

VILNIAUS UNIVERSITETAS
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Jūras Mickevičius

KRŪVININKŲ REKOMBINACIJA
PLAČIATARPIUOSE NITRIDINIUIOSE PUSLAIDININKIUOSE

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02 P), puslaidininkų fizika (P 265)

Vilnius, 2009

Disertacija rengta 2005-2009 metais Vilniaus universiteto Puslaidininkių fizikos katedroje bei Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institute .

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslų krypties taryboje.

Pirmininkas:

Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Nariai:

Prof. habil. dr. Kęstutis Jarašiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Prof. dr. Artūras Jukna (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Dr. Gediminas Račiukaitis (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, kondensuotos medžiagos – P 260).

Oponentai:

Prof. habil. dr. Arvydas Matulionis (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, kondensuotos medžiagos – P 260).

Disertacija bus ginama 2009 metais lapkričio 13 d. 15.00 valandą 212 auditorijoje Vilniaus universitete, Saulėtekio al. 9-III, LT-10222 Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta spalio ... d., 2009 metais.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje ir Puslaidininkių fizikos institute.

VILNIUS UNIVERSITY
SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE

Jūras Mickevičius

CARRIER RECOMBINATION
IN WIDE-BAND-GAP NITRIDE SEMICONDUCTORS

Summary of doctoral thesis
Physical Sciences, Physics (02 P), Semiconductor Physics (P 265)

Vilnius, 2009

The research work has been carried out in 2005-2009 at the Semiconductor Physics Department and Institute of Applied Research, Vilnius University.

Scientific supervisor:

Prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Council of defence of the doctoral thesis of Physical Sciences at Vilnius University:

Chairman:

Prof. habil. dr. Arūnas Krotkus (Semiconductor Physics Institute, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Members:

Prof. habil. dr. Kęstutis Jarašiūnas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilnius Gediminas Technical University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Prof. dr. Artūras Jukna (Vilnius Gediminas Technical University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Dr. Gediminas Račiukaitis (Fizikos institutas, Physical sciences, Physics – 02 P, Condensed matter – P 260).

Oponentai:

Prof. habil. dr. Arvydas Matulionis (Semiconductor Physics Institute, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Physical sciences, Physics – 02 P, Condensed matter – P 260).

The official defence of the doctoral thesis will be held at 3.00 p.m. on the 13th of November, 2009, in lecture room 212 at Vilnius University, Saulėtekio 9, bldg. 3, LT-10222 Vilnius, Lithuania.

Summary of the doctoral thesis has been distributed on the ... of October, 2009. The thesis is available at Vilnius University Library and Semiconductor Physics Institute.

Abstract

The group-III nitride semiconductor alloys have been widely investigated during the last two decades due to their exceptional material properties. These wide-band-gap materials form the basis, upon which the optoelectronic devices emitting light in blue to UV spectral regions, visible- and solar-blind photodetectors, high-power and high-temperature electronic devices have been developed.

Currently, the blue InGaN-based light emitting diodes (LEDs) have already been successfully commercialized, and the main emphasis in III-nitride research has shifted to UV optoelectronic devices. The UV LEDs are required for a large number of applications in a variety of fields: detection of hazardous biological and chemical agents, water and air purification, short-range covert communication, high-efficiency lighting, and high-density optical data storage.

Despite the large interest in nitride materials, their further development needs a deeper understanding of physical origins of structural, electrical and optical properties. There still exist fundamental problems concerning radiative and nonradiative recombination of nonequilibrium carriers, their localization, and the influence of the built-in electric fields.

In this work, we investigate carrier/exciton dynamics in wide-band-gap GaN and AlGaN materials. Nonequilibrium carrier dynamics has been investigated in wide temperature and excitation ranges by using steady-state and time-resolved photoluminescence (PL) spectroscopy, light-induced transient grating (LITG) technique and luminescence lifetime measurements in frequency domain. The combination of several experimental techniques allowed extending the measurement ranges and also provided an opportunity to correlate different material properties, thus, getting deeper insight into the carrier dynamics in these materials.

This study of GaN-based materials covered several problems. The revealed correlation between yellow luminescence intensity and carrier lifetime allowed relating the yellow luminescence band with structural defects: it is supposed that dislocations and impurities are bound into complexes, responsible both for radiative and nonradiative recombination. Carrier dynamics under high excitation conditions are usually investigated by using time-resolved PL technique, which is, however, sometimes ambiguous. Here, we suggest a new method for interpretation of PL decay kinetics: a fitting by using a biexponential function with characteristic times equal to carrier lifetime determined by LITG technique, and a half of it. It was shown that high carrier mobility reduces the carrier lifetime in GaN epilayers of similar quality, since the carriers in such epilayers reach dislocations faster. High optical gain was investigated in GaN by using variable stripe length technique. Gain saturation and experimental peculiarities of this technique have been discussed. Investigations of GaN epilayers under extremely low excitation conditions enabled us to look deeper into carrier dynamics when different recombination channels are not saturated.

Studies of AlGaN epilayers with different Al content showed that the carrier lifetime in AlGaN is also limited by carrier diffusion to dislocations, where nonradiative recombination occurs. Meanwhile, the radiative recombination rate depends on aluminum content in the epilayer, and is constant in the AlGaN epilayers with the same aluminum content but different dislocation densities. Comparison of two epilayers with

the same amount of aluminum but grown by different techniques allowed distinguishing between two effects limiting the carrier lifetime. The band potential fluctuation profile, obtained by Monte Carlo simulation of exciton hopping, was shown to be very similar in the samples under study. The carrier lifetime, thus, was determined solely by different density of nonradiative recombination centers, which strongly depends on the growth technique used.

Investigations of carrier dynamics in AlGaN/AlGaN multiple quantum wells revealed a strong influence of carrier localization and built-in electric field screening/recovery. Different contributions of these processes to the PL decay kinetics have been distinguished. The effect of carrier localization on carrier lifetime has been shown.

Padėka

Norėčiau padėkoti darbo vadovui prof. Gintautui Tamulaičiui už pasitikėjimą ir suteiktą galimybę dirbti mokslinį darbą.

Reiškiu didelę padėką prof. Artūriui Žukauskui, kurio vadovaujamame Taikomųjų mokslų institute ir buvo atliktas visas darbas.

Taip pat norėčiau išreikšti didelę padėką prof. Michael Shur'ui, kuris suteikė galimybę studijuoti ir dirbti Renselerio politechnikos institute.

Reiškiu padėką daktarams Karoliui Kazlauskui ir Ramūnui Aleksiejūnui už vertingas konsultacijas bei perteiktą patirtį matavimo aparatūros bei matavimo metodikos temomis.

Dėkoju visiems kolegoms už pagalbą ir gerą nuotaiką institute.

Ir žinoma, norėčiau padėkoti savo šeimai bei draugei už paramą ir palaikymą ne darbo metu.

Šį darbą rėmė Lietuvos Valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Įvadas

III-grupės nitridiniai puslaidininkiai yra plačiai tyrinėjami pastaruosius du dešimtmečius. Tokių didelį susidomėjimą lėmė svarbūs praktiniai nitridinių puslaidininkių taikymai. Unikalioms šių medžiagų savybėms gali būti panaudotos, gaminant šviesos šaltinius, spinduliuojančius mėlynojoje ir ultravioletinėje spektro srityse, regimosios ir saulės šviesos neakinamus fotojutiklius, aukštų temperatūrų bei aukštų galių elektroninius prietaisus.

Šiuo metu InGaN junginių pagrindu sukurti mėlyni šviestukai jau yra gaminami pramoniniu būdu, o pagrindinis mokslinių tyrimų dėmesys yra nukreiptas link ultravioletinėje spektro srityje veikiančių optoelektroninių prietaisų. Ultravioletiniai šviestukai yra labai pageidaujami dėl galimo jų panaudojimo tokiose srityse kaip kenksmingų biologinių ir cheminių medžiagų aptikimas, vandens ir oro sterilizavimas, netiesioginio sklaidimo slapto artimojo ryšio sistemos, didelio tankio duomenų saugojimo sistemos ir t.t.

Nepaisant tokių plačių nitridinių puslaidininkių pritaikymo galimybių ir didelių pastangų tyrinėjimams, tebėlieka neišspręsta nemažai fundamentinių problemų, trukdančių tolimesniam šių medžiagų prietaisų tobulinimui. Vis dar yra klausimų, susijusių su nepusiausvyrųjų krūvininkų spinduline ir nespinduline rekombinacija, jų lokalizacijos bei heterosandūrose atsirandančio vidinio elektrinio lauko įtaka krūvininkų rekombinacijos dinamikai.

Norint sėkmingai pradėti masinę nitridinių prietaisų gamybą, reikalingos naujoviškos epitaksinių sluoksnių ir kvantinių struktūrų auginimo technologijos. Vis gerėjanti medžiagos kokybė leidžia tyrinėti nuosavąsias medžiagos savybes, tačiau išlieka klausimų, neatsakytų net ir dabar – geltonosios liuminescencijos juostos GaN medžiagose prigimtis, taip pat jos ryšys su struktūriniais medžiagos defektais vis dar yra neišskūs. Iš kitos pusės, gerėjanti medžiagos kokybė iškelia ir naujų klausimų – vis didėjanti krūvininkų gyvavimo trukmė sąlygoja liuminescencijos gesimo neekspONENTIškumą, o tuo pačiu ir krūvininkų dinamikos interpretacijos sudėtingumą.

GaN ir AlGaN sluoksnių savybės yra plačiai tyrinėtoms, tačiau yra dar labai nedaug publikacijų apie AlGaN kvantinius darinius, o ypačingai apie AlGaN/AlGaN daugialakščius kvantinius darinius su didele aliuminio koncentracija. Tokie dariniai yra tiesiog būtini kuriant prietaisus, veikiančius tolimojoje ultravioletinėje spektro srityje. Krūvininkų dinamika AlGaN dariniuose yra stipriai veikiama tiek krūvininkų lokalizacijos, tiek ir vidinio elektrinio lauko, todėl būtinas geresnis šių procesų supratimas, siekiant pagerinti prietaisų, veikiančių tolimajame ultraviolete, efektyvumą.

Šiame darbe pateikti eksperimentiniai rezultatai buvo gauti panaudojant kelias skirtingas optinio charakterizavimo metodikas. Kelių metodikų derinys leido išplėsti matavimų ribas bei susieti skirtingas medžiagos savybes. Tokie kompleksiniai tyrimai leido giliau pažvelgti į krūvininkų dinamikos nitridiniuose puslaidininkiuose ypatumus.

Darbo tikslai ir uždaviniai

Darbe buvo siekiama įgyti naujų žinių apie krūvininkų ir eksitonų dinamiką GaN ir AlGaN sluoksniuose bei kvantiniuose dariniuose. Eksperimentiniais tyrimais buvo siekiama įvertinti svarbius medžiagos parametrus, kurie ir charakterizuotų krūvininkų

ir/ar eksitonų dinamiką GaN ir AlGaN medžiagose. Pagrindiniai darbo uždaviniai buvo šie:

- i. ištirti koreliaciją tarp geltonosios liuminescencijos intensyvumo ir krūvininkų gyvavimo trukmės GaN sluoksniuose;
- ii. pasiūlyti liuminescencijos gesimo kinetikų interpretacijos metodą, panaudojant liuminescencijos ir šviesa indukuotų gardelių gesimo kinetikas;
- iii. pritaikyti liuminescencijos gesimo matavimų su dažnine skyra metodiką, tiriant krūvininkų dinamiką GaN sluoksnyje labai žemų sužadinių sąlygomis;
- iv. įvertinti optinio stiprinimo koeficientą aukštos kokybės GaN sluoksniuose, naudojant kintamo ilgio juostelės metodiką ir lyginant skirtingus GaN bandinius;
- v. atskirti juostos potencialo fliktuacijų profilio ir nespindulinės rekombinacijos centrų tankio įtaką krūvininkų dinamikai AlGaN sluoksniuose, augintuose naudojant skirtingas technologijas;
- vi. ištirti krūvininkų lokalizacijos ir vidinio elektrinio lauko įtaką krūvininkų dinamikai AlGaN/AlGaN daugialakštėse kvantinėse duobėse;
- vii. ištirti MEMOCVDTM technologijos potencialą GaN ir AlGaN medžiagų kokybės pagerinimui.

Darbo naujumas ir svarba

Nors GaN ir jo dariniai jau yra plačiai taikomi praktikoje, šios grupės medžiagomis vis dar intensyviai domimasi. Mokslinių tyrimų kryptis šiek tiek pakito ir pagrindinis dėmesys dabar skiriamas GaN-AlGaN medžiagų grupei bei prietaisams, veikiantiems ultravioletinėje spektro srityje, tačiau nuolatinis auginimo technologijų tobulinimas leidžia iš naujo peržiūrėti kai kurias anksčiau nustatytas medžiagų savybes bei giliau suprasti vykstančius procesus.

Kompleksiniai eksperimentiniai tyrimai, naudojant kelias skirtingas metodikas (fotoluminescencijos spektroskopiją, fotoluminescencijos su laikine skyra spektroskopiją, šviesa indukuotų dinaminų gardelių metodiką bei liuminescencijos gesimo trukmės matavimų su dažnine skyra metodiką), ir naujos aukštos kokybės medžiagos bei jų dariniai (GaN ir AlGaN sluoksniai, daugialakščiai AlGaN dariniai) sudarė puikias sąlygas darbe pateikiamiems tyrimams atlikti. Buvo atlikti krūvininkų dinamikos GaN sluoksniuose tyrimai labai žemų sužadinių sąlygomis, kai skirtingi rekombinacijos kanalai nėra užsotinti. Naujas požiūris į geltonosios liuminescencijos juostą GaN sluoksniuose leido susieti geltonosios liuminescencijos intensyvumą su krūvininkų gyvavimo trukme. Pasiūlytas naujas liuminescencijos gesimo kinetikų interpretavimo metodas, siejant liuminescencijos ir šviesa indukuotų gardelių kinetikas. Skirtingomis technologijomis augintų AlGaN sluoksnių palyginimas suteikė informacijos apie juostos potencialo fliktuacijas bei krūvininkų gyvavimo trukmę ribojančius veiksnius AlGaN medžiagose. Atskleista naujų krūvininkų dinamikos daugialakštėse AlGaN/AlGaN kvantinėse duobėse ypatumų. Dauguma tirtų bandinių buvo auginti naudojant MEMOCVDTM technologiją ir tyrimai patvirtino šios technologijos potencialą siekiant pagerinti medžiagų kokybę.

Disertacijos santrauka

Disertaciją sudaro šeši skyriai, kuriuose yra aptariami kitų grupių darbai disertacijos tema, aprašomos eksperimentinės metodikos, pristatomi originalūs autoriaus gauti rezultatai bei išvados.

1 Skyriuje yra aprašomos pagrindinės nitridinių puslaidininkių savybės bei aptariamoms problemoms, taip pat aptariami kitų tyrėjų grupių gauti rezultatai.

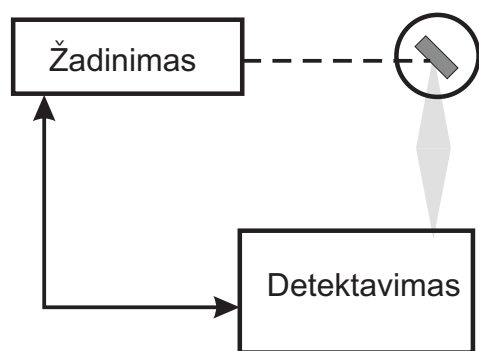
2 Skyrius. Eksperimentinės metodikos

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami, naudojant keturias metodikas: i) fotoluminescencijos (FL) spektroskopiją; ii) FL su laikine skyra spektroskopiją; iii) šviesa indukuotų dinaminių gardelių (ŠIDG) metodiką; ir iv) liuminescencijos gesimo trukmės matavimų su dažnine skyra (LGDS) metodiką.

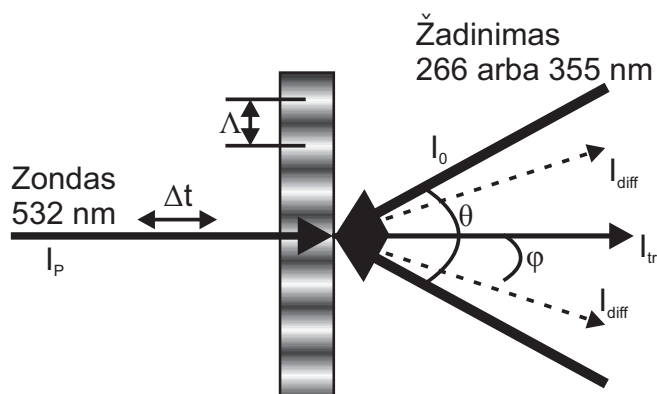
FL, FL su laikine skyra ir LGDS metodikose naudojamos eksperimentinės schemas galima schematiškai padalinti į 3 dalis – žadinimo šaltinis, bandinys ir detektavimo (analizavimo) sistema. Tai pavaizduota 2.1 paveiksle. Skirtingose metodikose buvo naudojamos skirtingos žadinimo ir/ar detektavimo dalys.

