniškai moduluota lazerio spinduliuotė sužadindavo bandinį patalpintą į kriostatą ir dėl baigtinės liuminescencijos gesimo trukmės, tarp atraminio moduliacijos signalo ir to, kurį užregistruodavo fotodaugintuvas (angl. *Photo multiplier tube*, PMT) susidarydavo fazės poslinkis. Jis buvo registruojamas vienu iš dviejų sinchroninių stiprintuvų, priklausomai nuo moduliacijos dažnio: nuo 1 Hz iki 100 kHz naudotas SIGNAL RECOVERY, o nuo 50 kHz iki 100 MHz STANFORD RESEARCH SYSTEMS. Tai užtikrino dinaminį gesimo trukmių matavimo diapazoną nuo 160 ms iki 1.6 ns. Dėl stebimo sudėtingo, ne

eksponentinio liuminescencijos gesimo dėsnio, rezultatų analizei buvo keičiami parametrai bendroje liuminescencijos intensyvumo priklausomybės nuo laiko lygtyje (2.1). Tuomet naudojant greitąją Furjė transformaciją [10] modelis buvo susiejamas su eksperimentiniais rezultatais.

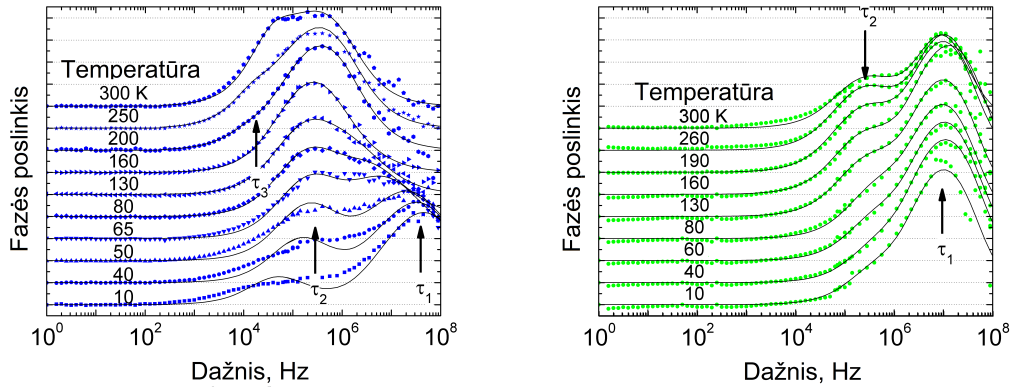
$$I(t) = A_1 \cdot e^{(-\frac{t}{\tau_1})^{\beta_1}} + A_2 \cdot e^{(-\frac{t}{\tau_2})^{\beta_2}} + A_3 \cdot e^{(-\frac{t}{\tau_3})^{\beta_3}}, \quad (2.1)$$

čia A_1 , A_2 ir A_3 yra prieš-eksponentiniai daugikliai, τ_1 , τ_2 ir τ_3 yra gesimo trukmės, o β_1 , β_2 ir β_3 yra eksponentinės funkcijos plėtimo (angl. *Stretching*) parametras [11]. Matavimų rezultatai buvo palyginti su TRPL matavimais bandinius žadinant EKSPLA YAG:Nd³⁺ lazeriu (impulso trukmė 30 ps) liuminescenciją registruojant ICCD kamera su laikine ir erdvine skyra (angl. *Streak camera*).

2.2.2 Eksperimentiniai rezultatai

Matavimų rezultatuose, ypač „mėlynojo“ bandinio atveju, buvo stebimas sinfazinio fono pasireiškimas, sąlygotas parazitinės mėlynosios srities LD emisijos. Jo įtaka buvo pašalinama matematiškai remiantis [12]. Tyrimai buvo pradėti bandinio gesimo trukmės priklausomybės nuo temperatūros matavimais. Dalis eksperimentinių rezultatų kartu su sumodeliuotomis kreivėmis yra pateikti 2.2 paveiksle, kuriame matoma, jog „mėlynojo“ bandinio atveju galima išskirti tris skirtingus rekombinacijos kanalus, tuo tarpu „žaliajame“ bandinyje stebimi tik du. Patyręs eksperimentatorius iškart pastebėtų, kad naudojant funkciją turinčią 9 kintamuosius, ją galima sutapatinti beveik su bet kokiais eksperimentiniais rezultatais. Šiuo atveju yra ne visai taip. Žinant jog „plėtimo“ koeficientas yra laikomas sistemos netvarkos matu [13], nustčius β koeficientus kiekvienam iš rekombinacinių kanalų, jų vertės buvo laikomos konstantomis. „Mėlynojo“ bandinio atveju nustatyta, jog $\beta_3 = 0.49 \pm 0.02$, $\beta_2 = 0.61 \pm 0.01$, o $\beta_1 = 1 \pm 0.02$, tuo tarpu „žaliajam“ bandiniui — $\beta_2 = 0.91 \pm 0.03$, o $\beta_1 = 0.59 \pm 0.02$. Šios vertės gerai sutampa su β vertėmis nustatytomis iš TRPL: $\beta_{melynasis} = 0.47$ ir $\beta_{zaliasis} = 0.54$ bei palyginama su verte $\beta_{lit} = 0.59 \pm 0.05$ žinoma iš literatūros [13]. Taip pat, kaip yra matoma 2.2 paveiksle, vienu metu, net „mėlynojo“ bandinio atveju, reikšmingai pasireiškia tik du kanalai. Žinant, kad prieš-eksponentinių daugiklių suma yra lygi vienetui, galima apibendrinti jog dauguma eksper-

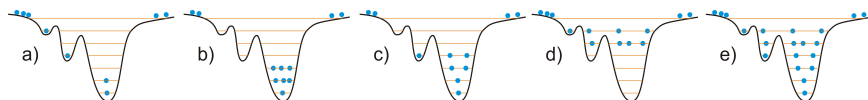
imentinių rezultatų buvo aprašomi teorinėmis kreivėmis turinčiomis tik 3 nepriklausomus kintamuosius.



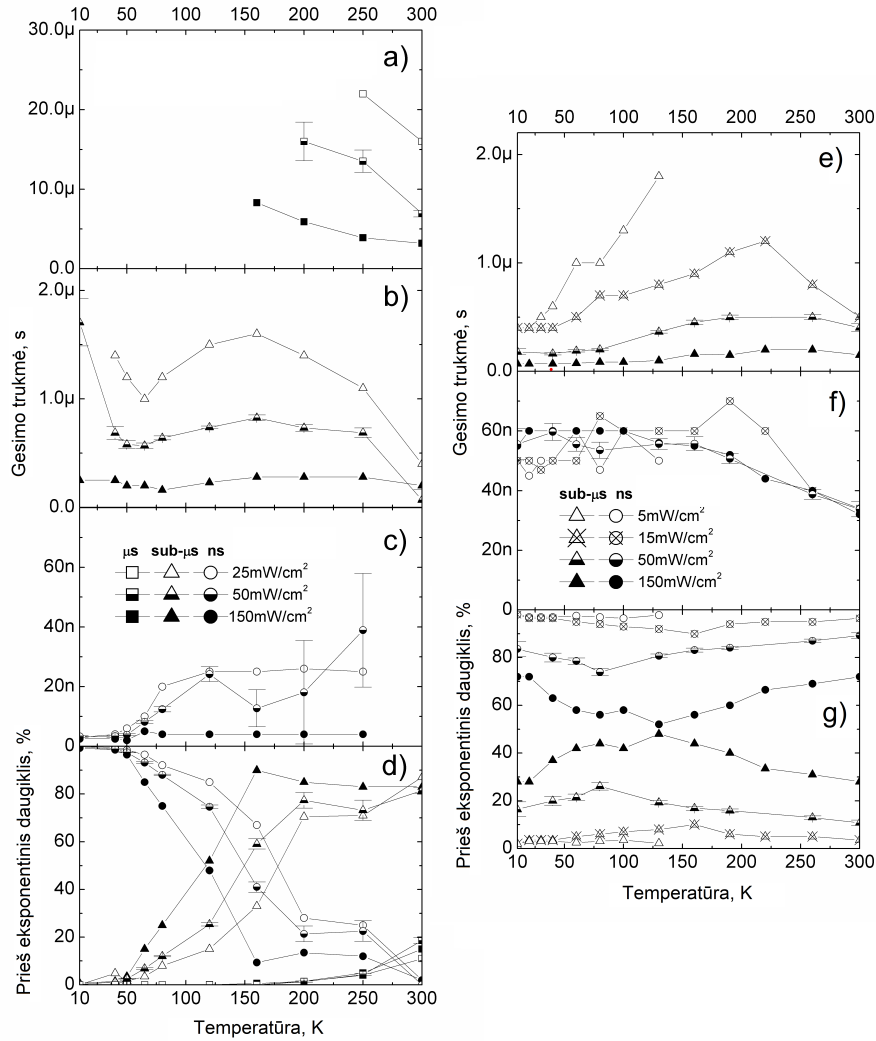
2.2 pav. „Mėlynojo“ (kairėje pusėje) ir „žaliojo“ (dešinėje) bandinių eksperimentinių FDLM matavimų (pažymėta taškais), esant 50 mW/cm² sužadavimo galios tankiui, ir modeliavimo (išsitiesinės linijos) rezultatų palyginimas, kaip funkcija nuo bandinių temperatūros [P2].

Yra žinoma iš [14], kad liuminescencijos gesimo trukmės priklausomybė nuo temperatūros suteikia naudingos informacijos apie spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos mechanizmus InGaN/GaN kvantinėse duobėse. Eksperimentinių rezultatų (žr. 2.4 pav.) paaiškinimui buvo taikomas modelis [15], kuris yra artimas S-formos PL smailės kitimo nuo temperatūros aiškinimui. Žemoje temperatūroje, krūvininkai yra atsitiktinai pasiskirstę lokaliuose potencialo dugnuose (žr. 2.3 a pav.). Temperatūrai kylant, krūvininkai gali įveikti nedidelius potencialo barjerus ir susikaupia globaliame potencialo dugne (žr. 2.3 b pav.) [16, 17]. Toliau kylant temperatūrai (žr. 2.3 c,d pav.) ar didėjant sužadimui (žr. 2.3 e pav.), yra stebimas krūvininkų persiskirstymas.

Taip pat buvo atliktas ir kabario temperatūros bandinių liuminescencijos gesimo trukmės priklausomybės nuo sužadavimo galios tankio tyrimas, kurio



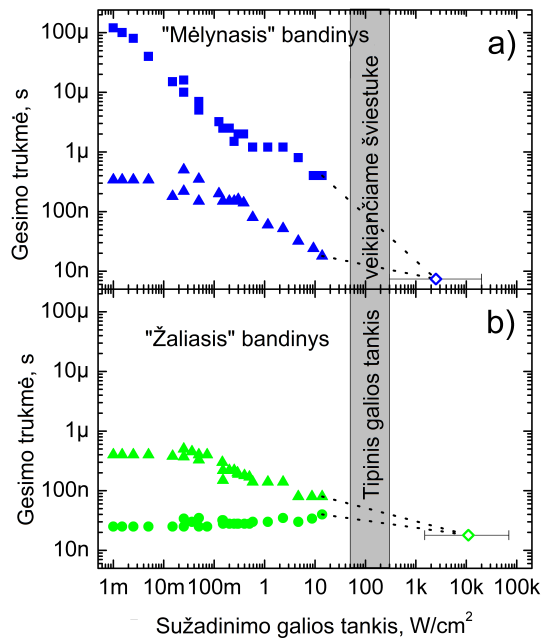
2.3 pav. Krūvininkų persiskirstymo, priklausomai nuo bandinio temperatūros, kvantinės duobės potencialo fliuktacijose schema, remiantis Wang pasiūlytu modeliu [15] (a)-(d) ir krūvininkų delokalizacija pasiekta padidinus bandinio sužadavimo intensyvumą (e) [P2].



2.4 pav. Kairėje: PL gesimo trukmių nanosekundiniame (τ_1 (c)), submikrosekundiniame (τ_2 (b)) ir mikrosekundiniame (τ_3 (a)) diapazone bei priešeksponentinių daugiklių A_1 (apskritimai), A_2 (trikampiai), A_3 (kvadratai) (d) priklausomybės nuo temperatūros, „mėlynąjį“ bandinį žadinant 25 (tuščiaiduriai taškai), 50 (pusiau tuščiaiduriai taškai) ir 150 mW/cm² (pilnaviduriai taškai) galios tankiu. Dešinėje: PL gesimo trukmių nanosekundiniame (τ_2 (f)) ir submikro-sekundiniame (τ_1 (e)) diapazone bei priešeksponentinių daugiklių A_1 (apskritimai), A_2 (trikampiai) (g) priklausomybės nuo temperatūros, „žaliąjį“ bandinį žadinant 5 (tuščiaiduriai taškai), 15 (nubraukti taškai), 50 (pusiau tuščiaiduriai taškai) ir 150 mW/cm² (pilnaviduriai taškai) galios tankiu. Paklaidos nustatytos atliekant χ^2_R paviršių analizę ir pateiktos tik 50 mW/cm² sužadinimams. Išsines linijos skirtos išryškinti bendrą tendenciją [P2].

rezultatai pavaizduoti 2.5 paveiksle. Stebimas gesimo trukmės mažėjimas paaškinamas didėjančiu krūvininkų tankiu (žr. 2.3 e pav.), dėl kurio jie gali

persiskirstyti įveikdami potencialo barjerus ir sparčiau pasiekti rekombinacinius centrus. Šiuo atveju prieš-eksponentinių daugiklių vertės atvirkščiai proporcingos gesimo trukmei. Gesimo trukmėms vienodėjant, vienodėja ir prieš-eksponentinių daugiklių vertės. Tikėtina rekombinacijos dėsnio evoliucija yra tokia — toliau didinant sužadinimo tankį, lėtesni gesimo kanalai įsisotina ir tuomet išsivyrąja rekombinacija per sparčiausią kanalą. Tai patvirtinta TRPL matavimais, kuomet išmatuota kinetika aprašoma vienos išplėtos eksponentės gesimo dėsnio.



2.5 pav. PL gesimo trukmių priklausomybė nuo LD sužadinimo galios tankio, bandiniams esant kambario temperatūros. „Mėlynojo“ (a) LED darinio gesimo trukmės τ_2 (pažymėta trikampaiais) ir τ_3 (kvadratais) (τ_1 trukmė nepavaizduota, nes kambario temperatūroje jos indelis nykstamai mažas, kaip yra matoma iš 2.4 d pav.). „Žaliojo“ (b) bandinio gesimo trukmės τ_1 (apskritimai) ir τ_2 (trikampiai). Kryželiu pažymėta gesimo trukmė, nustatyta naudojant ultravioletinį LED bandinio sužadinimui, kaip aprašyta [18], tuo tarpu tuščiaviduriu rombu pažymėtos gesimo trukmės, išmatuotos naudojant TRPL matavimo būdą. Pilkai užtušuota sritis žymi sužadinimo lygį, pasiekiamą veikiančiame šviestuke [P2].

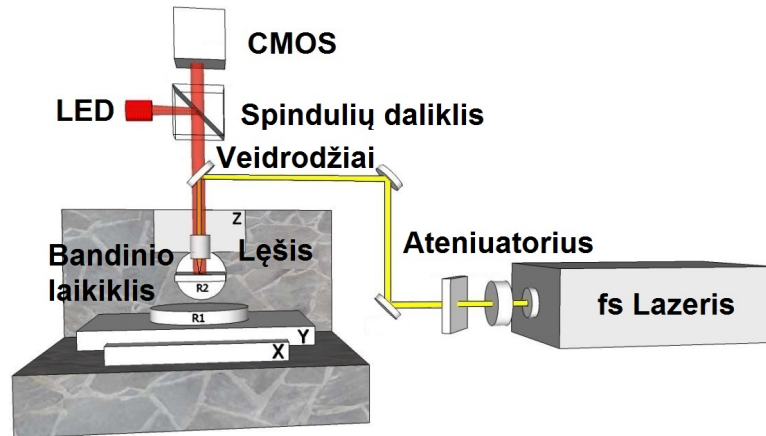
Apibendrinant, FDLM matavimams panaudojant lazerinį diodą, iki 15 W/cm^2 padidintas sužadinimų tankio dinaminis diapazonas, tai reikšmingai praplečia metodo taikymo galimybes optoelektroninių prietaisų tyrimams. Šiuo būdu tiriant InGaN kvantines duobes, emituojančias mėly-

nojoje ir žaliojoje regimojo spektro srityse, buvo nustatyti išplėsti eksponentiniai gesimo dėsniai, kurių charakteringos rekombinacijos trukmės yra nanosekundžių, submikrosekundžių ir mikrosekundžių eilės. Išplėstas daugiaeksponentinis gesimo dėsnis atskleidžia tirtų bandinių struktūrinę tvarką.