Naudojant stacionarią FL spektroskopiją, bandinys buvo žadinamas nuolatinės veikos He-Cd lazerio spinduliuote (3,81 eV) arba impulsinio nanosekundinio (4 ns) YAG:Nd lazerio spinduliuote (1,164 eV) ir aukštesnėmis jos harmonikomis. Norint pasiekti labai žemus sužadimus, žadinimui buvo naudojami įvairių bangos ilgių šviestukai. Detektavimo ir analizavimo sistema buvo sudaryta iš monochromatoriaus ir fotodaugintuvo (impulsinio žadinimo atveju) arba fotonų skaičiuoklio (nuolatinio žadinimo atveju). Tiriant medžiagų optinį stiprinimą, buvo naudojama FL spektroskopijos atmaina – kintamo ilgio juostelės (KIJ) metodika. Šioje metodikoje žadinantis spindulys yra sufokusuojamas į ploną juostelę ant bandinio paviršiaus, o išilgai juostelės sklindanti liuminescencijos šviesa surenkama iš krašto, statmenai žadinančiam spinduliui.

Naudojant FL su laikine skyra spektroskopiją, bandinys buvo žadinamas impulsinio pikosekundinio (25 ps) YAG:Nd lazerio spinduliuote ir aukštesnėmis jos harmonikomis.



2.1 paveikslas. FL, FL su laikine skyra ir LGDS metodikų blokinė schema.



2.2 paveikslas. Keturių bangų maišymo schema, naudojama ŠIDG metodikoje.

Bandinio liuminescencija buvo surenkama į spektrografą, o analizuojama naudojant greitaveikę skleidžiančiąją kamerą.

LGDS metodikoje žadinimui buvo naudojami įvairių bangos ilgių šviestukai, kurių spinduliuotė buvo moduluojama plačiame dažnių ruože nuo 5 Hz iki 200 MHz. Bandinio liuminescencija buvo detekuojama, naudojant monochromatorių ir fotodaugintuvą. Gautas elektrinis signalas buvo lyginamas su šviestuką moduluojančiu signalu ir nustatomas jo fazės poslinkis ir moduliacijos gylio pokytis.

Skirtingai nuo aukščiau paminėtų eksperimentinių metodikų, ŠIDG metodika yra pagrįsta keturių bangų maišymo schema, kuri yra pateikta 2.2 paveiksle. Gardelės sukūrimui bandinio paviršiuje buvo naudojama pikosekundinio (25 ps) YAG:Nd lazerio spinduliuotės 3-ioji (3,49 eV) arba 4-oji (4,66 eV) harmonikos. Gardelės irimas buvo zonduojamas, naudojant to paties lazerio spinduliuotės 2-ąją (2.33 eV) harmoniką.

Difrakcijos efektyvumas $\eta(t)$, t.y. difragavusio ir praėjusio zondo spindulių intensyvumų santykis gali būti aprašomas tokia išraiška [1]: $\eta(t) \propto \exp(-2t/\tau_G)$, kur τ_G yra charakteringa gardelės irimo trukmė. Indukuota gardelė yra dėl krūvininkų rekombinacijos ir difuzijos, o charakteringa irimo trukmė τ_G gali būti išreikšta per gardelės periodą Λ , bipolinės difuzijos koeficientą D_a ir krūvininkų gyvavimo trukmę τ_R [1]:

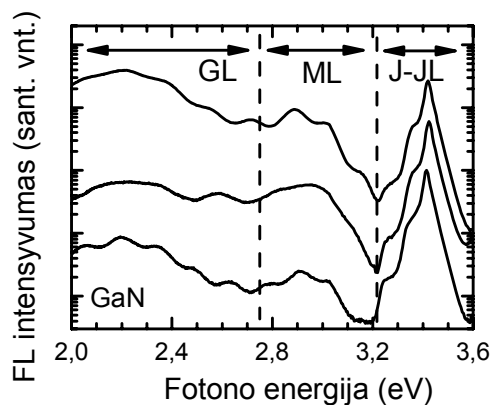
$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{4\pi^2 D_a}{\Lambda^2}. \quad (2.1)$$

3 Skyrius. Krūvininkų dinamika GaN sluoksniuose

3.1. Geltonosios liuminescencijos intensyvumo ir krūvininkų gyvavimo trukmės koreliacija GaN sluoksniuose

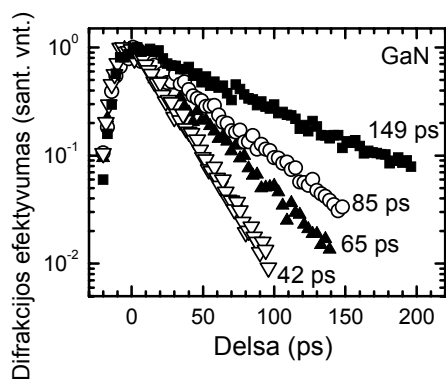
Geltonosios liuminescencijos (GL) juosta GaN medžiagose yra plačiai tyrinėta [2], tačiau jos ryšys su struktūriniais medžiagos defektais, tokiais kaip dislokacijos, vis dar nėra galutinai aiškus. Šiame skyrelyje ryšys tarp GL ir struktūrinių defektų yra nagrinėjamas, siejant GL intensyvumą ir nepusiausvyrųjų krūvininkų gyvavimo trukmes, tiriant GaN sluoksnius, išaugintus skirtingomis sąlygomis ant safyro ir SiC padėklų.

Trijų skirtingų GaN bandinių būdingi FL spektrai yra pavaizduoti 3.1 paveiksle. Kaip paveiksle pažymėta rodyklėmis ir brūkšninėmis linijomis, spektrai gali būti padalinti į 3 dalis, atitinkančias skirtingas GaN liuminescencijos juostas – geltonosios liuminescencijos juosta, mėlynosios liuminescencijos (ML) juosta ir tarpjuostinės liuminescencijos (J-JL) juosta. Spektrai, pateikti 3.1 pav., yra sunormuoti į J-JL juostos smaile, esančią ties 3,42 eV. Matosi, kad santykiniai GL ir ML juostų intensyvumai yra skirtingi skirtinguose bandiniuose. Šitoks priemaišinių juostų santykinio intensyvumo skirtumas gali būti siejamas su skirtingomis bandinių auginimo sąlygomis.



3.1 pav. Būdingi GaN bandinių FL spektrai. Visi spektrai yra sunormuoti ir paslinkti vertikaliai.

Nepusiausvirųjų krūvininkų gyvavimo trukmės buvo nustatomos, naudojant ŠIDG metodiką. Būdingos kelių bandinių gardelių irimo kinetikos yra pateiktos 3.2 pav. Šviesa sukuriama didelio periodo gardeles ir atsižvelgiant į (2.1) lygtį, šiuose matavimuose gardeles irimas yra nulemtas vien tik krūvininkų rekombinacijos, o krūvininkų gyvavimo trukmė yra lygi gardeles irimo charakteringai trukmei.



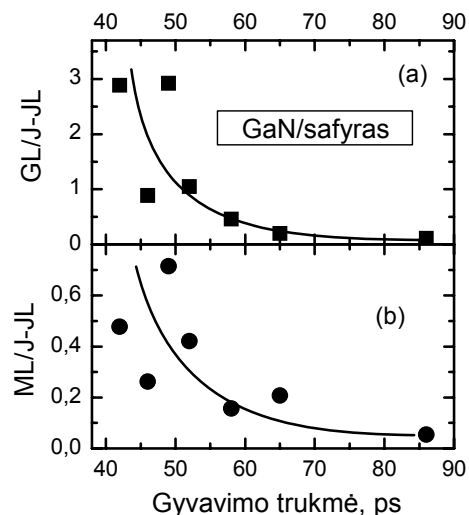
3.2 pav. Dinaminių gardelių irimo kinetikos GaN bandiniuose su skirtingu GL intensyvumu. [P1]

Trečioji bandinių grupė pasižymėjo gyvavimo trukmėmis nuo 120 iki 150 ps bei labai silpna GL juosta.

Priemaišinių GL ir ML juostų santykinų intensyvumų koreliacija su krūvininkų gyvavimo trukmėmis yra pavaizduota 3.3 paveiksle. Abiejoms priemaišinėms juostoms galioja bendra tendencija, kad santykinis priemaišinės juostos intensyvumas mažėja, didėjant krūvininkų gyvavimo trukmei.

Kambario temperatūroje krūvininkų gyvavimo trukmė GaN medžiagoje yra sąlygota krūvininkų pagavimo į nespindulinės rekombinacijos centrus (NRC) spartos. Mažesnė gyvavimo trukmė tokiu būdu reiškia didesnę NRC tankį sluoksnyje. Mažesnė krūvininkų gyvavimo trukmė bandiniuose, kurie pasižymi stipresne geltonąja liuminescencija, parodo, kad defektai, atsakingi už *spindulinę* rekombinaciją ir sąlygojantys GL juostą, yra susiję ir su *nespinduline* rekombinacija. Taigi, stebėta GL intensyvumo ir gyvavimo trukmės koreliacija patvirtina prielaidą, kad GL yra sąlygota spindulinių šuolių kompleksuose, susidedančiuose iš struktūrinių defektų ir priemaišų [3,4] bei galinčiuose suformuoti tiek spindulinės, tiek nespindulinės rekombinacijos centrus.

Apibendrinant, skirtingomis sąlygomis ir ant skirtingų padėklų augintų GaN epitaksinių sluoksnių tyrimai atskleidė koreliaciją tarp krūvininkų gyvavimo trukmės bei priemaišinių liuminescencijos juostų intensyvumų – krūvininkų gyvavimo trukmė yra mažesnė bandiniuose, pasižyminčiuose stipresne GL. Tokiu būdu, ir spindulinė rekombinacija, sąlygojanti GL (ir ML), ir nespindulinė rekombinacija, lemianti krūvininkų gyvavimo trukmę, gali vykti tuose pačiuose kompleksuose, sudarytuose iš struktūrinių defektų (dislokacijų) ir priemaišų.



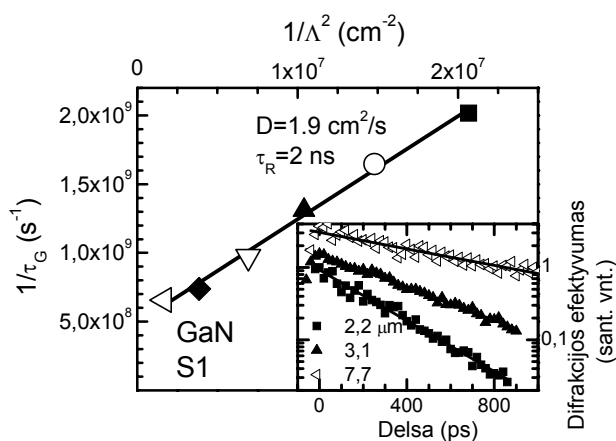
3.3 pav. GL (a) ir ML (b) juostų intensyvumo santykio su J-JL intensyvumu koreliacija su krūvininkų gyvavimo trukme GaN bandiniuose. Linijos parodo bendrą tendenciją. [P1]

3.2. Nepusiausvyrųjų krūvininkų dinamika GaN sluoksniuose

Krūvininkų dinamika stipriai priklauso nuo fotogeneruotų nepusiausvyrųjų krūvininkų tankio. Dėl to, šis skyrelis yra padalintas į dvi dalis pagal eksperimente naudotus žadinimus – 3.2.1 skyrelyje yra pristatomi krūvininkų dinamikos tyrimai aukštų sužadinimų sąlygomis, o 3.2.2 skyrelyje yra aptariami krūvininkų dinamikos ypatumai, esant labai žemiems sužadinimams.

3.2.1. Krūvininkų dinamika aukštų sužadinimų sąlygomis

Aukštų sužadinimų sąlygomis esantys dideli fotogeneruotų krūvininkų tankiai užtikrina, kad prilipimo bei defektiniai lygmenys būtų užsotinti ir neįtakotų krūvininkų gyvavimo trukmės. Gyvavimo trukmė paprastai yra nustatoma, naudojant FL su laikine skyra metodiką, tačiau FL kinetikų interpretacija tampa sudėtinga, esant daugiaeksponentiniam FL gesimui [5-8]. Šiame skyrelyje yra palyginamos dvi



3.4 pav. Dinaminių gardelių gesimo trukmės priklausomybė nuo gardelės periodo GaN bandinyje S1. Intarpe pavaizduotos kelios skirtingo periodo gardelių irimo kinetikos. [P4]

metodikos, skirtos krūvininkų dinamikos tyrimams: FL su laikine skyra ir ŠIDG, bei aptariami jų ypatumai. Krūvininkų dinamika buvo tiriama kambario temperatūroje serijoje aukštos kokybės GaN epitaksinių sluoksnių, išaugintų skirtingomis sąlygomis, naudojant MEMOCVD™ [9-11] technologiją.

GaN bandinyje, pasižyminčiame ilgiausia krūvininkų gyvavimo trukme, (S1) indukuotų gardelių irimo kinetikos, esant keliems skirtingiems gardelių periodams, yra pateiktos 3.4 paveikslo intarpe. Kaip pavaizduota paveiksle išsinišėmis

linijomis, gardelių irimas gali būti aprašytas eksponentinėmis funkcijomis. Atidėjus gardelės irimo trukmę kaip funkciją nuo gardelės periodo ir panaudojus (2.1) lygtį (žr. 3.4 pav.), galima iškart nustatyti ir krūvininkų gyvavimo trukmę, ir difuzijos koeficientą. Bandinyje S1 nustatytos vertės buvo $\tau_R = 2$ ns ir $D_a = 1.9$ cm²/s.

Būdingos kelių bandinių FL gesimo kinetikos yra pavaizduotos 3.5 paveiksle. Išmatuotos plačiame dinaminame intervale FL gesimo kinetikos dažniausiai yra neeksponentinės ir paprastai būdavo aprašomos dviejų eksponentinių komponentių suma [5-8], kurios atspindėdavo krūvininkų pagavimą į gilesnius centrus bei vėlesnę rekombinaciją [7]. Buvo laikoma, kad lėtoji komponentė ir parodo krūvininkų gyvavimo trukmę. Šiame darbe, atsižvelgdami į ŠIDG matavimų rezultatus bei analizuodami krūvininkų tankio kinetinę lygtį, mes siūlome prasmingesnę interpretaciją.