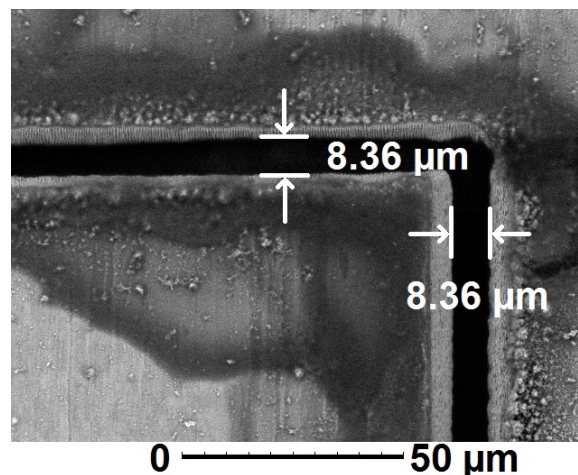
2.3 Pusiau planarinis III-nitridinio šviestuko prototipo formavimo lazeriniu abliavimu metodas

2.3.1 Šablonų gamyba

Principinė molibdeno folijos šablonų gamybos schema yra pavaizduota 2.6 paveiksle. Pagrindinis elementas joje yra Yb:KGW fs lazeris („PHAROS“, LIGHT CONVERSION, 1030 nm, 320 fs, 20 kHz - 1 MHz). Jo intensyvumas buvo koreguojamas atenuatoriumi, sudaryto iš $\lambda/2$ plokštelės ir plonaslukšnio poliarizatoriaus. Bandinio transliacija buvo atliekama penkiais motorizuotais poslinkio (X, Y, Z) ir posūko (R1, R2) elementais (AEROTECH). Vakuuminis bandinio laikiklis buvo pritvirtintas prie posūko elemento R2. Sistema taip pat turėjo *in-situ* abliavimo proceso stebėjimo sistemą, sudarytą iš CMOS kameros (MVBLUEFOX 102C) ir raudonojo LED bandinio pašvietimui. Šablonų gamybai buvo naudojama 30 μm storio ir 99.9 % grynumo Mo folija, dėl jos aukštos lydymosi temperatūros (2617°C [19]). Lazerio spinduliuotė buvo fokusuojama asferiniu lęšiu ($F = 4.03$ mm, $NA = 0.62$) statmenai folijos paviršiui. Vienas abliavimo pjūvis Mo bandinyje palikdavo 8.4 μm pločio (žiūr. 2.7 pav.) ir maždaug 3 μm gylio tranšėją, transliacijos staleliui judant 2 mm/s greičiu, impulso energijai esant 1.2 μJ ir 25 kHz pasikartojimo dažniui. Mo folijoje išpjovus norimos geometrijos kiaurymes, ji buvo naudojama kaip fotolitografijos šablonas kontaktų formavimui ir įprastu būdu suformuoto šviestuko esdinimams sausu būdu, tačiau galėjo būti naudojama ir kaip šešėlinė kaukė tiesioginiam metalų garinimui pro kiaurymes joje [20].



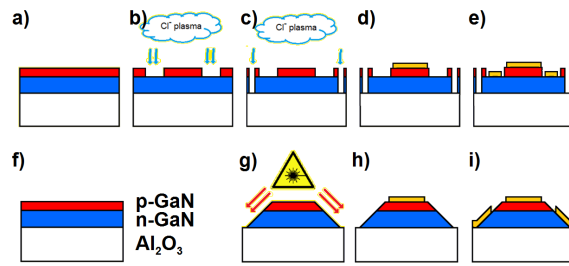
2.6 pav. Principinė molibdeno šablonų formavimo schema. Jos pagrindiniai elementai: Yb:KGW fs lazeris, vertikalaus (Z) ir du horizontalaus (X, Y) poslinkio bei du posūkio (R1, R2) elementai. Vakuuminis bandinio laikiklis yra pritaisytas prie posūkio elemento R2. CMOS kamera ir raudonos spalvos LED apšvietimas buvo skirti *in-situ* abliavimo proceso stebėjimui.



2.7 pav. Molibdeno folijos abliacijos tranšėjos SEM nuotrauka.

2.3.2 Šviestukų formavimas

Yra žinoma, kad gaminant šviestuką būtina atlikti 4 fundamentalius žingsnius (žiūr. 2.8 a-e pav.): suformuoti *p-mesa* sauso ęsdinimo būdu, atskirti LED lustus gilaus sauso ęsdinimo būdu bei užgarinti *n*- ir *p*-tipo kontaktus. Tuo tarpu, pasitelkiant lazerinį abliavimą, kuomet lazerio spindulys su bandinio paviršiumi sudaro 45° , lustų atskyrimo tranšėjas ir *n*-tipo GaN sluoksnio atvėrimą galima atlikti tuo pačiu metu, taip sumažinant procesų kiekį reikalingą vieno prietaiso gamybai (žiūr. 2.8 f-i pav.). Šio proceso atlikimui buvo adaptuota Mo folijos abliavimui naudota apdirbimo schema.

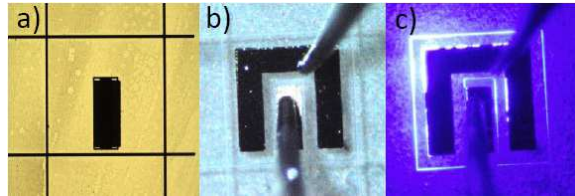


2.8 pav. LED gamybos seka naudojant įprastą fotolitografiją bei sauso ėsdirimo būdą (a-e) ir lazerinį abliavimą (f-i). Raudona spalva yra pažymėtas *p*-tipo GaN, mėlynai — *n*-tipo GaN, baltais stačiakampiais žymimas safyro padėklas, o geltonos sritys vaizduoja metalinius kontaktus. a) epitaksinis sluoksnis prieš apdorojimą b) *n*-GaN atvėrimas ėsdirinant Cl₂ plazma c) lustų atskyrimas naudojant gilų sausą ėsdirimą Cl₂ plazma d) *p*-tipo kontaktų formavimas e) užbaigtas LED lustas suformavus *n*-tipo kontaktą; f) epitaksinis sluoksnis prieš apdorojimą lazeriu g) lustų atskyrimo ir *n*-GaN atvėrimas fs abliavimu h) *p*-tipo kontakto formavimas i) *n*-tipo kontakto formavimas ant įžambių bandinio šoninių sienelių [P3].

R2 posūkio stalelis buvo pasuktas 45°, taip pat pakeistas ir lazerio spinduliūtę į bandinį fokusuojantis lęšis ($F = 16$ mm ir $NA = 0.16$). Šiuo atveju linijinis skenavimo greitis buvo 0.5 mm/s. Impulso energija buvo sumažinta tiek, kad lazerio spindulys nebepažeistų safyro, o tik GaN (pažeidimo slenkstis šioms medžiagoms skiriasi eile). Tam, kad savaiminio safyro abliavimo ribojimo sąlyga būtų išlaikyta [21], impulso energija buvo sumažinta dar 10 %, iki 0.9 μJ. Tai leido vieno skenavimo procesu pilnai pašalinti GaN sluoknį nepadarant jokios žalos po juo esančiam safyro padėklui. Abliuojamame paviršiuje susidaro sunkiai pašalinamas GaO sluoksnis. Kadangi jis yra dalinai laidus ir gali užtrumpi *p-n* sandūrą, jį yra būtina panaikinti prieš atliekant kontaktų formavimą. Šios problemos sprendimui buvo pasiūlyta naudoti mažai selektyvų šlapią ėsdirimą KOH šarmu arba abliaciją atlikti inertinių dujų atmosferoje. Tokiu atveju susdaro metalinio Ga lašelį, kurių šalinimą galima atlikti selektyviau.