Analizuojant FL gesimą, galima daryti prielaidą, kad esant aukštiems sužadinimams, nespindulinės rekombinacijos centrai yra užsotinti. Tada nepusiausvyrieji elektronų ir skylių tankiai yra lygūs ($\Delta n = \Delta p$), o nepusiausvyrojo elektronų tankio dinamika aprašoma kinetine lygtimi:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G - \frac{\Delta n}{\tau} - B \cdot \Delta n^2, \quad (3.1)$$

kur G , τ , ir B yra, atitinkamai, generacijos sparta, gyvavimo trukmė ir bimolekulinės rekombinacijos koeficientas. FL gesimo sparta yra skirtinga skirtinguose bandiniuose, todėl galima teigti, jog krūvininkų tankio mažėjimas yra nulemtas ne spindulinės, o nespindulinės rekombinacijos. Atmetus pusiausvyrajį skylių tankį, liuminescencijos intensyvumas gali būti išreikštas per pusiausvyrajį, n_0 , ir nepusiausvyrajį, Δn , elektronų tankį:

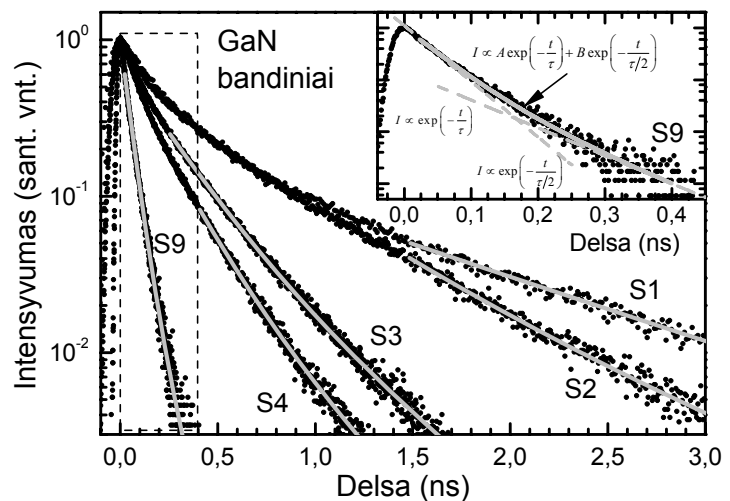
$$I_{LUM} \propto B \cdot \Delta n (\Delta n + n_0). \quad (3.2)$$

Pradinį FL gesimą, esant dideliems fotosužadintų krūvininkų tankiams, gali stipriai įtakoti trečiasis (3.1) lygties dešinėsios pusės narys, aprašantis bimolekulinę rekombinaciją, taip pat krūvininkų kaitimas bei priverstinė spinduliuotė [12,13]. Kai tik pirmasis ir trečiasis (3.1) lygties nariai tampa nereikšmingi, nepusiausvyrasis elektronų tankis Δn mažėja eksponentiškai su charakteringa trukme τ . Tolimesniame FL gesime galima išskirti du ribinius atvejus: i) kai $\Delta n \gg n_0$, I_{LUM} gesimas yra eksponentinis su charakteringa trukme $\tau/2$; ir ii) kai $\Delta n \ll n_0$, charakteringa eksponentinio gesimo trukmė tampa lygi τ . Perėjimas iš vieno ribinio atvejo į kitą priklauso nuo pusiausvyrojo elektronų tankio n_0 , taip pat gali būti įtakotas ir NRC užsotinimo [14,15]. Tokiu būdu, eksperimentinės FL gesimo kinetikos gali būti aprašomos biekspontentine funkcija:

$$I_{LUM} \propto A \exp\left(-\frac{t}{\tau/2}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3.3)$$

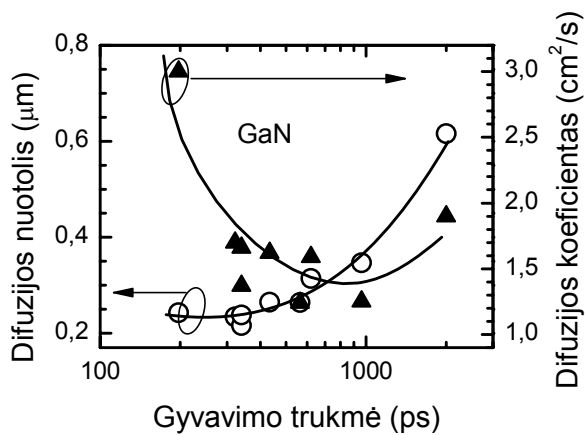
kur A ir B yra laisvai parenkami parametrai. Paėmus τ vertę lygią krūvininkų gyvavimo trukmei, nustatytai ŠIDG metodika, gautos tapatinimo kreivės yra pavaizduotos ištisinėmis linijomis 3.5 paveiksle. Paveikslo intarpe yra vienam bandiniui papildomai pavaizduoti abu aukščiau minėti ribiniai atvejai. Koeficientų B ir A santykis, parodantis komponentių indėlių santykį, yra skirtingas bandiniuose ir kinta nuo 0,03 (bandinys S1) iki 0,15 (S9) – dominuoja komponentė su charakteringa trukme $\tau/2$. Naudojant (3.3) lygtį, pavyko pakankamai gerai aprašyti FL gesimo kinetikas, o pradinės kinetikų dalys, kurios negalėjo būti sutapatintos, greičiausiai yra įtakotos krūvininkų difuzijos į gylį, FL sugerties bei paviršinės rekombinacijos [16,17].

Kadangi ŠIDG metodika leido nustatyti ne tik gyvavimo trukmę, bet ir difuzijos koeficientą, tirtuose GaN bandiniuose tuo pačiu buvo įvertintas ir krūvininkų difuzijos nuotolis. 3.6 paveiksle yra pateikta difuzijos nuotolio ir gyvavimo trukmės koreliacija. Išskyrus kelis bandinius su ilgiausiomis krūvininkų gyvavimo



3.5 pav. Skirtingų GaN bandinių FL gesimo kinetikos (taškai) bei biekspontinės tapatinimo (3.3) lygtimi kreivės (linijos). Intarpe pateikta išdidinta S9 bandinio kinetika ir du ribiniai vienos eksponentės atvejai. [Pagal P4,P5]

trukmėmis, difuzijos nuotolis yra beveik pastovus. Tokiu būdu, galima teigti, kad NRC tankis yra panašus skirtinguose bandiniuose. Esant mažesniai krūvininkų judriui, krūvininkai pasiekia nespindulinės rekombinacijos centrus per ilgesnį laiką.



3.6 pav. Krūvininkų difuzijos koeficiento bei difuzijos nuotolio koreliacija su gyvavimo trukme. Linijos parodo bendrą tendenciją. [Pagal P4,P5]

Minėti NRC greičiausiai yra susiję su dislokacijomis. Jų tankis GaN bandiniuose nustatytas naudojant duobučių ėsdinimą, ir daugumoje bandinių buvo lygus $3-5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Tarus, kad dislokacijos yra pasiskirsčiusios daugmaž vienodai, atstumas tarp dviejų gretimų dislokacijų buvo nustatytas naudojant išraišką $N_{dd} = 1/\pi r_{dd}^2$. Gauta $0,2 \mu\text{m}$ yra artima eksperimentiškai nustatytam $0,25 \mu\text{m}$ difuzijos nuotoliui. Tai patvirtina prielaidą, kad nespindulinė rekombinacija įvyksta dislokacijose ar prie pat jų. Bandinyje S1 dislokacijų tankis yra mažesnis ($\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$), todėl

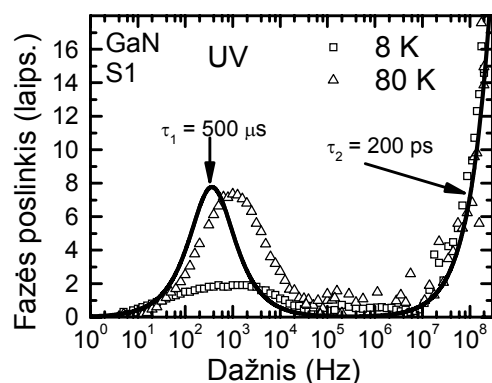
nepaisant didesnio krūvininkų judrio gyvavimo trukmė irgi yra didesnė.

Apibendrinant, palyginus ŠIDG ir FL su laikine skyra matavimų rezultatus, buvo pasiūlytas naujas FL gesimo kinetikų interpretavimo būdas: FL kinetikos yra tapatinamos biekspontine funkcija, kurios komponentių charakteringosios trukmės yra lygios gyvavimo trukmei, nustatytai ŠIDG metodika, ir pusei jos. Vienalaikis gyvavimo trukmės ir difuzijos koeficiento nustatymas parodė, kad GaN bandiniuose didesnis krūvininkų judris sumažina gyvavimo trukmę, kadangi nepusiausvirieji krūvininkai dislokacijas pasiekia greičiau. Buvo parodyta, kad MEMOCVDTM technologija leidžia išauginti aukštos kokybės GaN bandinius, kuriuose dislokacijų tankis yra sumažintas iki 10^8 cm^{-2} , o gyvavimo trukmės viršija 1 ns.

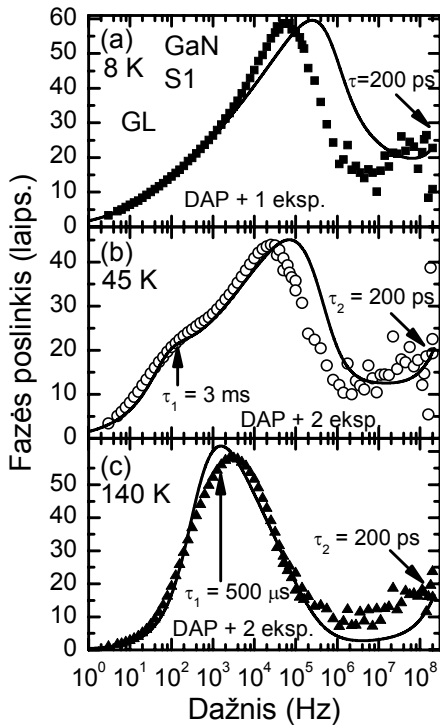
3.2.2. Krūvininkų dinamika labai žemų sužadinių sąlygomis

Žemų sužadinių sąlygomis fotogeneruotų krūvininkų tankiai yra per žemi, kad užsotintų rekombinacijos centrus, ir krūvininkų prilipimo bei rekombinacijos per defektinius lygmenis reiškiniai stipriai įtakoja krūvininkų dinamiką. Šiame skyrelyje yra aptariami krūvininkų dinamikos labai žemų sužadinių sąlygomis ypatumai aukštos kokybės GaN bandinyje.

Krūvininkų dinamikos tyrimai labai žemų sužadinių sąlygomis buvo atliekami, naudojant liuminescencijos gesimo trukmės matavimų su dažnine skyra metodiką. Sužadiniui buvo naudojamas 280 nm bangos ilgio UV šviestukas, žadinimo galios



3.7 pav. Liuminescencijos arti juostos krašto fazės poslinkio dažninės priklausomybės skirtingose temperatūrose. Ištinė linija yra pavaizduota tapatinimo kreivė (žr. tekste). [Pagal P10]



3.8 pav. GL juostos fazės poslinkio dažninės priklausomybės trijose būdingose temperatūrose. Ištinėmis linijomis yra pavaizduotos tapatinimo kreivės (žr. tekste). [Pagal P10]

charakteringosios trukmės yra lygios 500 μs ir 200 ps. Fazės poslinkis, sąlygotas lėtosios komponentės didėja keliant temperatūrą nuo 8 iki ~ 100 K, po to pradeda mažėti ir praktiškai išnyksta temperatūrose aukštesnėse nei ~ 140 K. Tokia temperatūrinė evoliucija vyksta lygiagrečiai su stipriu liuminescencijos arti juostos krašto intensyvumo mažėjimu. Tuo tarpu greitosios komponentės sąlygotas fazės poslinkis išlieka pastovus visame temperatūrų intervale.

Geltonosios liuminescencijos sąlygotas fazės poslinkio dažninės priklausomybės yra pavaizduotos 3.8 paveiksle. GL juostos gesimas gali būti suskaidytas į tris komponentes, kurių santykinis indėlis priklauso nuo temperatūros. Žemose temperatūrose fazės poslinkio didėjimas dažnių ruože nuo 5 Hz iki 30 kHz buvo lėtesnis nei esant eksponentiniam liuminescencijos gesimui, todėl buvo priskirtas rekombinacijai tarp donorų ir akceptorų porų (DAP), kuri yra būdinga GaN medžiagoms žemose temperatūrose [18,19] ir kurios sparta priklauso nuo atstumo tarp donoro ir akceptorius [20]:

$$W(R) = W_{\max} \exp\left(-\frac{2R}{a_D}\right). \quad (3.4)$$

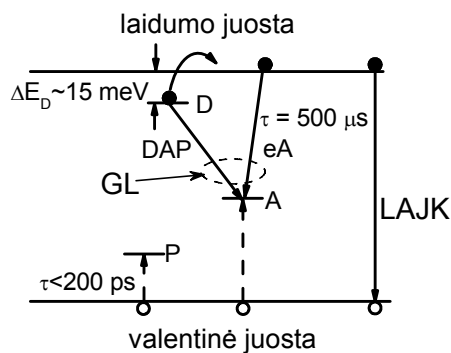
Čia W_{\max} yra šuolio tikimybė riboje $R \rightarrow 0$, o a_D – silpniau surištos DAP dedamosios Boro radiusas. Geriausias sutapatinimas su eksperimentiniais duomenimis buvo gautas, esant DAP tankiui $N = 2.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $a_D = 24 \text{ \AA}$ (efektinės masės artinyje atitinka seklių donorą su aktyvacijos energija lygia 30 meV [21]) ir $W_{\max} = 4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Siekiant aprašyti fazės poslinkio eigą aukštuose dažniuose [žr. 3.8(a) pav.], prie DAP komponentės buvo pridėta greita eksponentinė komponentė su charakteringa trukme, lygia 200 ps. Ši

tankis buvo $\sim 0,5 \text{ mW/cm}^2$. Esant tokiems žemiems sužadainimams, GaN FL spektras susideda tik iš dviejų juostų – artimos juostos kraštui liuminescencijos (AJKL) ir geltonosios liuminescencijos juostos. Matavimuose su dažnine skyra, šios dvi juostos buvo atskirtos naudojant optinius filtrus. Siekiant atskirti galimus konkuruojančius rekombinacijos kanalus, matavimai buvo atlikti plačiame temperatūrų intervale nuo 8 iki 300 K.

Liuminescencijos arti juostos krašto fazės poslinkio dažninės priklausomybės skirtingose temperatūrose yra pavaizduotos 3.7 paveiksle. Visose temperatūrose fazės poslinkio kreivės pasižymi tomis pačiomis ypatybėmis. Fazės poslinkis didėja, didinant dažnį iki ~ 1 kHz. Toliau didinant dažnį, fazės poslinkis mažėja dėl pradedančios dominuoti labai greitos komponentės, kuri taip pat pasireiškia ir fazės poslinkio didėjimu labai aukštuose dažniuose (>10 MHz). Kaip parodyta ištisine linija 3.7 paveiksle, liuminescencijos arti juostos krašto fazės poslinkio dažninės priklausomybės gali būti aprašytos biekspontine funkcija, kurios

greitoji komponentė buvo stebima visame temperatūrų intervale kaip ir analogiška komponentė liuminescencijos arti juostos krašto srityje.

Keliant temperatūrą, atsiranda dar viena eksponentinė komponentė [žr. 3.8(b) pav.]. Jos charakteringa trukmė sumažėja nuo ~10 ms esant 30 K temperatūrai iki ~500 μ s esant 100 K temperatūrai. Toliau keliant temperatūrą virš 100 K, šios komponentės charakteringa trukmė nebesikeičia, o ji pradeda dominuoti vietoje DAP komponentės [žr. 3.8(c) pav.]. Šią eksponentinę komponentę galima priskirti šuoliams laidumo juosta-



3.9 pav. Modelis, iliustruojantis krūvininkų dinamiką GaN medžiagoje labai žemų sužadinių sąlygomis. D yra donoras, A – akceptorius, P – prilipimo lygmuo. Ištininės linijos žymi spindulinius šuolius, brūkšninės – nespindulinius. [P11]

akceptorius (e-A), kurie palaipsniui pakeičia DAP rekombinaciją, kai sekieji donoriai yra termiškai jonizuojami. Charakteringos trukmės temperatūrinė priklausomybė leido įvertinti donoro lygmens padėtį, kuri buvo gauta ~15 meV. Ši vertė yra artima anksčiau publikuotoms vertėms [19,22].

Bendrai paėmus, tapatinimas buvo atliktas, siekiant aprašyti FL gesimo temperatūrinę evoliuciją abiejuose spektriniuose intervaluose,

naudojant kiek galima mažiau komponentių. Krūvininkų dinamika labai žemuose sužadiniuose gali būti aiškinama naudojant modelį, pavaizduotą 3.9 pav.

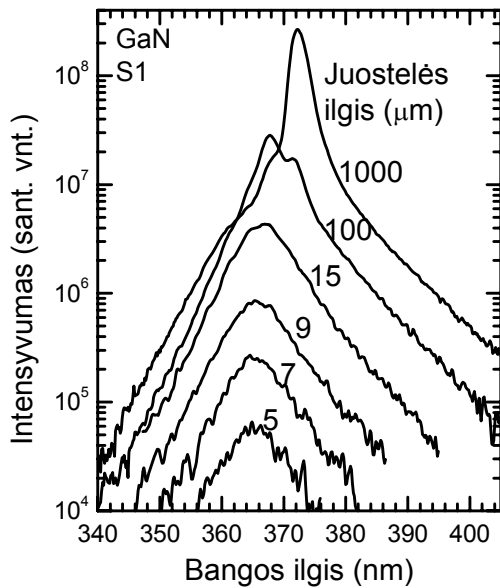
Žemose temperatūrose GL yra sąlygota DAP rekombinacijos. Kylant temperatūrai, donoro lygmuo, įeinantis į DAP, tampa jonizuotas, o GL palaipsniui tampa sąlygota šuolių tarp laidumo juostos ir akceptorių.

Greitoji komponentė ($\tau \leq 200$ ps) žemose temperatūrose greičiausiai yra sąlygota surišusių eksitonų rekombinacijos. Šis rekombinacijos kanalas konkuruoja dėl laisvų skylių pagavimo su DAP centrais, šitaip prisidėdamas ir prie GL dinamikos. Temperatūrai didėjant, terminė surišusių eksitonų jonizacija išlaisvina skyles, išryškėja lėtoji komponentė, matoma liuminescencijos arti juostos krašto dinamikoje. Ši komponentė atspindi elektronų tankio mažėjimą dėl juosta-akceptorius rekombinacijos su charakteringa trukme ~500 μ s. Aukštose temperatūrose lėtoji liuminescencijos arti juostos krašto komponentė išnyksta dėl skylių pagavimo į prilipimo lygmenis, esančius pakankamai giliai, kad jie nebūtų jonizuoti net ir kambario temperatūroje. Šių prilipimo lygmenų tankis greičiausiai yra mažas ir jie yra užsotinami esant aukštiems sužadiniams. Tačiau šie lygmenys tampa svarbūs esant labai žemiems sužadiniams.

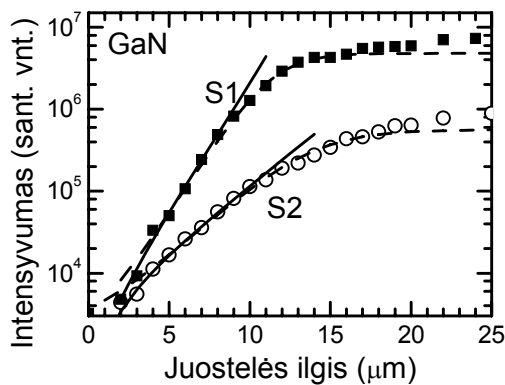
Apibendrinant, dažninės skyros metodika leido atlikti krūvininkų dinamikos tyrimus labai žemų sužadinių sąlygomis ir atskleisti skirtingų GL sąlygojančių rekombinacijos kanalų konkurenciją.

3.3. Optinio stiprinimo matavimai GaN sluoksniuose naudojant kintamo ilgio juostelės metodiką

Optinio stiprinimo matavimams dažniausiai yra naudojama kintamo ilgio juostelės metodika [23]. Šiame skyrelyje yra aptartas šios metodikos ribotumas, matuojant GaN sluoksnius, pasižyminčius dideliu optinio stiprinimo koeficientu. Taip pat palygintas



3.10 pav. GaN bandinio S1 liuminescencijos iš krašto spektrai, išmatuoti esant skirtingo ilgio juostelėms, ir pastoviam 2 MW/cm^2 žadinimui. [P6]



3.11 pav. Priverstinės spinduliuotės intensyvumo priklausomybė nuo juostelės ilgio GaN bandiniuose S1 (kvadratai) ir S2 (apskritimai). Ištinėmis linijomis yra pavaizduotas tapatinimas (3.5) lygtimi, brūkšninėmis – (6) lygtimi nuorodoje [25]. [P6]

kraštas yra užsotinamas greičiau nei ilgabangis ir juostos smailė slenka į raudonąją pusę.

Optinio stiprinimo sotinimas yra aiškiai matomas atvaizdavirus FL intensyvumo priklausomybę nuo juostelės ilgio (žr. 3.11 pav.). Nesant sotinimo, liuminescencijos iš krašto intensyvumo priklausomybė nuo juostelės ilgio yra aprašoma tokia formule:

$$I_{st}(h\nu, l) \propto \frac{I_{sp}(h\nu, l)}{g} [\exp(gl) - 1], \quad (3.5)$$

kur I_{sp} – spontaninės spinduliuotės intensyvumas, g – stiprinimo koeficientas, l – juostelės ilgis. Tapatinimo, naudojant (3.5) lygtį, rezultatai yra pavaizduoti ištinėmis linijomis 3.11 paveiksle. Matosi, kad gerai aprašyti eksperimentinius duomenis pavyko tik juostelės ilgiams iki $\sim 10 \mu\text{m}$, o esant ilgesnėms juostelėms FL juostos intensyvumas pradeda sotintis. Šis procesas vyksta lygiagrečiai su FL spektruose matomu juostos

optinis stiprinimas dviejuose bandiniuose (S1 ir S2) su skirtinga krūvininkų gyvavimo trukme.

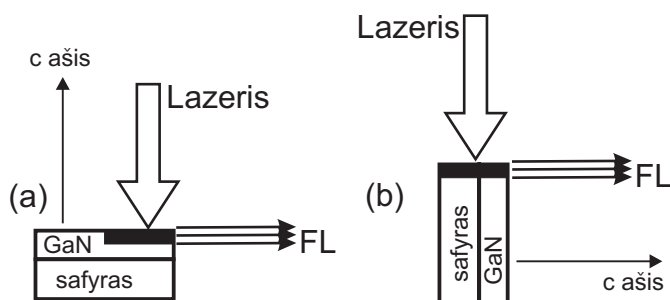
GaN bandinyje S1 spinduliuotė susistiprina sklisdama išilgai sužadintos juostelės, kai žadinimo galios tankis viršija $\sim 100 \text{ kW/cm}^2$. Sustiprintos spinduliuotės intensyvumas, I_{lium} , didėja kaip $I_{lium} \propto I_{\text{žad}}^3$, kas yra būdinga priverstinės spinduliuotės juostai.

Esant aukštiems žadinimams, FL spektras priklauso nuo juostelės ilgio (žr. 3.10 pav.). Žadinant trumpa juostele, FL juostos smailė yra ties 365,3 nm, t.y. šiek tiek pasislinkusi į raudonąją pusę, lyginant su spontaninės spinduliuotės juostos smaile, esančia ties 362 nm. Didinant juostelės ilgį, juostos smailė slenka dar labiau į raudonąją pusę, atsiranda nauja juosta su smaile ties 372 nm. Kelių smailių atsiradimas spektre yra greičiausiai susijęs su skirtingomis sklaidimo sąlygomis skirtingiems bangų ilgiams. Panašus juostos smailės slinkimasis į raudonąją pusę buvo anksčiau stebėtas InGaN kvantinių duobių dariniuose [24]. Esant ilgiu juostelei, priverstiniai šuoliai sumažina elektronų-skylių porų tankį, tuo pačiu nužemina Fermi lygmenį. Sumažėjus tarpui tarp elektronų ir skylių kvazi-Fermi lygmenų, trumpabangis FL juostos kraštas tampa nebe stiprinamas, o sugeriamas. Tuo tarpu ilgabangis juostos kraštas vis dar yra stiprinamas, o dėl didėjančio juostelės tūrio, bendras spinduliuotės intensyvumas irgi didėja. Tokiu būdu, trumpabangis FL juostos

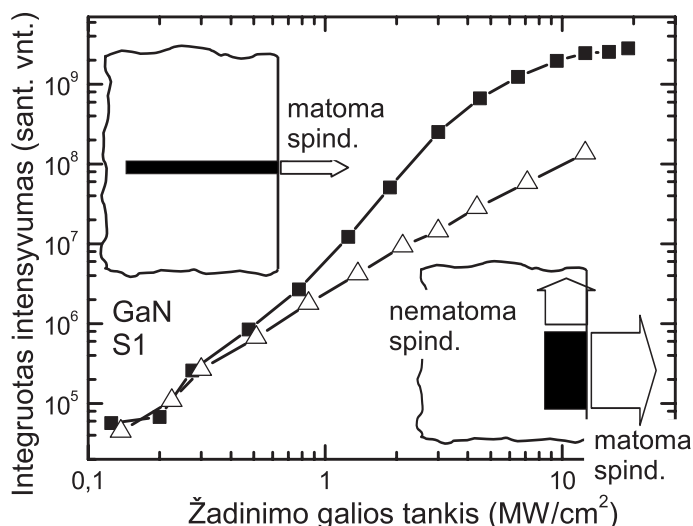
smailės raudonoju poslinkiu (žr. 3.10 pav.). Tai patvirtina prielaidą, kad, nors ilgabangio krašto stiprinimas yra silpnesnis, tačiau jis išlieka ir prie ilgesnių juostelių, kai trumpabangis kraštas jau yra užsotintas.

Stiprinimo sotinimas drastiškai apriboja juostelės ilgių intervalą, tinkamą aprašyti (3.5) lygtimi. Atsižvelgus į šį sotinimą lygtyje, aprašančioje šviesos sklaidimą juostelėje, tinkamą tapatinimui intervalą galima išplėsti. Toks metodas buvo pasiūlytas GaN pagrindu pagamintų kvantinių duobių lazerio aprašymui [25]. Tapatinimo, naudojant šį metodą, rezultatai yra pavaizduoti brūkšninėmis linijomis 3.11 paveiksle. Tapatinimo intervalas buvo išplėstas ~2 kartus iki ~20 μm juostelės ilgių. Optinio stiprinimo vertės S1 bandiniui buvo panašios abiem atvejais – 7300 cm⁻¹, naudojant (3.6) lygtį, ir 7500 cm⁻¹, atsižvelgus į stiprinimo sotinimą.

Didinant žadinimą, optinio stiprinimo koeficientas irgi didėja, todėl atsižvelgus į (3.6) lygtį FL iš krašto intensyvumas turėtų augti žymiai greičiau nei spontaninės spinduliuotės. 3.12 paveiksle yra pateiktos FL intensyvumo priklausomybės nuo žadinimo galios tankio dviem ribiniams atvejams: i) „ilga“ juostelė, kai jos ilgis (1 mm) yra daug didesnis už jos plotį (30 μm); ir ii) „trumpa“ juostelė, kai jos ilgis (10 μm) yra mažesnis už jos plotį (30 μm). Pirmuoju atveju, FL intensyvumas priklauso nuo žadinimo kaip $I_{lum} \propto I_{\text{žad}}^3$, kas yra būdinga priverstinei spinduliuotei. Tuo tarpu „trumpos“ juostelės atveju, priklausomybė yra silpnesnė – $I_{lum} \propto I_{\text{žad}}^2$. Ši silpnesnė priklausomybė greičiausiai yra susijusi su tuo, kad juostelės ilgis, šiuo atveju, yra mažesnis už jos plotį. Dėl šios priežasties šviesa, sklindanti išilgai bandinio krašto, gerokai labiau įtakoja krūvininkų tankį – nuskurdina nepusiausvyrų elektronų ir skylių užpildą ir sąlygoja silpnesnę priklausomybę nuo žadinimo nei ilgos juostelės atveju.



3.13 pav. Dvi KJL metodikos konfigūracijos, naudotos eksperimentuose: įprastinė, kai žadinanti juostelė yra ant bandinio paviršiaus (a), ir modifikuota, kai žadinanti juostelė yra ant bandinio briaunos (b).



3.12 pav. GaN bandinio S1 priverstinės spinduliuotės intensyvumo priklausomybė nuo žadinimo, esant „ilgai“ (kvadratai) ir „trumpai“ (trikampiai) juostelei. Intarpuose schematiškai pavaizduotos juostelės konfigūracijos abiem atvejais. [P6]

Kadangi bandiniai pasižymėjo stipria priverstine spinduliuote net ir esant juostelės ilgiams ~10 μm, kas atitiko GaN sluoksnio storį, optinio stiprinimo matavimai buvo atlikti ir nestandartinėje konfigūracijoje – juostelę žadinant ant bandinio briaunos (žr. 3.13 pav.). Ši konfigūracija GaN medžiagų

tyrimams turi papildomų privalumų, jei atsižvelgtume į spinduliuotės poliarizaciją. GaN medžiagose spinduliuotė yra stipriai poliarizuota statmenai kristalo c ašiai ($E \perp c$) [26,27]. Kadangi įprastinėje konfiguracijoje [3.13(a) pav.] šviesa išeina iš bandinio irgi statmenai c ašiai, dalis šviesos, poliarizuotos išilgai sklidimo krypties, negali skliti išilgai juostelės ir yra išbarstomi. Žadinant bandinį ant briaunos [3.13(b) pav.], šviesa yra spinduliuojama išilgai c ašies ir visi fotonai gali skliti išilgai juostelės.

Žadinant GaN bandinį ant briaunos, priverstinės spinduliuotės juosta atsiranda pakėlus žadinimą virš $\sim 1 \text{ MW/cm}^2$ slenksčio. Optinio stiprinimo koeficientą šioje konfiguracijoje galima apytiksliai įvertinti suskaičiavus slenkstinį stiprinimą, reikalingą šviesos stiprinimui rezonatoriuje tarp sluoksnis/padėklas ir sluoksnis/oras sandūrų. Naudojant atspindžio koeficientus $R_1 = 21\%$ ir $R_2 = 4\%$, atitinkamai, GaN/oras ir GaN/safyras sandūroms, slenkstinis stiprinimas skaičiuojamas, naudojant išraišką $g_{thr} = (2L)^{-1} \ln(R_1 R_2)^{-1}$, ir yra lygus 2200 cm^{-1} . Tai reiškia, kad esant 1 MW/cm^2 žadinimo galios tankiui, šviesai, sklindančiai statmenai bandinio paviršiui, optinis stiprinimas yra lygus 2200 cm^{-1} . Tarus, kad stiprinimo koeficientas didėja logaritmiškai nuo žadinimo [24], gali būti pasiektos vertės iki $\sim 7000 \text{ cm}^{-1}$, pakėlus žadinimą iki $\sim 9 \text{ MW/cm}^2$ (prie pat pramušimo ribos). Tuo atveju, stiprinimo vertės būtų panašios šviesai, sklindančiai tiek išilgai, tiek statmenai c ašiai.

Stiprinimo užsotinimas apriboja kintamo ilgio juostelės metodikos galimybes tirti optinį stiprinimą stipriai sužadintose GaN medžiagose. Nepaisant to, ši metodika gali būti naudinga skirtingų bandinių palyginimui, kaip yra pademonstruota 3.11 paveiksle. Stiprinimas buvo palygintas dviejuose GaN bandiniuose, besiskiriančiuose krūvininkų gyvavimo trukme (2 ns bandinyje S1 ir 960 ps bandinyje S2).

3.11 paveiksle yra pavaizduotos abiejų bandinių FL intensyvumo priklausomybės nuo juostelės ilgio bei atliktas tapatinimas, naudojant aukščiau aptartus metodus. Nustatytos stiprinimo koeficiento vertės buvo lygios 7300 ir 3600 cm^{-1} , atitinkamai, S1 ir S2 bandiniams, tapatinant (3.5) lygtimi. Panašios vertės, 7500 ir 4000 cm^{-1} , buvo nustatytos ir atsižvelgus į stiprinimo sotinimą [25]. Optinio stiprinimo koeficiento santykis tarp skirtingų bandinių ($\sim 1,9$) buvo panašus abiem atvejais bei koreliavo su santykiu tarp krūvininkų gyvavimo trukmių šiuose bandiniuose (~ 2). Tokiu būdu, kintamo juostelės ilgio metodika yra tinkama skirtingų bandinių palyginimui.

Apibendrinant, aukštos kokybės GaN sluoksniuose, išaugintuose naudojant MEMOCVDTM technologiją, buvo nustatytos optinio stiprinimo vertės iki $\sim 7500 \text{ cm}^{-1}$. Panašios stiprinimo vertės buvo gautos ir šviesai, sklindančiai lygiagrečiai c ašiai. Buvo parodyta, kad stiprinimo sotinimas apriboja kintamo ilgio juostelės metodikos taikymus tiriant medžiagas su dideliu stiprinimo koeficientu, tačiau ši metodika gali būti naudinga skirtingų bandinių palyginimui.

4 Skyrius. Krūvininkų dinamika AlGaIn sluoksniuose

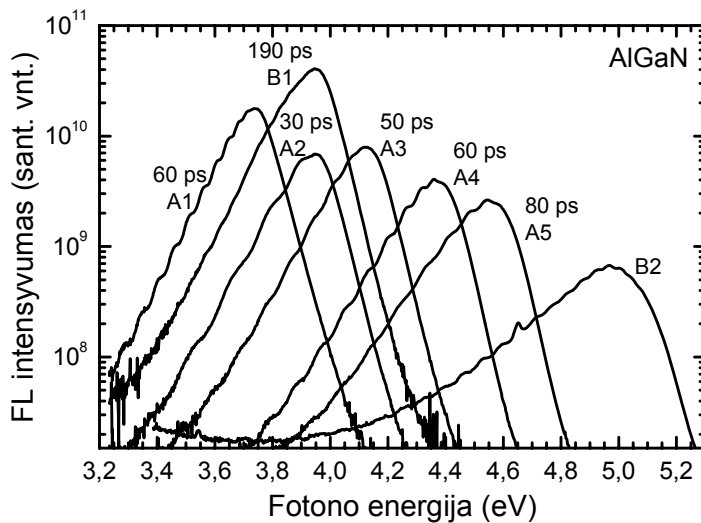
4.1. Nepusiausvyrųjų krūvininkų gyvavimo trukmė AlGaIn sluoksniuose

Šiame skyrelyje yra lyginamos AlGaIn sluoksnių su skirtingu aliuminio kiekiu optinės savybės. Buvo tirtos dvi serijos bandinių, išaugintų naudojant skirtingas technologijas: i) A serijos bandiniai buvo auginti įprastine MOCVD technologija, o aliuminio koncentracija sluoksniuose buvo lygi 17% , 26% , 33% , 43% ir 50% , atitinkamai, A1-A5 bandiniams; ii) B serijos bandiniai buvo auginami, naudojant

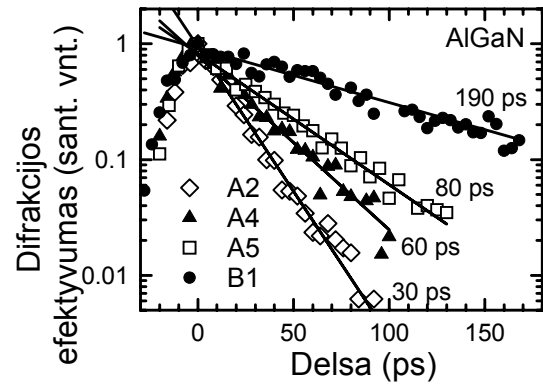
MEMOCVDTM [9-11] technologija, aliuminio koncentracija bandiniuose buvo lygi 26% ir 65%, atitinkamai, B1 ir B2 bandiniuose. Optinių savybių priklausomybė nuo aliuminio kiekio buvo analizuojama, lyginant krūvininkų gyvavimo trukmes bei FL intensyvumus kambario temperatūroje.