Rezultatų palyginimui, kontaktų formavimas įprastiniu ir lazeriniu būdu apdorotoms struktūroms buvo atliekamas tuo pačiu metu. Fotorezistas buvo eskponuojamas naudojant lazeriu pagamintus šablonus iš Mo folijos. Kontakto buvo užgarinti naudojant elektronų pluoštelio garinimo įrangą (UL-VAC EB EO184). Ominius *p*-tipo kontaktus sudarė 20 nm Ni / 80 nm Au, o *n*-tipo 20 nm Ti / 200 nm Au. Vienas lazeriu suformuoto šviestuko lustas

ir jo EL yra pavaizduoti 2.9 paveiksle. Po kontaktų užgarinimo buvo išmatuotos abiejų šviestukų volt-amperinės charakteristikos (žiūr. 2.10 pav.). Tuomet, siekiant pašalinti *p*-tipo GaN sluoksnio akceptorius pasyvuojantį vandenilį [22], abu bandiniai vienu metu buvo iškaitinti 550°C temperatūroje 300 s azoto atmosferoje ir *I-V* matavimai pakartoti.

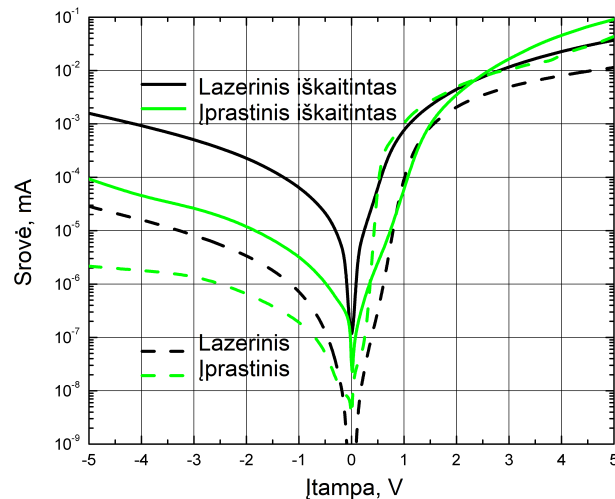


2.9 pav. Lazериu suformuotas LED lustas prieš (a) ir po (b) kontaktų užgarinimo, šviestuko EL yra matoma (c). Lusto matmenys yra 1x1 mm² [P3].

2.3.3 Eksperimentiniai rezultatai

Nitridinį šviestuką charakterizuojančiu parametru yra įprasta laikyti tiesioginės įtampos vertę ties 20 mA srovės stipriu. 2.10 paveiksle yra stebimas reikšmingas šios vertės sumažėjimas iki 3.75 V lazериu apdirbtam LED po iškaitinimo (prieš terminį bandinio apdorijimą, ši vertė buvo per didelė, kad būtų galima eksperimentiškai nustatyti). Tuo tarpu įprastinio bandinio atveju, šios vertės sumažėjimas nėra toks didelis, įprastu būdu suformuoto bandinio įtampa yra 4 V ir tampa 3.15 V po iškaitinimo. Dar vienas charakterizavimo kriterijus yra užtvarinės srovės stipris esant -5 V įtampai. Iš Voltamaperinės charakteristikos matyti, kad užtvarinė srovė lazериu suformuotam šviestukui yra $2.87 \cdot 10^{-5}$ A iki iškaitinimo ir ji išauga iki $1.58 \cdot 10^{-3}$ A po bandinio iškaitinimo. Įprastiniu būdu pagaminto šviestuko atveju užtvarinės srovės stipriai buvo $2.1 \cdot 10^{-6}$ A, ir $93 \cdot 10^{-6}$ A, atitinkamai.

Lazериu suformuoto šviestuko tiesioginės įtampa, tekant 20 mA srovės stipriui, po bandinio iškaitinimo ženkliai sumažėja, o tai sufleruoja mintį, kad mažėja ir nuosekli parazitinė prietaiso varža, kuri pasidaro palyginama su įprastiniu būdu suformuoto šviestuko parazitine nuosekliaja varža iki iškaitinimo. Kita vertus lygiagrečiai parazitinei lazериu suformuoto ir iškaitinto prietaiso varža taip pat sumažėja, iki vertės artimos įprastu būdu suformuoto šviestuko lygiagrečiai parazitinei varžai iki iškaitinimo, o tai



2.10 pav. Šviestukų, pagaminto įprastiniu būdu (pažymėta žaliai) ir naudojant fs lazerį (pažymėta juodai), voltamperinės charakteristikos iš karto po kontaktų suformavimo (pavaizduota brūkšinine linija) ir po iškaitinimo (pavaizduota ištisine linija) [P3].

nėra gerai. Abiejų bandinių atveju, po iškaitinimo, užtvarinės krypties srovė padidėja, tai galima paaiškinti sąlyginiu p - n sandūros persilydimu terminio proceso metu. Lazeriniu būdu suformuoto bandinio lygiagrečios parazitinės varžos sumažėjimą (kaip ir smarkiau išaugančią užtvarinės krypties srovę) galima paaiškinti nepilnai pašalinto metalinio Ga persiskirstymu ant įžambios bandinio sienelės iškaitinimo metu.

Apibendrinant, buvo pasiūlytas naujas GaN šviestukų prototipų gamybos metodas, pasitelkiantis pusiau planarinę lazerinės abliacijos geometriją, leidžiantis sumažinti proceso kaštus ir iki 50 % sutrumpinti prietaiso formavimo trukmę. Šiuo būdu sukurtos šviestuko savybės buvo palygintos su šviesos diodo pagaminto įprastu būdu charakteristikomis. Nustatyta, kad siūlomą būdu pagaminto šviestuko savybės yra palyginamos su įprastu būdu suformuotu šviestuku iki iškaitinimo. Norint padidinti parazitinę lygiagrečiąją bandinio varžą reikėtų optimizuoti įžambios sienelės valymą nuo susidarančio metalinio galio arba atlikti paviršiaus pasyvavimą dielektriko sluoksniu, pavyzdžiui silicio nidridu.

2.4 InGaN kvantinių duobių šviestuko ABC rekombinacijos kanalų tyrimas naudojant mažo sužadavimo matavimus su dažnine skyra

Diferencinės krūvininkų gyvavimų trukmių [23] (angl. *Differential carrier lifetime*, DLT) matavimų rezultatų analizei neretai yra pasitelkiamas vadinamasis ABC-modelis [24], ypač, kai yra bandoma paaiškinti prietaiso kvantinio našumo sumažėjimą, didijant tiesioginę šviestuku tekančią srovę, vadinamąjį *droop* reiškinį [25, 26]. Yra žinoma [27], kad įvedus normuotos optinės galios P ir kokybės faktoriaus Q sąvokas, normuotą išorinį kvantinį našumą galima apibrėžti taip:

$$\frac{EQE_{max}}{EQE} = \frac{Q + P^{1/2} + P^{-1/2}}{Q + 2}, \quad (2.2)$$

tokiu būdu Q galima nustatyti iš paprasto EL matavimo, o žinant DLT priklausomybę nuo šviestuku tekančios srovės stiprio, nesunkiai galima nustatyti ir *Shockley-Read-Hall* (SRH) rekombinacijos koeficientą A :

$$\tau = \frac{1}{A + 2B \cdot N + 3C \cdot N^2} \quad [24, 28] \quad \text{arba} \quad \tau = \frac{A^{-1}}{1 + 2Q \cdot P^{1/2} + 3P} \quad [29]. \quad (2.3)$$

Čia A — SHR rekombinacijos, B yra bimolekulinės rekombinacijos, o C — Ožė rekombinacijos koeficientai, τ — DLT trukmė. Q ir P parametrų įvedimas patrauklus tuo, kad leidžia nustatyti SRH koeficientą vien iš EL ir DLT matavimų, išvengiant būtinybės daryti sunkiai pagrindžiamas prielaidas dėl krūvininkų tankio priklausomybės nuo šviestuku tekančios srovės — $N(I)$ [29]. Dar daugiau, žinant Q ir A vertes, galima apskaičiuoti ir kitus ABC modelio rekombinacijos koeficientus. Kvantinių duobių atveju yra įprasta naudoti lakštines B ir C koeficientų išraiškas [29]:

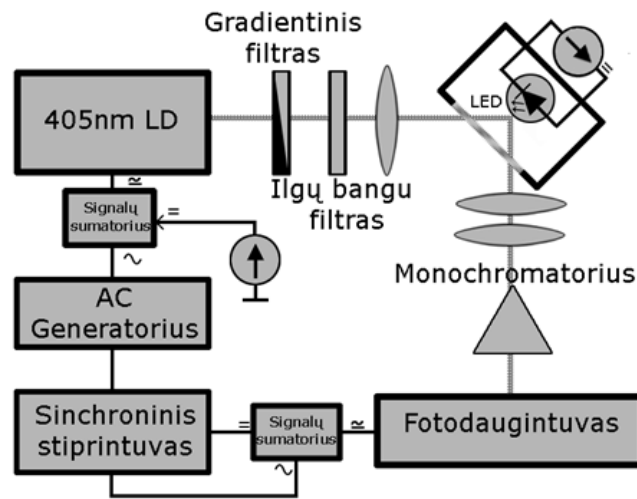
$$B_{2D} = B/d = A^2 Q (2 + Q) (qS/I_{max}) \quad (2.4)$$

ir

$$C_{2D} = C/d^2 = A^3 (2 + Q)^2 (qS/I_{max})^2. \quad (2.5)$$

Čia, S yra aktyvios LED srities skerspjūvio plotas, o I_{max} šviestuku tekanti srovės vertė, kuriai esant nustatyta maksimali EQE_{max} vertė.

2.4.1 Eksperimentinė metodika



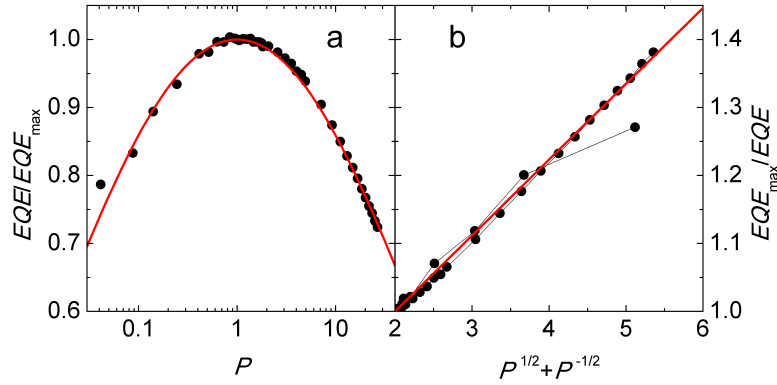
2.11 pav. Eksperimento schema, naudota atliekant mažo sužadavimo PL matavimus su dažnine skyra [P4].

Pirmiausia buvo matuojama šviestuko optinės galios priklausomybė nuo tiesioginės srovės, tam, kad būtų galima nustatyti P ir Q parametrų vertes. Šviestukas buvo prijungtas prie pastovios srovės šaltinio KEITHLEY, o jo EL buvo registruojama monochromatoriumi su CCD kamera. Norint išvengti Džaulio šilumos sukeltų paklaidų, šviestuko padas buvo papildomai kaitinamas iki 330 K temperatūros, tai leido atlikti matavimus iki 700 mA srovės stiprio. Eksperimentas buvo itin paprastas, nes matavimai galėjo būti vykdomi santykiniais, o ne absoliučiais, dydžiais.

Tuomet buvo atliekami $DLT(I)$ matavimai. Matavimų schema aptarta FDLM eksperimentų atveju buvo šiek tiek modifikuota. Veikiantis šviestukas buvo įmontuotas į kriostatą, o jo pado temperatūra palaikoma ties 330 K. Šviestuko maitinimui buvo naudojamas pastovios srovės šaltinis ir tik nedidelė harmoniškai moduluotų krūvininkų dalis buvo injektuojama į kvantines duobes optiniu rezonansiniu būdu, nesužadinant apvalkalinių sluoksnių (žr. 2.11 pav.). Kaip ir FDLM matavimų atveju, sistemos DLT matavimų dinaminis diapazonas buvo nuo 160 ms iki 1.6 ns. Suminis PL ir EL signalas buvo skleidžiamas monochromatoriumi, siekiant užtikrinti maksimalų žadinančios LD spinduliuotės patekimo į PMT blokavimą. Fazės poslinkis tarp LD žadinimo signalo ir šviestuko atsako registruoto PMT

sinchroniniu stiprintuvu buvo fiksuojamas, kaip funkcija nuo moduliacijos dažnio. Vienas matavimas trukdavo iki 10 min, tuo tarpu analogiškam informacijos kiekiui SSTRPL atveju reikdavo atlikti valandų trukmės duomenų kaupimą [29]. Visos užregistruotos fazės dažninės diagramos atitiko vienksoponentinį gesimo dėsnį, o tai patvirtina, kad matavimų metu buvo išlaikoma mažo sužadavimo sąlyga [30]. DLT vertės buvo nustatomos atliekant eksperimentinių rezultatų tapatinimą su teoriniu modeliu, naudojant mažiausių kvadratų metodą. SSTRPL matavimai tam pačiam bandiniui buvo atlikti Vokietijoje, jų eiga plačiau aprašyta [29].

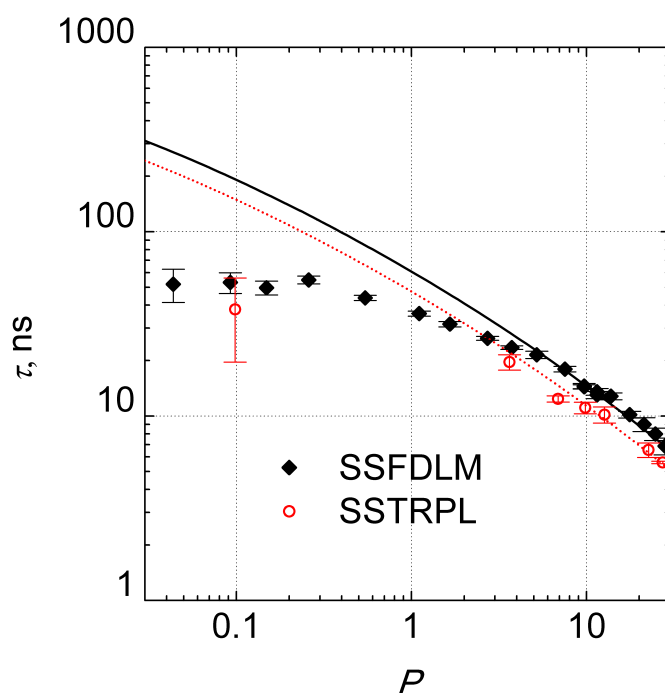
2.4.2 Eksperimentiniai rezultatai



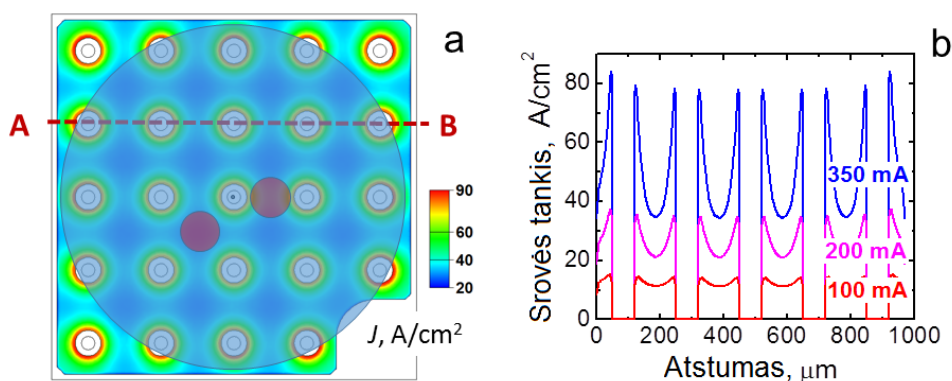
2.12 pav. Tirtu šviestuko EQE/EQE_{max} santykis kaip funkcija nuo normalizuotos optinės galios P (a) ir EQE_{max}/EQE santykis kaip funkcija nuo $P^{1/2} + P^{-1/2}$ (b), matuojant esant 330 K temperatūrai. Juodi skrituliai — eksperimentiniai taškai, o raudonos linijos sumodeliuotos naudojant (2.2) lygtį, taikant $Q = 7.0 \pm 0.1$. Plona juoda linija (b) skirta išryškinti bendrą tendenciją [P4].