Krūvininkų gyvavimo trukmės buvo nustatomos, naudojant ŠIDG metodiką. Kelių AlGaIn bandinių gardelių irimo kinetikos yra pateiktos 4.1 paveiksle. Kaip pavaizduota paveiksle ištinėmis linijomis, gardelių irimas gali būti aprašytas eksponentinėmis funkcijomis. Kadangi šviesa buvo sukuriama didelio periodo gardelės, tai, atsižvelgus į (2.1) lygtį, gardelių irimo charakteringa trukmė buvo lygi krūvininkų gyvavimo trukmei.

Serijos A bandiniuose indukuotos gardelės nunykdavo per greitai, kad būtų galima pastebėti kokią nors difuzijos įtaką, keičiant indukuojamų gardelių periodą. Todėl nustatyti ir krūvininkų gyvavimo trukmę, ir difuzijos koeficientą pavyko tik bandiniui B1. Gautos vertės buvo lygios $D = 1.1 \pm 0.3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ir $\tau_R = 196 \pm 4 \text{ ps}$. Difuzijos nuotolis, šiuo atveju, yra lygus $L_D = 0.15 \pm 0.03 \text{ }\mu\text{m}$. Gauta difuzijos nuotolio vertė yra panaši į atstumą tarp dviejų artimiausių dislokacijų $r_{dd} = 0.13 \text{ }\mu\text{m}$, kuris buvo apytiksliai įvertintas iš dislokacijų tankio ($\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$), gauto duobučių ėsdinimo būdu, naudojant paprasčiausią sąryšį $N_{dd} = 1/\pi r_{dd}^2$. Tokiu būdu galima teigti, kad sluoksniuose esančios dislokacijos apriboja krūvininkų difuziją ir gyvavimo trukmę. Šis teiginys yra papildomai patvirtinamas, lyginant B1 ir A2 bandinius, kuriuose yra vienoda aliuminio koncentracija: B1 bandinyje gyvavimo trukmė yra lygi $\sim 190 \text{ ps}$, dislokacijų tankis – $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, A2 bandinyje gyvavimo trukmė lygi $\sim 30 \text{ ps}$, dislokacijų tankis – 10^{10} cm^{-2} . Gyvavimo trukmių santykis yra lygus 6,5, o dislokacijų tankių – 5. Toks šių santykių panašumas gali būti laikomas patenkinamu, atsižvelgus, kad bandinyje A2 atstumas tarp dislokacijų yra panašus į pačios dislokacijos efektyvų radiusą. Taigi, gauti rezultatai parodo, kad AlGaIn sluoksniuose krūvininkų gyvavimo trukmė yra nulemta nespindulinės rekombinacijos, vykstančios dislokacijose. Panaši išvada buvo padaryta ir ankstesniuose darbuose, teigiančiuose, kad sraigtinės dislokacijos veikia kaip nespindulinės rekombinacijos centrai [28,29].



4.2 pav. AlGaIn bandinių su skirtingu aliuminio kiekiu FL spektrai. Šalia spektrų yra nurodytos krūvininkų gyvavimo trukmės bandiniuose. [P2]



4.1 pav. Dinaminių gardelių irimo kinetikos AlGaIn bandiniuose. Ištinėmis linijomis pavaizduotos eksponentinės funkcijos. [P2]

Parodo, kad AlGaIn sluoksniuose krūvininkų gyvavimo trukmė yra nulemta nespindulinės rekombinacijos, vykstančios dislokacijose. Panaši išvada buvo padaryta ir ankstesniuose darbuose, teigiančiuose, kad sraigtinės dislokacijos veikia kaip nespindulinės rekombinacijos centrai [28,29].

Tirtų AlGaIn bandinių FL spektrai yra pavaizduoti 4.2 paveiksle. Prie spektrų taip pat yra nurodytos ir krūvininkų gyvavimo trukmės. Vėl

palyginus B1 ir A2 bandinius, jų FL intensyvumų santykis yra lygus 6, kas yra panašu į gyvavimo trukmių (6,5) ir dislokacijų tankių (5) santykius. Sumažintas dislokacijų tankis bandinyje B1 sąlygoja mažesnę nespindulinės rekombinacijos spartą, taigi krūvininkų gyvavimo trukmė išauga. Tuo tarpu spindulinė rekombinacija vyksta pastovia sparta, kuri yra daug lėtesnė už nespindulinės rekombinacijos, todėl FL intensyvumas irgi išauga.

FL intensyvumas mažėja, didėjant aliuminio koncentracijai sluoksnyje, tuo tarpu krūvininkų gyvavimo trukmės lieka panašios (žr. bandinius A1, A3, A4 ir A5). Kadangi krūvininkų gyvavimo trukmė yra ribojama nespindulinės rekombinacijos, FL intensyvumo mažėjimą, esant pastoviai gyvavimo trukmei, galima priskirti *spindulinės* rekombinacijos spartos mažėjimui. Tokia spindulinės rekombinacijos spartos priklausomybė nuo aliuminio kiekio buvo suskaičiuota teoriškai [30], tačiau eksperimentinis FL intensyvumas mažėja stipriau. Skirtumas gali būti aiškinamas tuo, kad didėjant aliuminio koncentracijai AlGa_{0.26}N sluoksnyje, keičiasi spinduliuotės poliarizacija iš $E \perp c$ į $E \parallel c$. Dėl to mažėja iš sluoksnio išeinančios šviesos dalis [27].

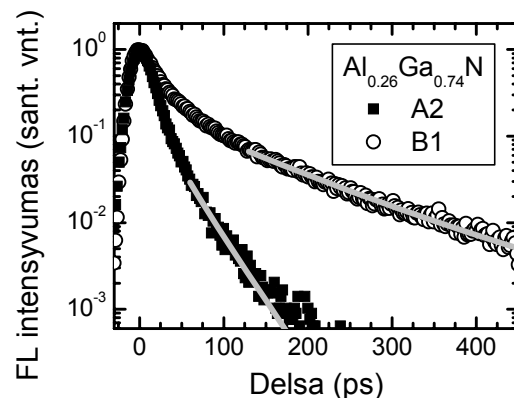
Apibendrinant, FL, ŠIDG ir duobučių ęsdinimo rezultatai parodė, kad krūvininkų gyvavimo trukmė AlGa_{0.26}N sluoksniuose yra ribojama daugiausia dėl krūvininkų difuzijos prie dislokacijų, kur įvyksta nespindulinė rekombinacija. Spindulinė rekombinacija vyksta tokia pačia sparta AlGa_{0.26}N bandiniuose su tuo pačiu aliuminiu kiekiu (bet skirtingu dislokacijų tankiu) ir mažėja, didėjant aliuminio kiekiui. Buvo parodyta, kad MEMOCVDTM technologija leidžia išauginti AlGa_{0.26}N sluoksnius, pasižyminčius 6 kartus intensyvesne FL, lyginant su įprastine MOCVD technologija augintais sluoksniais.

4.2. Eksitonų šokavimas ir nespindulinė rekombinacija AlGa_{0.26}N sluoksniuose

Statistinės AlGa_{0.26}N sudėties fliktuacijos sluoksnyje sukuria potencialo fliktuacijas, kurios gali erdviškai lokalizuoti eksitonus. Nors teoriškai nėra numatyta jokio galimo fazių atsiskyrimo AlGa_{0.26}N junginiuose [31,32], sudėties fliktuacijos ir aliuminio segregacija, ypač aplink dislokacijas [33], buvo stebėtos elektroninės mikroskopijos ir katodoluminescencijos su erdvine skyra metodais [33,34]. Šiame skyrelyje juostos potencialo fliktuacijų profilis yra lyginamas dviejuose AlGa_{0.26}N bandiniuose su vienodu aliuminio kiekiu, tačiau išaugintuose naudojant skirtingas technologijas – A2 ir B1 bandiniuose, aprašytuose 4.1 skyrelyje.

Kaip jau buvo pavaizduota 4.1 paveiksle ir aptarta 4.1 skyrelyje, bandiniuose A2 ir B1 indukuotų gardelių kinetikos buvo aprašytos eksponentinėmis funkcijomis ir nustatytos krūvininkų gyvavimo trukmės. Jos lygios 30 ps bandinyje A2 ir 190 ps bandinyje B1.

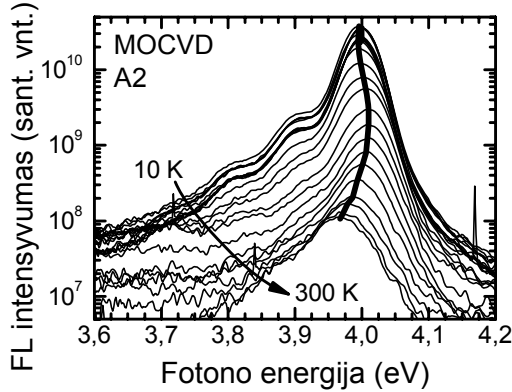
Krūvininkų dinamikos šiuose bandiniuose skirtumai buvo stebėti ir FL gesimo kinetikose (žr. 4.3 pav.). Išmatuotos kinetikos buvo neeksponentinės, tačiau pakankamai geras kinetikų aprašymas buvo pasiektas, naudojant biekspontinę funkciją:



4.3 pav. Al_{0.26}Ga_{0.74}N bandinių FL gesimo kinetikos. Linijomis pavaizduotas tapatinimas, naudojant (4.1) lygtį. [P3]

$$I_{LUM}(t) \propto A \exp\left(-\frac{t}{\tau/2}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4.1)$$

kur τ yra krūvininkų gyvavimo trukmė, gauta iš ŠIDG eksperimentų, o A ir B – laisvai parenkami parametrai. Tokios biekspontinės funkcijos pagrindimas aptartas



4.4 pav. AlGaIn bandinio A2 FL spektro priklausomybė nuo temperatūros. Ištinė linija yra pavaizduota juostos smailės padėties temperatūrinė priklausomybė. [Pagal P7]

3.2.1 skyrelyje. Tapatinimo rezultatai yra pavaizduoti ištinėmis linijomis 4.3 pav. Toks suderintas ŠIDG ir FL kinetikų tapatinimas buvo pakankamai geras ir patvirtino nustatytas 30 ps ir 190 ps gyvavimo trukmes, atitinkamai, bandiniuose A2 ir B1.

Šitoks didelis krūvininkų gyvavimo trukmių skirtumas kambario temperatūroje gali atsirasti dėl dviejų priežasčių: dėl NRC tankio skirtumo arba dėl juostos tarpo fliuktuacijų, kurios sutrukdo krūvininkams pasiekti NRC, amplitudės skirtumo. Norint atskirti šiuos du efektus, buvo atliktas eksitonų šokavimo modeliavimas Monte

Karlo metodu, siekiant aprašyti FL spektrų temperatūrinę dinamiką žemuose sužadiniuose.

FL spektrų temperatūrinė dinamika A2 bandiniui yra pavaizduota 4.4 paveiksle. Panaši temperatūrinė dinamika buvo išmatuota ir bandiniui B1. Pagrindinės luminescencijos juostos smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros yra parodyta ištinė linija. Ji yra S formos, tuo tarpu juostos pločio priklausomybė nuo temperatūros (žr. 4.5 pav.) yra W formos. Tokios anomalios juostos smailės ir pločio priklausomybės nuo temperatūros buvo stebėtos InGaIn [35], AlInGaIn [36] ir AlGaIn [37] medžiagose ir parodo, kad žemose temperatūrose vyrauja eksitonų šokavimas per lokalias būsenas.

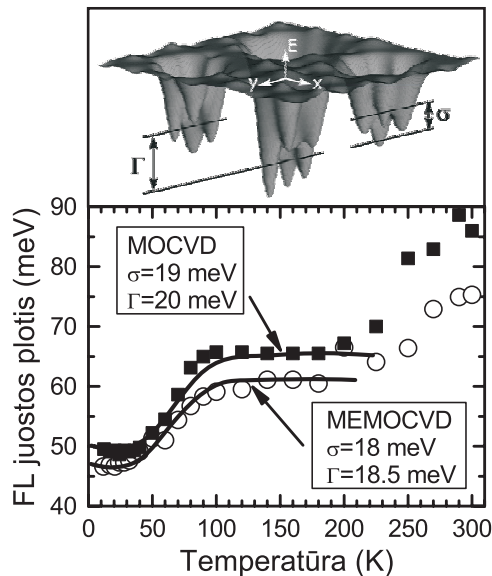
Norint kiekybiškai aprašyti W formos juostos pločio priklausomybes, buvo atliktas trimatis eksitonų šokavimo modeliavimas Monte Karlo metodu [36]. Buvo laikoma, kad lokalias būsenos yra visiškai atsitiktinai pasiskirsčiusios erdvėje, o jų energinio gylio skirstinys atitinka Gauso pasiskirstymą. Eksitono šuolio iš lokalias būsenos i į būseną j atstumu R_{ij} sparta buvo aprašoma Milerio-Abrahamso išraiška:

$$v_{ij} = v_0 \exp\left\{-\frac{2R_{ij}}{\alpha} - \frac{E_j - E_i + |E_j - E_i|}{2kT}\right\}, \quad (4.2)$$

kur E_i ir E_j yra, atitinkamai, i -tosios ir j -tosios lokalias būsenos energija, α – eksitono banginės funkcijos charakteringas ilgis, v_0 – iššokimo dažnis. Bet kurioje lokaloje būsenoje esantis eksitonas galėjo arba peršokti į kitą būseną, arba rekombinuoti ir išspinduliuoti fotoną. Kažkuris įvykis iš šių dviejų buvo pasirenkamas atsitiktinai, atsižvelgiant į visas galimas šokavimo, aprašomo (4.2) lygtimi, bei spindulinės rekombinacijos spartas. Lokalių būsenų, kuriose eksitonas rekombinuodavo, energijos būdavo išsaugojamos ir iš jų buvo kaupiamas bendras FL spektras.

Modeliavimas buvo atliekamas naudojant du erdvinius potencialo fliuktuacijų profilio modelius: vieno mastelio ir dvejopo mastelio. Vieno mastelio modelis kokybiškai aprašė eksperimentinę juostos pločio W formą, tačiau absoliutinės vertės buvo gerokai mažesnės nei išmatuotos. Geras kiekybinis juostos pločio aprašymas (žr.

4.5 pav; ištisinės linijos) buvo pasiektas, naudojant dvejo mastelio fliktuacijų modelį, schematiškai pavaizduotą 4.5 paveikslo intarpe. Pagal tokį modelį eksitonai šokuoja per lokalias būsenas, atsiradusias dėl potencialo fliktuacijų su dispersija σ žemesnio



4.5 pav. FL juostos pločio temperatūrinės priklausomybės AlGaIn bandiniuose A2 ir B1. Ištisinėmis linijomis yra pavaizduoti eksitonų šokavimo modeliavimo rezultatai, naudojant dvejo mastelio modelį, pavaizduotą intarpe. [P3]

temperatūroje. Tai patvirtina laisvųjų krūvininkų rekombinacijos dominavimą kambario temperatūroje.

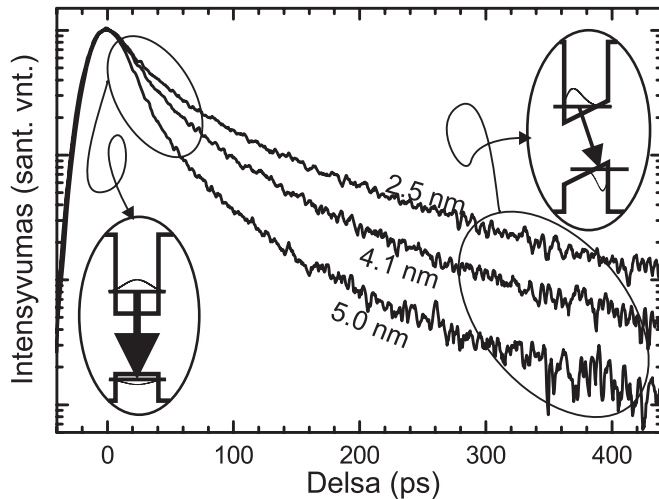
Reikšmingo fliktuacijų amplitudės skirtumo nebuvimas skirtinguose AlGaIn bandiniuose parodo, kad gyvavimo trukmių skirtumas (6 kartai) atsiranda dėl nevienodo NRC tankio. Kaip jau buvo minėta 4.1 skyrelyje, dislokacijų tankio santykis šiuose bandiniuose buvo lygus 5.

Apibendrinant, kiekybinis anomalijų juostos pločio temperatūrinių priklausomybių aprašymas atskleidė dvejo mastelio potencialo fliktuacijas, panašias kaip InGaIn ir AlInGaIn junginiuose. Eksitonai šokuoja per atsitiktines potencialo fliktuacijas (su dispersija σ) atskirose žemesnio potencialo srityse, kurių vidutinė eksitono energija yra pasiskirsčiusi su dispersija Γ . Šios sritys, matyt, yra sąlygotos mažesnio aliuminio kiekio. Didelis gyvavimo trukmių skirtumas (6 kartai) bandiniuose atsirado ne dėl potencialo fliktuacijų (lygių $\sigma \approx \Gamma \approx 19$ meV), bet dėl skirtingų nespindulinės rekombinacijos centrų tankių bandiniuose, augintuose naudojant skirtingas technologijas.

5 Skyrius. Krūvininkų dinamika AlGaIn/AlGaIn kvantinėse duobėse

5.1. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo kvantinės duobės pločio AlGaIn/AlGaIn kvantinėse duobėse

Šiame skyrelyje yra tiriama krūvininkų dinamika serijoje bandinių su AlGaIn/AlGaIn kvantinių duobių dariniais. Šie dariniai buvo sudaryti iš $n\text{-Al}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{N}$ buferinio sluoksnio, ant kurio buvo išauginta 10 porų vienodo pločio kvantinių duobių,



5.1 pav. Sunormuotos FL gesimo kinetikos AlGaN/AlGaN struktūrose su skirtingu duobės pločiu. Intarpuose yra parodyti du ribiniai vidinio elektrinio lauko ekranavimo/atsistatymo atvejai, jie priskirti atitinkamoms sritims FL kinetikose. [Pagal P9]

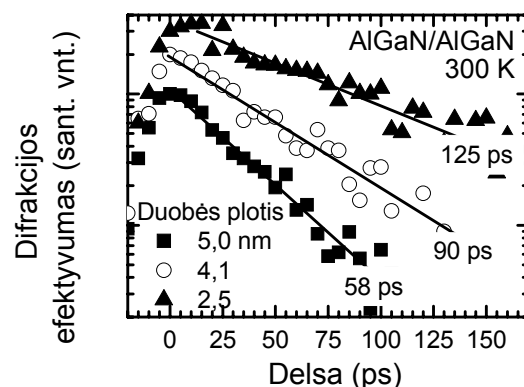
krūvininkų tankio mažėjimas yra sąlygotas *nepindulinės* rekombinacijos, todėl krūvininkų tankis turėtų mažėti eksponentiškai su charakteringa trukme, sąlygota nespindulinės rekombinacijos spartos. Tuo tarpu *spindulinės* rekombinacijos sparta AlGaN kvantinėse duobėse yra paveikta vidinio elektrinio lauko, kuris atsiranda dėl spontaninės ir pjezoelektrinės poliarizacijos heterosandūroje ir iškreipia kvantinių duobių dugną [38]. Esant žemiems krūvininkų tankiams, elektronai ir skylės tampa erdviškai atskirti tokioje trikampėje duobėje, ir jų rekombinacijos tikimybė sumažėja. Nepusiausvyrieji krūvininkai ekranuoja vidinį elektrinį lauką ir padidina spindulinės rekombinacijos spartą. Esant dideliems sužadinimams, vidinis elektrinis laukas pradžioje yra ekranuojamas, bet vėliau, mažėjant krūvininkų tankiui, atsistato. Šis atsistatymas ir nulemia spindulinės rekombinacijos spartos mažėjimą. Dėl to FL intensyvumas mažėja sparčiau nei krūvininkų tankis. Spindulinės rekombinacijos sparta tampa pastovi, kai vidinis laukas pilnai atsistato, ir FL gesimas toliau vyksta lėtesne ir pastovia sparta. Pradinės greitosios dalies indėlis didėja, didėjant duobės pločiui, kadangi elektronų ir skylių atskyrimas yra labiau išreikštas platesnėse duobėse. Šis eksperimente stebėtas faktas aiškiai parodo vidinio elektrinio lauko ekranavimo/atsistatymo įtaką FL gesimo kinetikoms. Šie procesai ir jų įtaka yra schematiškai pavaizduoti 5.1 paveiksle.

Kadangi FL gesimo neeksponentiškumas neleido vienareikšmiškai įvertinti krūvininkų gyvavimo trukmės, jos buvo nustatytos, naudojant ŠIDG metodiką. Gardelių irimo kinetikos keliuose

susidedančių iš $\text{Al}_{0,49}\text{N}_{0,51}\text{N}$ barjero ir $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{N}$ duobės sluoksnių. Duobių pločiai skirtinguose bandiniuose buvo nuo 1,65 nm iki 5,0 nm, barjero storis buvo vienodas ir lygus 11,5 nm.

Kelių bandinių su skirtingais duobių pločiais FL gesimo kinetikos yra pavaizduotos 5.1 paveiksle. Visos FL kinetikos yra stipriai neeksponentinės. Ši neeksponentiškumą galima paaiškinti dviem efektais: krūvininkų tankio mažėjimu ir spindulinės rekombinacijos spartos mažėjimu dėl vidinio elektrinio lauko atsistatymo.

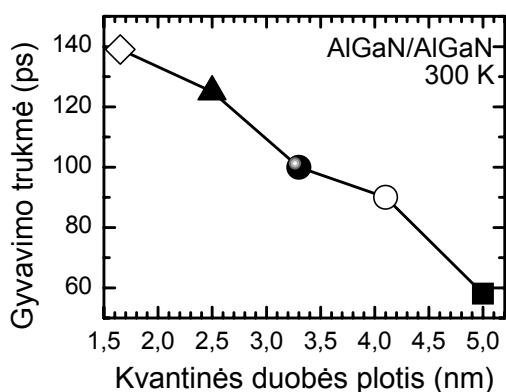
Kambario temperatūroje



5.2 pav. Dinaminių gardelių irimo kinetikos AlGaN/AlGaN dariniuose su skirtingu duobės pločiu. Kreivės pastumtos vertikaliai, kad geriau išsiskirtų. Ištinėmis linijomis pavaizduotos eksponentinės funkcijos. [P9]

skirtinguose AlGaIn dariniuose yra pateiktos 5.2 paveiksle. Gardelių gesimas buvo aprašytas eksponentinėmis funkcijomis ir iš jų buvo įvertintos krūvininkų gyvavimo trukmės.

Indukuotų gardelių gesimas tiesiogiai nepriklauso nuo spindulinės rekombinacijos spartos ir yra sąlygotas vien tik nespindulinės rekombinacijos. Tokiu būdu, galima palyginti nespindulinės rekombinacijos spartas bandiniuose su skirtingais duobių pločiais. Šis palyginimas yra pavaizduotas 5.3 paveiksle. Didėjant kvantinės duobės pločiui, krūvininkų gyvavimo trukmė mažėja. Ši priklausomybė yra priešinga tai, kurios būtų galima tikėtis, kai dominuoja spindulinė rekombinacija, o elektronai ir skylės yra labiau erdviškai atskirti platesnėse duobėse (kaip buvo stebėta ankstesniuose darbuose InGaIn/GaIn [39] ir AlGaIn/GaIn [40] duobėse). Priklausomybė, pavaizduota 5.3 paveiksle, gali būti aiškinama krūvininkų lokalizacija, atsirandančia dėl duobės



5.3 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo kvantinės duobės pločio AlGaIn/AlGaIn struktūrose. [P9]

pločio fliktuacijų. Duobės pločio fliktuacijų įtaka optinėms savybėms yra labiau jaučiama siaurose duobėse. Pavyzdžiui, žemiausio optinio šuolio energijos skirtumas, atsiradęs dėl vieno monosluoksnio duobės pločio fliktuacijos, yra lygus 47 meV 1,65 nm pločio kvantinėje duobėje ir tik 7 meV 5,0 nm pločio duobėje. Lokalizacija slopina krūvininkų judėjimą link NRC ir padidina gyvavimo trukmę. Kuo giliau krūvininkai yra lokalizuoti, tuo ilgesnė tampa gyvavimo trukmė. Tokiu būdu, krūvininkų gyvavimo trukmė didėja, mažėjant duobės pločiui.

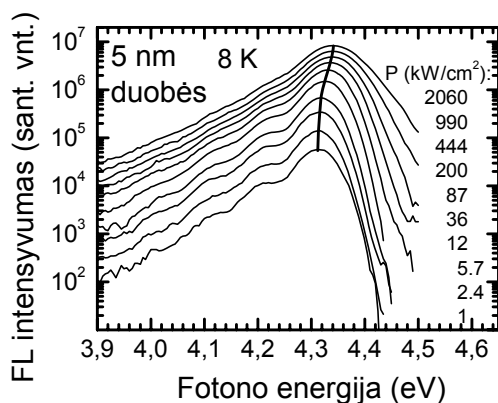
Gyvavimo trukmės mažėjimas platesnėse kvantinėse duobėse taip pat gali būti sąlygotas ir didėjančio dislokacijų tankio, kuris vis didėja, artėjant kritiniam duobės pločiui. Toks NRC tankio didėjimas dėl didėjančio dislokacijų tankio buvo nurodytas kaip krūvininkų gyvavimo trukmės mažėjimo priežastis AlGaIn/GaIn kvantinėse duobėse [40].

Apibendrinant, serija daugiasluoksnių darinių su AlGaIn/AlGaIn kvantinėmis duobėmis buvo tirta, naudojant FL su laikine skyra bei ŠIDG metodikas. Greitoji FL gesimo komponentė buvo paaiškinta spindulinės rekombinacijos spartos mažėjimu dėl atsistatančio vidinio elektrinio lauko, mažėjant nepusiausvirųjų krūvininkų tankiui. ŠIDG metodika leido įvertinti ir palyginti krūvininkų gyvavimo trukmes bandiniuose su skirtingais duobių pločiais. Nustatytas krūvininkų gyvavimo trukmės mažėjimas didėjant kvantinės duobės pločiui, buvo priskirtas potencialo profilio duobės plokštumoje skirtumams, kurie įtakoja krūvininkų lokalizaciją, bei kvantinės duobės kokybei.

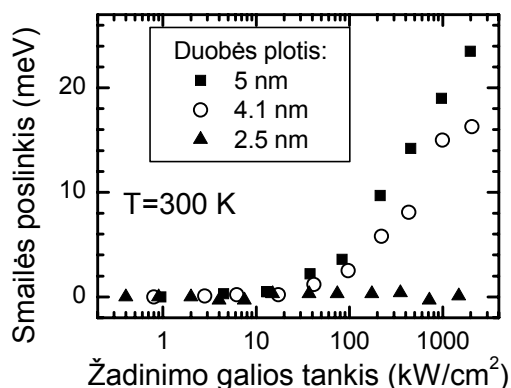
5.2. Vidinio elektrinio lauko ir lokalių būsenų įtaka fotoluminescencijos dinamikai AlGaIn/AlGaIn kvantinėse duobėse

Šiame skyrelyje yra nagrinėjama vidinio elektrinio lauko bei lokalių būsenų įtaka FL dinamikai AlGaIn/AlGaIn kvantinėse duobėse. Buvo tirtos tie patys dariniai kaip ir 5.1 skyrelyje, analizuotos jų FL spektrų priklausomybės nuo žadinimo bei temperatūros.

AlGaN/AlGaN darinių su 5,0 nm pločio duobėmis FL spektrai, išmatuoti 8 K temperatūroje esant skirtingiems žadinimo galios tankiams, yra pavaizduoti 5.4 paveiksle. Visi FL spektrai susideda iš vienos plačios juostos. Didinant žadinimą, FL



5.4 pav. 5 nm pločio AlGaN kvantinių duobių FL spektro priklausomybė nuo žadinimo 8 K temperatūroje. Ištinė linija pavaizduota juostos smailės padėties priklausomybė. [Pagal P15]



5.5 pav. FL juostos smailės poslinkio priklausomybė nuo žadinimo AlGaN/AlGaN struktūrose su skirtingu duobės pločiu, esant 300 K temperatūrai. [Pagal P15]

juostos smailė slenkasi į aukštesnių energijų pusę. Šis poslinkis yra nevienodas skirtingo pločio kvantinėse duobėse (žr. 5.5 pav.): mažėjant kvantinės duobės pločiui, juostos smailės poslinkis tampa mažesnis.

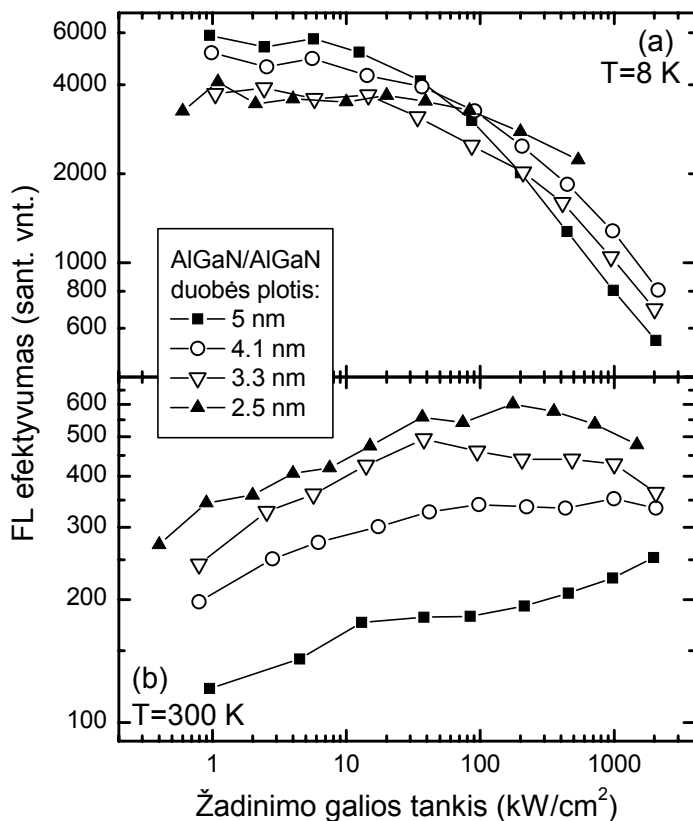
Juostos smailės poslinkis į aukštesnių energijų pusę paprastai yra aiškinamas dviem galimais procesais: i) lokalių būsenų pildymu [41,42] bei ii) vidinio elektrinio lauko ekranavimu [43,44]. Poslinkio nebuvimas siaurose kvantinėse duobėse leidžia manyti, kad antrasis procesas yra dominuojantis, kadangi siaurose duobėse vidinis elektrinis laukas silpniau įtakoja elektrono ir skylės lygmenis duobėje. Be to, kaip buvo parodyta 5.1 skyrelyje, siaurose duobėse krūvininkai yra stipriau lokalizuoti, dėl to juostos smailės poslinkis turėtų būti žymiai labiau išreikštas, jei būtų sąlygotas lokalių būsenų pildymo.