EL matavimų rezultatai yra aprašomi ABC modeliu (žr. 2.12 pav.). Taigi galima teigti, kad bet koks tolimesnis rezultatų atotrūkis nuo ABC modelio nėra sąlygotas temperatūrinių nestabilumų dėl išsiskiriančios Džaulio šilumos. Matavimus atliekant 315 K temperatūroje nustatyta Q vertė buvo 7.1 ± 0.1 , o kriostato temperatūrą pakėlus iki 330 K, Q vertė sumažėjo iki 7.0 ± 0.1 .

DLT trukmės, iš eksperimentinių rezultatų nustatytos mažiausių kvadratų metodu, kaip funkcija nuo normuotos optinės galios P yra pavaizduotos



2.13 pav. SSFDLM (juodi rombai) ir SSTRPL (raudoni tuščiaviduriai apskritimai) DLT matavimų rezultatai, kaip funkcija nuo normuotos šviestuko optinės galios P . Linijos sumodeliuotos naudojant lygtį (2.3) (juoda ištisinė — $Q = 7.0$, $A = (0.91 \pm 0.02) \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, raudona taškuota — $Q = 7.1$, $A = (1.16 \pm 0.03) \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$). Paklaidos nustatytos atliekant mažiausių kvadratų analizę. Yra stebimas eksperimentinių rezultatų neatikimas teoriniam modeliui, kai $P < 4$ [P4].



2.14 pav. Krūvininkų santalkos vizualizacija (vaizdas iš viršaus) ties GaN šviestuko elektrodais (a). Mėlynai pažymėtas plotas atitinka žadinančio spindulio diametrą naudotą SSFDLM matavimuose, tuo tarpu du raudonai pažymėti apskritimai atitinka žadinančio spindulio diametrą dviejose galimose SSTRPL matavimo vietose, pateikiančiuose skirtingą matavimo rezultatai. Krūvininkų tankio skerspjūvis A - B pavaizduotas (b). [P4]

2.13 paveiksle. Jame matoma, kad trukmės išmatuotos SSFDLM ir SSTRPL metodais sutampa beveik tobulai. SSTRPL matavimų atveju zonduojančio spindulio diametras buvo mažesnis nei $100 \mu\text{m}$, tuo tarpu SSFDLM harmoninio sužadavimo atveju yra naudojama maža momentinė sužadavimo galia [11]. Tai leido pasitelkti spindulio diametrą palyginamą su bandinio matmenimis (žr. 2.14 pav.). Kadangi GaN šviestukai dėl santykinai didelės p -laidumo tipo varžos, pasižymi srovės santalkos ties elektrodais parazitiniu reiškiniu [31], mažas DLT verčių nesutapimas galėtų būti paaiškintas tuo, kad SSTRPL zonduojantis pluoštelis pataikė į sritį artimą kontaktams, kurioje efektyvus krūvininkų tankis yra didesnis, nei vidutinis, integruotas per visą bandinio plotą. Tai gali būti įvardijama, kaip dar vienas SSFDLM privalumas prieš SSTRPL.

Tęsiant 2.13 paveikslo analizę, galima pastebėti, kad abi eksperimentinės metodikos, esant mažoms P vertėms, demonstruoja identišką DLT verčių įsisotinimą ties ~ 50 ns, o tai neatitinka ABC modelio aprašomo lygtimi (2.3). Yra žinoma, kad DLT matavimai, gali teikti neteisingus rezultatus esant mažoms maitinimo srovėms [32]. Šio neatitikimo priežasčių paaiškinimui reikėtų vykdyti platesnį tyrimą. Šios disertacijos kontekste svarbu, kad dviem nepriklausomais matavimais buvo registruota tokia pati tendencija. Tai leidžia teigti, kad SSFDLM savo patikimumu nenusileidžia dažnai DLT verčių nustatymui naudojamiems SSTRPL matavimams [29].

Galiausiai naudojantis formulėmis (2.3), ((2.4)) ir ((2.5)) buvo apskaičiuoti ir lentelėje 2.1 palyginti visi ABC rekombinacijos koeficientai. Aiškiai matyti, kad nustatytos A koeficiento vertės yra artimos, tačiau B_{2D} ir C_{2D} neatitikimas gana ženklus. Tai galima paaiškinti kvadratine ir kubine šių koeficientų priklausomybe nuo A .

Apibendrinant, buvo ištirtas SSFDLM matavimo metodo veikimas ir jo patikimumas palygintas su SSTRPL. Nustatyta, kad DLT priklausomybė nuo P abiem atvejais yra identiška. Tai patvirtina SSFDLM metodo tinkamumą veikiančių GaN šviestukų charakterizavimui, nustatant *Shockley-Read-Hall*, bimolekulinės ir Ožė rekombinacijos koeficientus. Taip pat šis matavimo būdas, lyginant su SSTRPL, yra bent 10 kartų spartesnis, matavimus galima atlikti esant iki 50 kartų mažesniems bandinio sužadavimams, o matavimo aparatūra yra pigesnė. Analizuojant SSFDLM rezultatus buvo

2.1 lentelė. Iš SSFDLM ir SSTRPL matavimų nustatytų ABC modelio rekombinacijos koeficientų palyginimas [P4], tūrinių koeficientui skaičiavimui daryta prielaida, kad sąveikoje dalyvauja tik viena kvantinė duobė ($d = 3$ nm):

Koeficientas	SSFDLM	SSTRPL
$A, 10^6 \text{ s}^{-1}$	0.91 ± 0.02	1.16 ± 0.03
$B_{2D}, 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	4.4 ± 0.3	7.3 ± 0.6
$B, 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	1.3 ± 0.1	2.2 ± 0.2
$C_{2D}, 10^{-19} \text{ cm}^4 \text{ s}^{-1}$	4.3 ± 0.5	9.2 ± 0.8
$C, 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	3.9 ± 0.5	8.3 ± 0.7

nustatyta, kad ABC modelis patikimai aprašo eksperimentinius rezultatus tik kai normuotos optinės galios P vertė yra didesnė už 4, o tai yra apatinė patikimo SSTRPL matavimo sąlyga, tad iki šiol ABC modelio galiojimo ribojimas SSTRPL metodu nebuvo nustatytas.

3. Išvados

1. Violetinio lazerinio diodo panaudojimas fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimams iki 15 W/cm^2 vertės praplečia matavimų sužadavimo galios tankį ir metodo taikymus GaN optoelektroninių prietaisų tyrimuose. Pasinaudojus platesniu dinamiu matavimo diapazonu tirtuose bandiniuose buvo nustatytas išplėstas eksponentinis liuminescencijos gesimo dėsnis, bylojantis apie struktūrinę netvarką epitaksinių darinių kvantinėse duobėse.
2. Ultratrumpų lazerinių impulsų taikymas InGaN šviestukų formavimui n -tipo laidumo sluoksnį leidžia atidengti įžambios ir savaimė apribotos abliacijos būdu, tai sumažina reikalingų technologinių procesų skaičių bei iki 50 % sutrumpina prototipų gamybos trukmę.
3. Parodyta, kad mažo sužadavimo fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimų būdu nustatyti InGaN šviestuko *Shockley-Read-Hall*, spindulinės ir Ožė rekombinacijos koeficientai yra palyginami su vertėmis išmatuotomis įprastai naudojamam mažo sužadavimo fotoluminescencijos su laikine skyra matavimo metodu.
4. Mažo sužadavimo fotoluminescencijos su dažnine skyra matavimų metodas įgalina sužadinti daugiau nei 90 % tiriamo šviestuko lusto paviršiaus, o tai leidžia sumažinti matavimo netikslumus, kuriuos mažo sužadavimo fotoluminescencijos su laikine skyra atveju, dėl mažo zondo spindulio diametro, gali įnešti srovės santalkos ties elektrodais reiškinys.

Literatūra

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/
- [2] H.J. Round, A Note on Carborundum, *Electr. World*. **49**, 309 (1907).
- [3] O.V. Losev, Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals, *Phil. Mag.* **7**(5), 1024 (1928).
- [4] M.A. Reshchikov, H. Morkoç, Luminescence properties of defects in GaN, *J. Appl. Phys.* **97**, 061301 (2005).
- [5] Z. Gaviola, Ein Fluorometer. Apparat zur Messung von Fluoreszenzabklingungszeiten, *Z. Phys.* **42**, 853 (1926).
- [6] W. Becker, *Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques* (Springer, Berlin, 2005), pp 20-43.
- [7] J. Mickevicius, G. Tamulaitis, P. Vitta, A. Zukauskas, M.S. Shur, J. Zhang, J. Yang, R. Gaska, Carrier dynamics in GaN at extremely low excited carrier densities. *Solid State Commun.*, **145**(5–6), 312 (2008).
- [8] T. Malinauskas, K. Jarašiūnas, S. Miasojedovas, S. Juršėnas, B. Beaumont, P. Gibart, Optical monitoring of nonequilibrium carrier lifetime in freestanding GaN by time-resolved four-wave mixing and photoluminescence techniques, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 202109 (2006).
- [9] J. Mickevičius, P. Vitta, G. Tamulaitis, A. Žukauskas, M.S. Shur, J. Zhang, J. Yang, R. Gaška, Luminescence Decay Kinetics in GaN Studied by Frequency Domain Measurements, *Acta Phys. Pol. A* **113**, 833 (2008).
- [10] J.W. Cooley, J.W. Tukey, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comput.* **19**(90), 297 (1965).
- [11] J.R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, 3rd edn. (Springer, New York, 2006).

- [12] P. Vitta, I. Reklaitis, A. Žukauskas, Frequency-domain fluorometry in the presence of high in-phase background, *Meas. Sci. Technol.* **23**(3), 035502 (2012).
- [13] M. Pophristic, F.H. Longa, C. Tran, I.T. Ferguson, R.F. Karlicek Jr., Time-resolved photoluminescence measurements of InGaN light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **73**(24), 3550 (1998).
- [14] C. Li, E.B. Stokes, E. Armour, Optical characterization of carrier localization, carrier transportation and carrier recombination in blue-emitting InGaN/GaN MQWs, *ECS J. Solid. State Sci. Technol.* **4**(2) R10 (2015).
- [15] H. Wang, Z. Ji, S. Qu, G. Wang, Y. Jiang, B. Liu, X. Xu, H. Mino, Influence of excitation power and temperature on photoluminescence in InGaN/GaN multiple quantum wells, *Opt. Express* **20**(4), 3932 (2012).
- [16] D. Monroe, Hopping exponential band tails, *Phys. Rev. Lett.* **54**(2), 146 (1985).
- [17] S.D. Baranovskii, R. Eichmann, P. Thomas, Temperature-dependent exciton luminescence in quantum wells by computer simulation, *Phys. Rev. B* **58**(19), 13081 (1998).
- [18] G. Tamulaitis, J. Mickevičius, P. Vitta, A. Žukauskas, M.S. Shur, Q. Fareed, R. Gaska, Time- and frequency-domain measurements of carrier lifetimes in GaN epilayers, *Superlattice. Microst.* **40**, 274 (2006).
- [19] J.F. Shackelford, W. Alexander, J.S. Park, *The CRC materials science and engineering handbook*, 2nd edn. (CRC Press, Boca Raton, 1994).
- [20] R. Moser, M. Kunzer, C. Gossler, R. Schmidt, K. Köhler, W. Pletschen, U.T. Schwarz, J. Wagner, Laser processing of GaN-based LEDs with ultraviolet picosecond laser pulses. *Proc. SPIE* **8433**,84330Q (2012).
- [21] R. Moser, C. Gossler, M. Kunzer, K. Köhler, W. Pletschen, J. Brunne, U.T. Schwarz, J. Wagner, Laser direct writing of GaN-based light-emitting diodes - The suitable laser source for mesa definition, *J. Appl. Phys.* **113**, 103107 (2013).

- [22] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, T. Mukai, Hole compensation mechanism of p-type GaN films, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**(5A), 1258 (1992).
- [23] A. David, M.J. Grundmann, Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 103504 (2010).
- [24] B. Galler, P. Drechsel, R. Monnard, P. Rode, P. Stauss, S. Froehlich, W. Bergbauer, M. Binder, M. Sabathil, B. Hahn, J. Wagner, Influence of indium content and temperature on Auger-like recombination in InGaN quantum wells grown on (111) silicon substrates, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 131111 (2012).
- [25] J. Piprek, Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes, *Phys. Status Solidi A* **207**(10), 2217(2010).
- [26] Q. Dai, Q. Shan, J. Wang, S. Chhajed, J. Cho, E.F. Schubert, M.H. Crawford, D.D. Koleske, M.H. Kim, Y. Park, Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 133507 (2010).
- [27] I.E. Titkov, S.Y. Karpov, A. Yadav, V.L. Zerova, M. Zulonas, B. Galler, M. Strassburg, I. Pietzonka, H.J. Lugauer, E.U. Rafailov, Temperature-Dependent Internal Quantum Efficiency of Blue High-Brightness Light-Emitting Diodes, *IEEE J. Quant. Electron.* **50**, 911 (2014).
- [28] R.P. Green, J.J.D. McKendry, D. Massoubre, E. Gu, M.D. Dawson, A.E. Kelly, Modulation bandwidth studies of recombination processes in blue and green InGaN quantum well micro-light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 091103 (2013).
- [29] F. Nippert, S. Karpov, I. Pietzonka, B. Galler, A. Wilm, T. Kure, C. Nenstiel, G. Callsen, M. Strassburg, H.J. Lugauer, A. Hoffmann, Determination of recombination coefficients in InGaN quantum-well light-emitting diodes by small-signal time-resolved photoluminescence, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 05FJ01 (2016).

- [30] L. Riuttanen, P. Kivisaari, N.Mäntyoja, J. Oksanen, M. Ali, S. Suihkonen, M. Sopanen, Recombination lifetime in InGaN/GaN based light emitting diodes at low current densities by differential carrier lifetime analysis, *Phys. Status Solidi C* **10**(3), 327 (2013).
- [31] X. Guo, E.F. Schubert, Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates, *J. Appl. Phys.* **90**(8), 4191 (2001).
- [32] G.E. Shtengel, D.A. Ackerman, P.A. Morton, True carrier lifetime measurements of semiconductor lasers, *Electron. Lett.* **31**, 20 (1995).

Mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

- [P1] A. Arnatkevičiūtė, **I. Reklaitis**, A. Kadys, T. Malinauskas, G. Juška, M.V. Rzheutski, and R. Tomašiūnas, Relationships between strain and recombination in intermediate growth stages of GaN, *J. Electron. Mater.* **43**(7), 2667 (2014).
- [P2] **I. Reklaitis**, R. Kudžma, S. Miasojedovas, P. Vitta, A. Žukauskas, R. Tomašiūnas, I. Pietzonka, M. Strassburg „Photoluminescence decay dynamics in “blue” and “green” InGaN LED structures revealed by frequency domain technique“, *J. Electron. Mater.* **45**(7), 3290 (2016).
- [P3] **I. Reklaitis**, T. Grinys, R. Tomašiūnas, T. Puodžiūnas, L. Mažulė, V. Sirutkaitis, C.H. Lin, C.C. Yang, A new geometrical approach for rapid LED processing by using femtosecond laser, *Opt. Lasers Eng.* **74**, 17 (2015).
- [P4] **I. Reklaitis**, F. Nippert, R. Kudžma, T. Malinauskas, S. Karpov, I. Pietzonka, H.J. Lugauer, M. Strassburg, P. Vitta, R. Tomašiūnas, A. Hoffmann, Differential carrier lifetime in InGaN-based light-emitting diodes obtained by small-signal frequency-domain measurements: Advantages and limitations of the technique, submitted to the *Meas. Sci. Technol.*

Pagrindinių pranešimų disertacijos tema konferencijose sąrašas

- [C1] E.V. Lutsenko, M.V. Rzheutski, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, **I. Reklaitis**, A. Kadys, T. Malinauskas, S. Nargelas, K. Jarašiūnas, and A. Žukauskas, “Peculiarities of photoluminescence efficiency dependence on excitation intensity in GaN/Al₂O₃ epilayers”, *4th Int. Symp. on Growth of III-Nitrides* (St. Petersburg, July 16-19, 2012).
- [C2] A. Kadys, T. Malinauskas, T. Grinys, **I. Reklaitis**, M. Dmukauskas, J. Mickevičius, J. Aleknavičius, D. Dobrovolskis G. Tamulaitis, and R. Tomašiūnas, “Growth of InN and InGaN thin films on GaN templates by pulsed MOCVD”, *COST Spring training school „Epitaxy and*

structural analysis of III-V-N semiconductor nanostructures“, (Heraklion, April 29-May 2, 2012).