Eksperimentinės FL juostos smailės padėties priklausomybės nuo žadinimo galios tankio buvo tapatinamos su teorinių skaičiavimų rezultatais, laikant, kad poslinkį sąlygoja vien tik vidinio elektrinio lauko ekranavimas. Skaičiavimai buvo atlikti, sprendžiant Šrėdingerio ir Puasono lygčių sistemą, ir davė smailės padėties priklausomybę nuo krūvininkų tankio. Siekiant sutapatinti suskaičiuotą poslinkio priklausomybę nuo krūvininkų tankio ir eksperimentinę priklausomybę nuo žadinimo galios tankio, buvo atsižvelgta į eksperimentines FL intensyvumo priklausomybes nuo žadinimo. Buvo laikoma, kad FL intensyvumas yra tiesiog proporcingas krūvininkų tankiui, kadangi tiek spindulinė, tiek nespindulinė lokalizuotų elektronų-skylių porų rekombinacijos yra tiesinės. Krūvininkai gali būti lokalizuoti kvantinės duobės plokštumoje, tačiau jie gali dalyvauti vidinio lauko ekranavime statmena kryptimi lygiai taip pat kaip ir laisvi krūvininkai. Taigi, ir laisvi, ir lokalizuoti krūvininkai buvo laikomi dalyvaujančiais vidinio lauko ekranavime. Tapatinimo rezultatai yra pavaizduoti 5.6 paveiksle ištinėmis linijomis. Geriausias sutapimas buvo pasiektas naudojant vidinio elektrinio lauko vertę, lygią 300 kV/cm. Tačiau įvertinus vidinį elektrinį lauką AlGaN/AlGaN struktūroje tik iš medžiagos parametrų, gauta vertė buvo didesnė ir lygi 1.2 MV/cm. Juostos smailės poslinkis, suskaičiuotas naudojant šią lauko vertę, taip pat yra pavaizduotas 5.6 paveiksle. Analogiškas vidinio elektrinio lauko verčių skirtumas

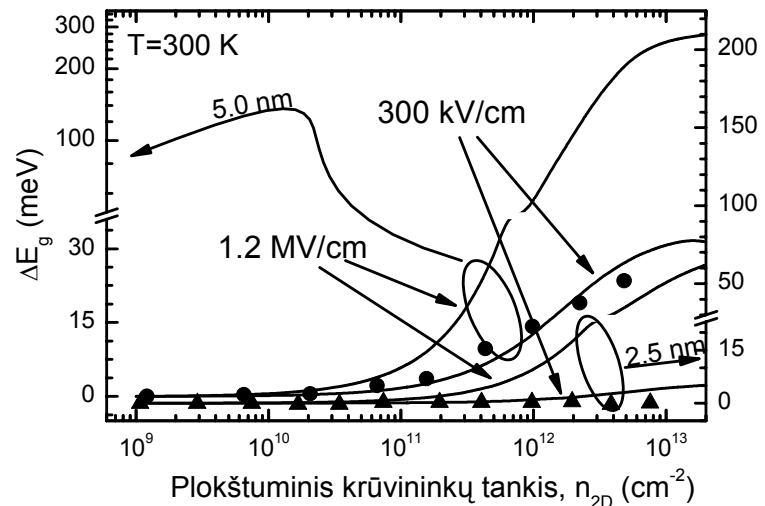
buvo gautas ir dinaminiam FL juostos smailės poslinkiui po sužadavimo trumpu impulsu [45].

Galimas lokalių būsenų pildymo indėlis tik dar labiau padidintų FL juostos smailės poslinkį į aukštesnių energijų pusę. Taigi būsenų pildymas negali paaiškinti, kodėl eksperimentinis poslinkis yra mažesnis nei suskaičiuotas, esant 1.2 MV/cm vidiniam laukui. Tuo tarpu, FL intensyvumo priklausomybė nuo žadinimo galios tankio priklauso nuo skirtingų temperatūrų, parodo esant

stiprią lokalizaciją. FL efektyvumo, apibrėžto kaip FL intensyvumo ir žadinimo galios tankio santykis, priklausomybės nuo žadinimo galios tankio pavaizduotos 5.7 paveiksle ir yra skirtingos 8 K ir 300 K temperatūrose. Šios priklausomybės negali būti paaiškintos vien tik vidinio lauko ekranavimu, kadangi tuo atveju didinant žadinimą FL efektyvumas



5.7 pav. FL intensyvumo ir žadinimo galios tankio santykio (FL efektyvumo) priklausomybė nuo žadinimo AlGaIn/AlGaIn struktūrose, esant 8 K (a) ir 300 K (b) temperatūrai. [Pagal P15]



5.6 pav. Eksperimentinės FL juostos smailės padėties priklausomybės nuo krūvininkų tankio (taškai) ir atitinkamos teorinių skaičiavimo kreivės (linijos) AlGaIn/AlGaIn dariniuose 300 K temperatūroje. Teorinės kreivės buvo paskaičiuotos dviem vidinio elektrinio lauko vėrtėms.

turėtų didėti iki kol vidinis laukas pilnai ekranuojamas. Žemose temperatūrose, FL efektyvumas nepriklauso nuo žadinimo, esant mažiems žadinimams, ir pradeda mažėti, žadinimui didėjant. Kritinis žadinimo galios tankis, kuomet efektyvumas pradeda mažėti, priklauso nuo duobės pločio. Jis yra didesnis siauresnėse duobėse. Šis efektyvumo mažėjimas gali būti aiškinamas didėjančiu žemiausių lokalių būsenų, kuriose eksitonai negali judėti, užpildymu. Didinant žadinimą, tos giliausios lokalių būsenos palaipsniui yra visiškai užpildomos, ir atsiranda vis daugiau laisvų krūvininkų, kurie gali pasiekti NRC. Tokia delokalizacija yra stipriau išreikšta plačiose duobėse, kur lokalizacija yra silpnesnė, kaip buvo parodyta 5.1 skyrelyje.

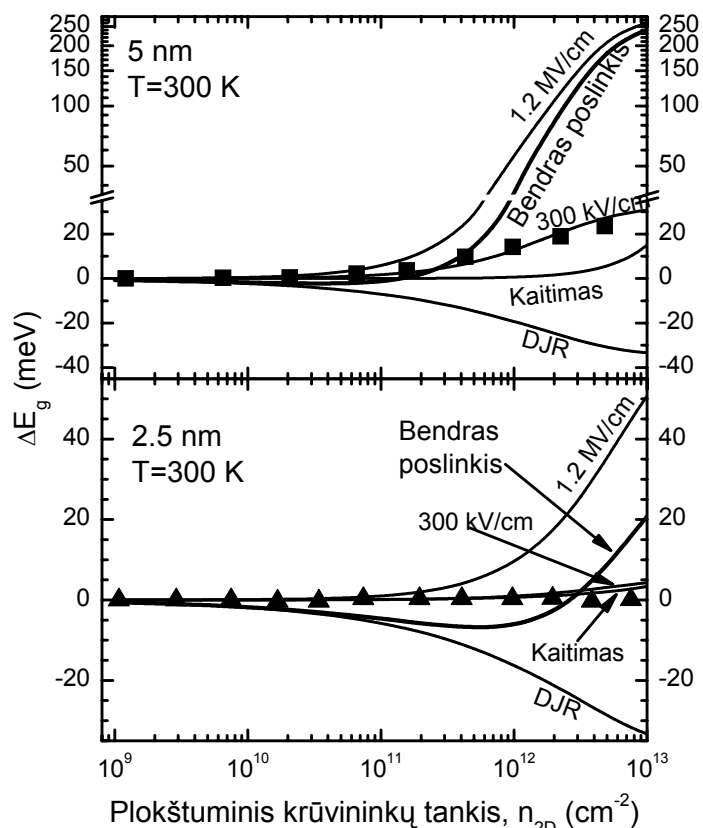
Lokalizacijos skirtumas taip pat patvirtina ir FL intensyvumo priklausomybės nuo temperatūros: iš Arenijaus grafikų nustatyti lokalizacijos gyliai buvo lygūs 48 meV 5,0 nm kvantinėse duobėse bei 85 meV 2,5 nm kvantinėse duobėse.

Kambario temperatūroje FL efektyvumas yra gerokai mažesnis, kas, turbūt, atsitinka dėl terminės delokalizacijos ir didėjančios nespindulinės rekombinacijos įtakos. Šis efektas yra labiau išreikštas plačiose duobėse. Pakėlus temperatūrą nuo 8 K iki 300 K, FL efektyvumas, esant mažiems žadinimams, sumažėja 10 kartų 2,5 nm duobėse bei 50 kartų 5,0 nm duobėse. Tai parodo, kad net ir kambario temperatūroje nedidelė dalis krūvininkų yra vis dar lokalizuoti, ir ši dalis yra didesnė siaurose duobėse. Didinant žadinimą didėjantis FL efektyvumas gali būti aiškinamas NRC sotinimu, kuris sumažina nespindulinės rekombinacijos spartą, bei vidinio elektrinio lauko ekranavimu, kuris padidina spindulinės rekombinacijos spartą. Pastarasis efektas turėtų būti mažiau svarbus esant mažiems žadinimams bei siaurose duobėse.

FL efektyvumo mažėjimą, kai žadinimo galios tankis didesnis nei $\sim 100 \text{ kW/cm}^2$, sunku paaiškinti vienareikšmiškai. Viena iš galimų priežasčių galėtų būti krūvininkų kaitimas. Jis pasireiškia eksperimentiškai stebėtu FL juostos aukštų energijų šlaito polinkio mažėjimu. Kadangi krūvininkai į nespindulinius centrus patenka per potencialią barjerą, krūvininkų temperatūros didėjimas padidina šio proceso tikimybę.

Gauti eksperimentiniai rezultatai parodo, kad tirtuose AlGaN/AlGaN bandiniuose yra stipri krūvininkų lokalizacija, ypač žemose temperatūrose. Lokalių būsenų pildymas didinant žadinimo intensyvumą turėtų padidinti juostos smailės mėlynąjį poslinkį, tačiau tokio poslinkio nebuvimas siaurose duobėse bei maža vidinio elektrinio lauko vertė, gauta iš eksperimentinių duomenų tapatinimo su teoriniais skaičiavimais, rodo, kad vyksta ir kiti procesai, kurie dalinai kompensuoja mėlynąjį poslinkį dėl lauko ekranavimo ir lokalių būsenų pildymo. Vienas iš galimų tokių procesų – draustinės juostos renormalizacija (DJR) dėl daugiadalelinės sąveikos.

Tokiu būdu, bendras FL juostos smailės poslinkis yra sąlygotas trijų efektų: i) vidinio elektrinio lauko ekranavimo; ii) krūvininkų kaitimo; ir iii) draustinės juostos renormalizacijos. Bendras suskaičiuotas poslinkis yra pavaizduotas 5.8 paveiksle. Kaip



5.8 pav. Smailės poslinkio priklausomybė nuo krūvininkų tankio AlGaN/AlGaN dariniuose su 5 nm pločio duobėmis (a) ir 2,5 nm pločio duobėmis (b). Linijomis pavaizduotos priklausomybės, paskaičiuotos įskaitant skirtingus efektus. (žr. tekste).

matosi, net ir įtraukus daugiadalelinės sąveikos narius, FL juostos smailės poslinkis negali būti gerai aprašytas.

Vidinio elektrinio lauko verčių, gautų iš eksperimentinių duomenų tapatinimo ir teorinių skaičiavimų, skirtumas gali atsirasti dėl netikslių AlGa_N medžiagos parametrų, ypač poliarizacinių konstantų. Kita priežastis gali būti susijusi su nedidelėmis sudėties fliuktuacijomis kvantinės duobės plokštumoje. Tokiose fliuktuacijose lokalizuoti krūvininkai gali dalinai ekranuoti ir sumažinti vidinį elektrinį lauką. Grubus įvertinimas, atsižvelgiant į grūdėtos nitridinės struktūros skaičiavimus [46] parodo, kad galima tikėtis lauko vertės sumažėjimo iki dviejų kartų.

Apibendrinant, AlGa_N/AlGa_N kvantinių duobių dariniai su skirtingo pločio kvantinėmis duobėmis buvo tyrinėti naudojant FL spektroskopiją ir teorinius skaičiavimus. Gauti rezultatai parodė, kad FL dinamika stipriai priklauso nuo krūvininkų lokalizacijos, o spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos konkurencija, krūvininkų lokalizacija ir delokalizacija yra sudėtingi procesai ir priklauso nuo temperatūros, krūvininkų tankio, duobės pločio, vidinio elektrinio lauko ir jo ekranavimo. Esant dideliems sužadanimams, FL spektrai atskleidžia ir lokalių būsenų pildymo, ir vidinio lauko ekranavimo egzistavimą. Eksperimentinis juostos smailės mėlynasis poslinkis dėl didėjančio krūvininkų tankio yra gerokai mažesnis nei suskaičiuotas, naudojant medžiagos parametrus. Daugiadalelinės sąveikos efektai, tokie kaip krūvininkų kaitimas bei draustinės juostos renormalizacija, negali paaiškinti mažo mėlynojo poslinkio. Maža vidinio lauko vertė gali būti siejama su daliniu vidinio lauko ekranavimu dėl lokalizuotų krūvininkų, atsiradusių dėl nedidelių sudėties fliuktuacijų.

Literatūra

- [1] A.Miller, in *Nonlinear Optics in Semiconductors II, Semiconductors and Semimetals*, edited by E.Garmire and A.Kost (Academic, New York, 1999), Vol. 59, Chap. 5, pp. 287, 292.
- [2] M.A.Reshchikov and H.Morkoc, *J. Appl. Phys.* 97, 061301 (2005).
- [3] J.Elsner, R.Jones, M.I.Heggie, P.K.Sitch, M.Haugk, Th.Frauenheim, S.Oberg, and P.R.Briddon, *Phys. Rev. B* 58, 12571 (1998).
- [4] L.Polenta, A.Castaldini, and A.Cavallini, *J. Appl. Phys.* 102, 063702 (2007).
- [5] S.F.Chichibu et al., *Appl. Phys. Lett.* 74, 1460 (1999).
- [6] S.F.Chichibu, A.Uedono, T.Onuma, T.Sota, B.A.Haskell, S.P.DenBaars, J.S.Speck, and S.Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* 86, 021914 (2005).
- [7] U.Ozgur, Y.Fu, Y.T.Moon, F.Yun, H.Morkoc, H.O.Everitt, S.S.Park, and K.Y.Lee, *Appl. Phys. Lett.* 86, 232106 (2005).
- [8] J.Xie, U.Ozgur, Y.Fu, X.Ni, H.Morkoc, C.K.Inoki, T.S.Kuan, J.V.Foreman, and H.O.Everitt, *Appl. Phys. Lett.* 90, 041107 (2007).
- [9] R.S.Qhalid Fareed, R.Jain, R.Gaska, M.S.Shur, J.Wu, W.Walukiewicz, and M.A.Khan, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1892 (2004).
- [10] J.Zhang, X.Hu, A.Lunev, J.Deng, Y.Bilenko, T.M.Katona, M.S.Shur, R.Gaska, and M.A.Khan, *Jpn. J. Appl. Phys.* 44, 7250 (2005).
- [11] Q.Fareed, R.Gaska, and M.S.Shur, *Methods of Growing Nitride-Based Film Using Varying Pulses*, US patent 7,192,849, March 20 (2007).
- [12] G.Tamulaitis, A.Zukauskas, J.W.Yang, M.A.Khan, M.S.Shur, and R.Gaska, *Appl. Phys. Lett.* 75, 2277 (1999).
- [13] J.Y.Duboz, *J. Appl. Phys.* 92, 4312 (2002).
- [14] S.Jursenas, S.Miasojedovas, G.Kurilcik, A.Zukauskas, and P.R.Hageman, *Appl. Phys. Lett.* 83, 66 (2003).

- [15] O.Brandt, H.Yang, and K.H.Ploog, *Phys. Rev. B* 54, R5215 (1996).
- [16] T.Malinauskas, K.Jarasiunas, S.Miasojedovas, S.Jursenas, B.Beaumont, and P.Gibart, *Appl. Phys. Lett.* 88, 202109 (2006).
- [17] E.Kuokstis, G.Tamulaitis, K.Liu, M.S.Shur, J.W.Li, J.W.Yang, and M.A.Khan, *Appl. Phys. Lett.* 90, 161920 (2007).
- [18] R.Y.Korotkov, M.A.Reshchikov, and B.W.Wessels, *Physica B* 325, 1 (2003).
- [19] Y.-H.Kwon, S.K.Shee, G.H.Gainer, G.H.Park, S.J.Hwang, and J.J.Song, *Appl. Phys. Lett.* 76, 840 (2000).
- [20] D.G.Thomas, J.J.Hopfield, and W.M.Augustyniak, *Phys. Rev.* 140, A202 (1965).
- [21] R.Y.Korotkov, M.A.Reshchikov, and B.W.Wessels, *Physica B* 273-274, 80 (1999).
- [22] M.A.Reshchikov, H.Morkoc, S.S.Park, K.Y.Lee, *Appl. Phys. Lett.* 78, 2882 (2001).
- [23] K.L.Shaklee, R.E.Nahory, and R.F.Leheny, *J. Lumin.* 7, 284 (1973).
- [24] K.Kyhm, R.A.Taylor, J.F.Ryan, T.Someya, and Y.Arakawa, *Appl. Phys. Lett.* 79, 3434 (2001).
- [25] M.Vehse, J.Meinertz, O.Lange, P.Michler, J.Gutowski, S.Bader, A.Lell, V.Harle, *phys. stat. sol. (c)* 0, 43 (2002).
- [26] G.D.Chen, M.Smith, J.Y.Lin, H.X.Jiang, S.-H.Wei, M.A.Khan, and C.J.Sun, *Appl. Phys. Lett.* 68, 2784 (1996).
- [27] K.B.Nam, J.Li, M.L.Nakarmi, J.Y.Lin, and H.X.Jiang, *Appl. Phys. Lett.* 84, 5264 (2004).
- [28] M.Albrecht, A.Cremades, J.Krinke, S.Christiansen, O.Ambacher, J.Piqueras, H.P.Strunk, and M.Stutzmann, *phys. stat. sol. (b)* 216, 409 (1999).
- [29] A.Cremades, M.Albrecht, J.Krinke, R.Dimitrov, M.Stutzmann, and H.P.Strunk, *J. Appl. Phys.* 87, 2357 (2000).
- [30] A.Dmitriev and A.Oruzhenikov, *J. Appl. Phys.* 86, 3241 (1999).
- [31] T.Takayama, M.Yuri, K.Itoh, and J.S.Harris, Jr., *J. Appl. Phys.* 90, 2358 (2001).
- [32] J.Adhikari and D.A.Kofke, *J. Appl. Phys.* 95, 6129 (2004).
- [33] L.Chang, S.K.Lai, F.R.Chen, and J.J.Kai, *Appl. Phys. Lett.* 79, 928 (2001).
- [34] G.Steude, B.K.Meyer, A.Goldner, A.Hoffmann, F.Bertram, J.Christen, H.Amano, and I.Akasaki, *Appl. Phys. Lett.* 74, 2456 (1999).
- [35] K.Kazlauskas, G.Tamulaitis, P.Pobedinskas, A.Zukauskas, M.Springis, C.-F.Huang, Y.-C.Cheng, and C.C.Yang, *Phys. Rev. B* 71, 085306 (2005).
- [36] K.Kazlauskas, G.Tamulaitis, A.Zukauskas, M.A.Khan, J.W.Yang, J.Zhang, G.Simin, M.S.Shur, and R.Gaska, *Appl. Phys. Lett.* 83, 3722 (2003).
- [37] Y.-H.Cho, G.H.Gainer, J.B.Lam, J.J.Song, W.Yang, and W.Jhe, *Phys. Rev. B* 61, 7203 (2000).
- [38] V.Fiorentini, F.Bernardini, F.D.Sala, A.Di Carlo, and P.Lugli, *Phys. Rev. B* 60, 8849 (1999).
- [39] P.Lefebvre, S.Anceau, P.Valvin, T.Taliercio, L.Konczyewicz, T.Suski, S.P.Lepkowski, H.Teisseyre, H.Hirayama, and Y.Aoyagi, *Phys. Rev. B* 66, 195330 (2002).
- [40] K.C.Zeng, J.Li, J.Y.Lin, and H.X.Jiang, *Appl. Phys. Lett.* 76, 3040 (2000).
- [41] P.G.Eliseev, P.Perlin, J.Lee, and M.Osinski, *Appl. Phys. Lett.* 71, 569 (1997).
- [42] T.Y.Lin, J.C.Fan, and Y.F.Chen, *Semicond. Sci. Technol.* 14, 406 (1999).
- [43] E.Kuokstis, W.H.Sun, C.Q.Chen, J.W.Yang, and M.A.Khan, *J. Appl. Phys.* 97, 103719 (2005).
- [44] F.Della Sala, A.Di Carlo, P.Lugli, F.Bernardini, V.Fiorentini, R.Scholz, and J.-M.Jancu, *Appl. Phys. Lett.* 74, 2002 (1999).
- [45] A.Pinos, S.Marcinkevicius, K.Liu, M.S.Shur, E.Kuokstis, G.Tamulaitis, R.Gaska, J.Yang, and W.Sun, *Appl. Phys. Lett.* 92, 061907 (2008).
- [46] V.Yu.Kachorovskii and M.S.Shur, *Appl. Phys. Lett.* 86, 012101 (2005).

Ginamieji teiginiai

1. GaN bandiniuose su panašiais dislokacijų tankiais krūvininkų gyvavimo trukmė yra mažesnė bandiniuose, pasižyminčiuose didesniu krūvininkų judriu, nes krūvininkai greičiau pasiekia prie dislokacijų esančius nespindulinės rekombinacijos centrus.
2. AlGaN bandiniuose krūvininkų gyvavimo trukmę riboja krūvininkų judėjimas link dislokacijų, kur vyksta nespindulinė rekombinacija. Gyvavimo trukmę lemia ne draustinės juostos fliktuacijos, o nespindulinės rekombinacijos centrų tankis.
3. Greitoji daugialakščių AlGaN/AlGaN darinių fotoluminescencijos gesimo komponentė atsiranda dėl nykstančio vidinio elektrinio lauko ekranavimo. Laukas atsistato mažėjant nepusiausvirųjų krūvininkų tankiui. Lėtoji luminescencijos gesimo komponentė yra sąlygota lokalizuotų krūvininkų rekombinacijos. Didėjant kvantinės duobės pločiui krūvininkų gyvavimo trukmė mažėja dėl mažėjančių juostos potencialo fliktuacijų.
4. MEMOCVDTM technologija leidžia auginti aukštos kokybės GaN sluoksnius ant safyro, kuriuose krūvininkų gyvavimo trukmė siekia 2 ns, o optinio stiprinimo koeficiento vertė – $\sim 7500 \text{ cm}^{-1}$, ir AlGaN sluoksnius ant safyro, kurių fotoluminescencijos intensyvumas yra iki 6 kartų didesnis, o krūvininkų gyvavimo trukmė yra iki 6,5 kartų ilgesnė, lyginant su sluoksniais, augintais naudojant įprastinę MOCVD technologiją.

Publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai

- P1. **J. Mickevičius**, R. Aleksiejūnas, M. S. Shur, S. Sakalauskas, G. Tamulaitis, Q. Fareed, and R. Gaska, Correlation between yellow luminescence intensity and carrier lifetimes in GaN epilayers, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 041910 (2005).
- P2. **J. Mickevičius**, R. Aleksiejūnas, M.S. Shur, G. Tamulaitis, R.S.Q. Fareed, J.P. Zhang, R. Gaska, and M.A. Khan, Lifetime of nonequilibrium carriers in high-Al-content AlGaIn epilayers, *phys. stat. sol. (a)* **202**, 126-130 (2005).
- P3. K.Kazlauskas, A.Žukauskas, G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, and R.Gaska, Exciton hopping and nonradiative decay in AlGaIn epilayers, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 172102 (2005).
- P4. **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, G.Tamulaitis, Time-resolved experimental study of carrier lifetime in GaN epilayers, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 241918 (2005).
- P5. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier lifetime and diffusion in GaN epilayers grown by MEMOCVDTM, *phys. stat. sol. (c)* **3**, 1923 (2006).
- P6. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, M.S.Shur, Q.Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Saturated gain in GaN epilayers studied by variable stripe length technique, *J. Appl. Phys.* **99**, 103513 (2006).

- P7. K.Kazlauskas, G.Tamulaitis, A.Žukauskas, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Study of exciton hopping in AlGa_N epilayers by photoluminescence spectroscopy and Monte Carlo simulation, *Lithuanian Journal of Physics*, **46**, 73 (2006).
- P8. 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, Superlattices and Microstructures **40**, 274 (2006).
- P9. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, E.Kuokštis, K.Liu, M.S.Shur, J.P.Zhang, R.Gaska, Well-width-dependent carrier lifetime in AlGa_N/AlGa_N quantum wells, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 131907 (2007).
- P10. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, P.Vitta, A.Žukauskas, M.S.Shur, J.Zhang, J.Yang, R.Gaska, Carrier dynamics in GaN at extremely low excited carrier densities, *Solid State Communications* **145**, 312 (2008).
- P11. **J.Mickevičius**, P.Vitta, G.Tamulaitis, A.Žukauskas, M.S.Shur, J.Zhang, J.Yang, R.Gaska, Luminescence decay kinetics in GaN studied by frequency domain measurements, *Acta Physica Polonica A* **113**, 833 (2008).
- P12. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska, Influence of electric field and carrier localization on carrier dynamics in AlGa_N quantum wells, *Acta Physica Polonica A* **114**, 1247 (2008).
- P13. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, E.Kuokštis, K.Liu, M.S.Shur, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier dynamics in wide-band-gap AlGa_N/AlGa_N quantum wells, *physica status solidi (c)*, **5**, 2096 (2008).
- P14. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, K.Kazlauskas, A.Žukauskas, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska, Carrier localization and decay in wide-band-gap AlGa_N/AlGa_N quantum wells, *AIP Proceedings* (accepted).
- P15. **J.Mickevičius**, E.Kuokštis, V.Liuolia, G.Tamulaitis, M.S.Shur, J.Yang, and R.Gaska, Photoluminescence dynamics of AlGa_N quantum wells with built-in electric fields and localized states, *physica status solidi (a)* (accepted).

Pranešimai konferencijose

- C1. G. Tamulaitis, **J. Mickevicius**, R. Aleksiejunas, M. S. Shur, J. P. Zhang, Q. Fareed, R. Gaska, Dislocation-limited lifetime of nonequilibrium carriers in AlGa_N epilayers, Program of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26-30, 2004, Flagstaff, AZ, USA, p. 357.
- C2. **J. Mickevicius**, R. Aleksiejunas, M. S. Shur, J. P. Zhang, Q. Fareed, R. Gaska, G. Tamulaitis, Lifetime of nonequilibrium carriers in AlGa_N epilayers with high Al molar fraction, Abstract Book of the 2004 IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices, August 4-6, 2004, Troy, NY, USA, p. 61.
- C3. G.Tamulaitis, K.Kazlauskas, A.Žukauskas, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Study of exciton hopping in AlGa_N epilayers by photoluminescence spectroscopy and Monte Carlo simulation, Abstract Book of the 6th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-6), August 28-September 2, 2005, Bremen, Germany.
- C4. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, R.S.Qhalid Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier lifetime and diffusion in GaN epilayers grown by MEMOCVDTM, Abstract Book of the 6th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-6), August 28-September 2, 2005, Bremen, Germany.
- C5. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, Q. Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Study of optical gain in thick GaN epilayers by variable stripe length technique, *Materials research*

- society (MRS) symposium proceedings, Rare-earth doping for optoelectronic applications. ISSN 0272-9172. 2005, vol. 866, p. 125-130.
- C6. K.Kazlauskas, G.Tamulaitis, A.Žukauskas, **J.Mickevičius**, M.S.Shur, Q.Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Eksitonų šokavimo AlGa_N sluoksniuose tyrimas fotoluminescencinės spektroskopijos ir Monte Carlo modeliavimo pagalba, 36-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-36) : programa ir pranešimų tezės, Vilnius, 2005 m. birželio 16-18. ISBN 9986-9284-5-1. Vilnius, 2005, p. 64.
- C7. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, P.Vitta, A.Žukauskas, M.S.Shur, Q.Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Time- and frequency-domain measurements of carrier lifetimes in GaN epilayers, European Materials Research Society 2006 Spring Meeting (E-MRS 2006), May 29-June 2, 2006, Nice, France.
- C8. P.Vitta, A.Žukauskas, **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, M.S.Shur, Q.Fareed, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier dynamics in GaN epilayers revealed by time- and frequency-domain measurements, Blue lasers and light emitting diodes: the 6th international symposium (ISBLLED 2006): programme and abstract book. May 15-19, 2006, Montpellier, France, p. 72.
- C9. G. Tamulaitis, **J. Mickevičius**, P. Vitta, M. S. Shur, Q. Fared, J. P. Zhang, R. Gaska, Study of yellow luminescence in GaN using photoluminescence spectroscopy in time and frequency domains, European Workshop on III-Nitride Semiconductor Materials and Devices (EW3NS), September 18-20, 2006, Heraklion, Crete, Grece, p.85.
- C10. G. Tamulaitis, **J. Mickevičius**, P. Vitta, A. Žukauskas, M.S. Shur, K. Liu, Q. Fareed, J.P. Zhang, R. Gaska, Carrier Lifetimes in GaN Revealed by Studying Photoluminescence Decay in Time and Frequency Domains, Abstracts of 210th ECS 2006 Joint International Meeting, October 28 – November 3, 2006, Cancun, Mexico, p. 1314.
- C11. **J.Mickevičius**, E.Kuokštis, G.Tamulaitis, M.S.Shur, J.Zhang, R.Gaska, Krūvininkų gyvavimo trukmė AlGa_N/AlGa_N kvantinėse duobėse, 37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-37): programa ir pranešimų tezės, 2007 m. birželio 11-13, Vilnius
- C12. **J.Mickevičius**, P.Vitta, G.Tamulaitis, A.Žukauskas, M.S.Shur, J.Zhang, J.Yang, R.Gaska, Luminescence decay kinetics in GaN studied by frequency domain measurements, Abstract Book of 13th International Symposium on Ultraphast Phenomena in Semiconductors (UFPS-13), August 26-29, 2007, Vilnius, Lithuania, p. 79.
- C13. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier lifetime and its well-width dependence in AlGa_N/AlGa_N quantum wells, Abstract Book of the 9th International Conference-School „Advanced Materials and Technologies“, August 27-31, 2007, Palanga, Lithuania, p. 109.
- C14. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, E.Kuokštis, K.Liu, M.S.Shur, J.P.Zhang, R.Gaska, Carrier dynamics in wide-band-gap AlGa_N/AlGa_N quantum wells, Abstract Book of the 7th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-7), September 16-21, 2007, Las Vegas, Nevada, USA.
- C15. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, K.Kazlauskas, A.Žukauskas, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska „Influence of electric field and carrier localization on carrier dynamics in AlGa_N quantum wells“. Pranešimas (stendinis) tarptautinėje konferencijoje: XXXVII International School on the Physics of Semiconducting Compounds, Jažovecas, Lenkija.
- C16. G.Tamulaitis, **J.Mickevičius**, K.Kazlauskas, A.Žukauskas, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska „Carrier localization and decay in wide-band-gap AlGa_N/AlGa_N quantum wells“. Pranešimas (stendinis) tarptautinėje konferencijoje: 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29), Rio de Žaneiras, Brazilija.

- C17. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, E.Kuokštis, M.S.Shur, J.P.Zhang, R.Gaska „AlGa_N quantum wells: electric field and carrier localization“. Pranešimas (stendinis) tarptautinėje konferencijoje: 10th International School-Conference Advanced Materials and Technologies, Palanga, Lietuva.
- C18. **J.Mickevičius**, E.Kuokštis, V.Liuolia, G.Tamulaitis, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska, „Carrier localization and built-in electric field in AlGa_N/AlGa_N quantum wells“. Pranešimas (žodinis) tarptautinėje konferencijoje: 15th Semiconducting and Insulating Materials Conference, Vilnius, Lithuania.
- C19. **J.Mickevičius**, G.Tamulaitis, E.Kuokštis, V.Liuolia, M.S.Shur, J.Yang, R.Gaska, „Influence of built-in electric field and many-body effects on photoluminescence dynamics in AlGa_N/AlGa_N quantum wells“. Pranešimas (stendinis) tarptautinėje konferencijoje: XXXVIII International School on the Physics of Semiconducting Compounds, Jažovecas, Lenkija.

Informacija apie autorių

Vardas Pavardė	Jūras Mickevičius	
Gimimo data ir vieta	1981 m. balandžio 19 d., Vilnius, Lietuva	
Adresas	Vykinto 27-6, Vilnius, Lietuva	
Elektroninis paštas	juras.mickevicius@ff.vu.lt	
Išsilavinimas	1999	Vilniaus licėjus
	1999-2003	Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas gautas bakalauro laipsnis
	2003-2004	<i>Rensselaer Polytechnic Institute</i> , Troja, JAV gautas magistro laipsnis
	2005-2009	Vilniaus universitetas doktorantūros studijos
Darbo patirtis	2001-2003	Vilniaus universitetas, Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas; inžinierius
	2003-2005	<i>Rensselaer Polytechnic Institute</i> , Troja, JAV; laborantas
	2005-2006	Vilniaus universitetas, Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas; inžinierius
	2006-2009	Vilniaus universitetas, Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas; jaunesnysis mokslo darbuotojas
Specializacija	Puslaidininkių ir jų darinių optinis charakterizavimas: fotoluminescencijos, fotoluminescencijos su laikine skyra, fotoluminescencijos su erdvine skyra spektroskopiniai metodai, šviesa indukuotų dinaminių gardelių metodika, liuminescencijos gesimo trukmės matavimų su dažnine skyra metodika	
Publikacijos	24 straipsniai (16 žurnaluose, įtrauktuose į ISI duomenų bazę), 27 pranešimai konferencijose	