- [C3] T. Grinys, A. Kadys, **I. Reklaitis**, M. Ščiuka, A. Melninkaitis, and R. Tomašiūnas, „Damage morphology study of GaN structures by electron beam induced current“, *10th International Conference on Nitride Semiconductors* (Washington, August 25-30, 2013).
- [C4] **I. Reklaitis**, R. Kudzma, R. Tomasiunas “Luminescence Decay Kinetics in InGaN Studied by Frequency Domain Measurements”, *FP7 Spring training school* (Rome, april 7-11, 2014).
- [C5] **I. Reklaitis**, T. Puodziunas, L. Mazule, T. Grinys, and R. Tomasiunas, "LED processing using fs laser microfabrication: playing with geometry" *5th Int. Symp. on Growth of III-Nitrides* (Atlanta, May 18-22, 2014).
- [C6] **I. Reklaitis**, T. Puodziunas, L. Mazule, R. Tomasiunas, and V. Siirutkaitis, "Femtosecond Laser Processing of GaN Based LED Using 45 Degree Geometry" *International Workshop on Nitride Semiconductors 2014* (Wrocław , August 24-29).
- [C7] J.Vaitkus, E.Gaubas, T.Ceponis, J.Pavlov, **I.Reklaitis**, “Transient signals of the capacitor and Schottky barrier type HVPE and MOCVD GaN sensors” *17th International Workshop on Radiation Imaging D* (Hamburg, 8 June-2 July 2015).
- [C8] **I. Reklaitis**, R. Kudzma, R. Tomasiunas, I. Pietzonka, I. Titkov, E. Rafailov, “Blue and green LED structures investigated by photoluminescence frequency domain technique” *11th International Conference On Nitride Semiconductors* (Beijing, 30 August – 4 September 2015).
- [C9] **I. Reklaitis**, R. Kudzma, R. Tomasiunas, I. Pietzonka, M. Strassburg. Photoluminescence frequency domain technique – a tool to investigate InGaN LED structures in a wide range of excitation and time. *6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)* (Hamamatsu, November 8-13, 2015).

Neįtrauktų į disertaciją mokslinių publikacijų sąrašas

- [N1] P. Vitta, R. Stanikūnas, A. Tuzikas, **I. Reklaitis**, A. Stonkus, A. Petrilis, H.P. Vaitkevičius, A. Žukauskas, Energy-saving approaches to solid state street lighting, Proc. SPIE **8123**, 81231H (2011).
- [N2] P. Vitta, **I. Reklaitis**, A. Žukauskas, Frequency-domain fluorometry in the presence of high in-phase background, Meas. Sci. Technol. **23**, 035502 (2012).
- [N3] E.V. Lutsenko, M.V. Rzeutski, V.Z. Zubialevich, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, A.S. Shulenkov, **I. Reklaitis**, A. Kadys, T. Malinauskas, S. Nargelas, K. Jarašiūnas, A. Žukauskas, Peculiarities of photoluminescence efficiency dependence on excitation intensity in GaN/Al₂O₃ epilayers, Phys. Status Solidi C **10**, 511 (2013).
- [N4] E.V. Lutsenko, M.V. Rzeutski, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, **I. Reklaitis**, A. Kadys, A. Žukauskas, Relationship of quantum-well potential profile and luminescence of InGaN/GaN heterostructures, J. Appl. Spectrosc. **80**, 220 (2013).
- [N5] T. Grinys, E. Jelmakas, **I. Reklaitis**, S. Lapinskas, A. Kadys, T. Malinauskas, C.C. Yang, R. Tomašiūnas, Defect study of GaN based LED structure by electron beam induced current, Phys. Status Solidi C **11**(3-4), 734 (2014).
- [N6] K. Aponiene, E. Paskeviciute, **I. Reklaitis**, Z. Luksiene, Reduction of microbial contamination of fruits and vegetables by hypericin-based photosensitization: Comparison with other emerging antimicrobial treatments, J. Food Eng. **144**, 29 (2015).
- [N7] A. Kadys, T. Malinauskas, M. Dmukauskas, **I. Reklaitis**, K. Nomeika, V. Gudelis, R. Aleksiejūnas, P. Ščajev, S. Nargelas, S. Miasojedovas, K. Jarašiūnas, Photoluminescence features and carrier dynamics in InGaN heterostructures with wide staircase interlayers and differently shaped quantum wells, Lith. J. Phys. **54**(3), 187 (2014).
- [N8] T. Grinys, R. Dargis, A. Kalpakovaitė, A. Clark, F.E. Arkun, **I. Reklaitis**, R. Tomašiūnas, Study of GaN growth on Si with rare-earth

oxide distributed Bragg reflector structures, *J. Cryst. Growth* **424**, 28 (2015).

- [N9] I. Buchovec, V. Lukseviciute, A. Marsalka, **I. Reklaitis**, Z. Luksiene, Effective photosensitization-based inactivation of Gram (–) food pathogens and molds using the chlorophyllin–chitosan complex: towards photoactive edible coatings to preserve strawberries, *Photochem. Photobiol. Sci.* **15**, 506 (2016).
- [N10] E. Gaubas, T. Ceponis, E. Kuokstis, D. Meskauskaite, J. Pavlov, **I. Reklaitis**, Study of Charge Carrier Transport in GaN Sensors, *Mater.* **9**, 293 (2016).
- [N11] J. Pavlov, T. Čeponis, E. Gaubas, D. Meskauskaite, **I. Reklaitis**, J. Vaitkus, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, Comparative study of deep levels in HVPE and MOCVD GaN by combining O-DLTS and pulsed photo-ionization spectroscopy, accepted by *J. Instrum.*

Informacija apie autorių

Vardas Pavardė Ignas Reklaitis
Gimęs 1986 m. lapkričio 24 d.
Šeimyninė padėtis Vedęs
El. paštas ignas.reklaitis@gmail.com

Išsilavinimas

2005 Baigta Vilniaus Užupio gimnazija
2005-2009 Bakalauro studijos Vilniaus universitete, Fizikos fakultete
2009-2011 Magistro studijos Vilniaus universitete, Fizikos fakultete
2011-2015 Doktorantūros studijos Vilniaus universitete, Fizikos fakultete

Darbo patirtis

2006-2008 UAB Arcus Novus, inžinierius
2008-2009 Vilniaus universiteto Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, technikas
2009-2013 Vilniaus universiteto Taikomųjų mokslų institutas, inžinierius
2013- Vilniaus universiteto Taikomųjų mokslų institutas, jaunesnysis mokslo darbuotojas
2015- Vilniaus universiteto Puslaidininkių fizikos katedra, laboratorijos vedėjas

Darbo įgūdžiai

Plačiatarpių puslaidininkių ir jų darinių optinis charakterizavimas;
Plačiatarpių puslaidininkių ir jų darinių elektrinis charakterizavimas;
Plačiatarpių puslaidininkių inžinerija.

Publikacijos

15 straipsnių (12 iš jų žurnaluose, įtrauktuose į ISI duomenų bazę) ir 22 pranešimai konferencijose.