

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Tadas Malinauskas

KRŪVININKŲ DINAMIKOS TYRIMAS PLAČIATARPIUOSE  
PUSLAIDININKIUOSE ŠVIESA INDUKUOTŲ DINAMINIŲ  
GARDELIŲ METODU

Daktaro disertacijos santrauka  
Fiziniai mokslai, fizika (02 P), puslaidininkių 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. Kęstutis Jarašiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika (P 265)).

**Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslų krypties taryboje.**

**Pirmininkas:**

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

**Nariai:**

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

doc. habil. dr. Vidmantas Gulbinas (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, kondensuotos medžiagos – P 260)

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

dr. Karolis Kazlauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika (P 265)).

**Oponentai:**

habil. dr. Gintaras Valušis (Puslaidininkių fizikos institutas, 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).

Disertacija bus ginama 2009 metais gruodžio 11 d. 15.00 valandą 212 auditorijoje Vilniaus universitete, Saulėtekio al. 9-III, LT-10222 Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta lapkričio 11 d., 2009 metais.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibliotekoje ir Puslaidininkių fizikos institute.

VILNIAUS UNIVERSITY  
SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE

Tadas Malinauskas

INVESTIGATION OF CARRIER DYNAMICS IN WIDE BANDGAP  
SEMICONDUCTORS BY LIGHT-INDUCED TRANSIENT  
GRATING TECHNIQUE

Doctoral dissertation  
Physical Sciences, Physics (02 P), Semiconductor Physics (P 265)

Vilnius, 2009

Dissertation was prepared at the Institute Applied Research, Vilnius University in 2005 – 2009.

**Scientific Supervisor:**

Prof. Dr. Habil. Kęstutis Jarašiūnas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics (P 265)).

**Council of defense of the doctoral thesis of Physical Science at Vilnius University**

**Chairman:**

prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis (Vilniaus University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics (P 265)).

**Members:**

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

doc. habil. dr. Vidmantas Gulbinas (Institute of Physics, Physics – 02 P, Solid State Physics – P 260)

dr. Gediminas Račiukaitis (Institute of Physics, Physical sciences, Physics – 02 P, Solid State Physics – P 260)

dr. Karolis Kazlauskas (Vilniaus University, Physical sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics (P 265)).

**Opponents:**

habil. dr. Gintaras Valušis (Semiconductor Physics Institute, 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)).

The official defense of the doctoral thesis will be held at 15.00, on December 11, 2009, in 212 lecture room at Vilnius University, Saulėtekio Av. 9-III, LT-10222 Vilnius, Lithuania.

Summary of the doctoral thesis has been distributed on the November 11, 2009. The doctoral thesis is available at Vilnius University Library and Semiconductors Physics Institute Library.

## Summary

III-nitrides, diamonds are extremely promising wide band gap semiconductor materials for optoelectronics and high temperature, high power electronics. Therefore, there is huge scientific interest in investigation electrical and optical properties of these materials. The light induced transient grating technique (LITG) is very suitable for exploration of carrier dynamics which governed by fundamental and defect related properties of materials.

The main goals of the thesis were gain a new knowledge on carrier dynamics in wide bandgap semiconductors (namely GaN, InGaN, and diamonds) by using and developing light induced transient grating technique. The experimental studies on numerous samples, grown at different conditions, combined with extensive measurements in a wide range of carrier densities ( $10^{16}$ - $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>) and temperature (9-300K) was targeted to identify the interplay of radiative and nonradiative recombination mechanisms, to determine carrier lifetime dependence on the excess carrier density, to explain the carrier diffusion coefficient dependence on excitation intensity, to find the optimal materials growth conditions.

A novel heterodyne detection scheme for LITG technique was presented. The heterodyning was achieved by coherently mixing the picosecond pulses of diffracted and scattered light. A phase difference between these fields was controlled by moving holographic beam splitter (HBS) along its grating vector. LITG signal decay kinetics, recorded at two HBS positions corresponding for phase difference of  $\pi$ , allowed to measure separately  $\Delta n^2$  and  $\Delta n$  kinetics, which were impossible in the convenient transient grating setup. This approach was employed to study a competition of coexisting free carrier and thermal optical nonlinearities in CVD grown diamond films.

The LITG measurements in numerous GaN layers with different dislocation revealed clear dependence of carrier lifetime on dislocation density, thus pointing out that dislocations acts as main carrier recombination centers. The strong dependence of carrier lifetime versus threading dislocation density (TDD) ( $\tau_R \propto (N_{TD})^{-0.5}$ ) at large dislocation densities ( $N_{TD} > 10^8$  cm<sup>-2</sup>) is weakened by dominance of bimolecular recombination in samples with low TDD at high carrier densities. The dislocation governed carrier lifetime in these samples were deduced by low excitation measurement via below bandgap excitation or discriminated by numerical modeling.

LITG measurements in GaN layers in temperature range of  $T = 9 - 300$  K and subsequent numerical modeling of carrier dynamics allowed to determine directly the values of the bimolecular recombination coefficient ( $B = 2 \cdot 10^{-11}$  cm<sup>3</sup>/s, at RT) and its temperature dependence ( $B \propto T^{-3/2}$ ), to separate impacts of radiative and nonradiative recombination. The measurements of diffusion coefficient in wide temperature range allowed to identify that scattering by the acoustic phonons is dominant mechanism in all temperature range.

LITG experiments provided increasing carrier diffusion coefficient values in GaN layers from  $D = 1.5$  cm<sup>2</sup>/s at low carrier densities ( $N < 5 \cdot 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>) to  $D = 4.1$  cm<sup>2</sup>/s at around  $5 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>. Using numerical modeling of carrier dynamics the increase of diffusion coefficient at high carrier density was explained as a Fermi pressure at degenerate carrier plasma. The low temperature measurements confirmed the suggested model.

The numerical analysis of carrier spatial-temporal redistribution allowed us to verify the origin fast time resolved photoluminescence transients measured in GaN layers as diffusion-governed carrier in-depth redistribution and reabsorption of a backward emission from the photoexcited layer. It was, therefore, concluded that determination of carrier lifetimes in high quality and thick GaN layers is more advantageous and straightforward by using LITG technique.

The LITG measurements provided photoelectrical parameters for InGaN layers at high excitation case –  $D = 1-1.7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\tau_R = 120 - 500 \text{ ps}$ ,  $L_D \approx 0.2 \text{ }\mu\text{m}$ . Low and In content dependent carrier diffusivity revealed In segregation induced carrier localization. At room temperature defect related recombination determined quite low carrier lifetime values and rejected the possibility of Auger recombination mechanism. The features of bimolecular recombination were observed only at low temperatures.

The investigation in InGaN MQWs revealed longer carrier lifetimes up to 3 ns, the pronounced bimolecular recombination at room temperature which became dominant recombination channel at lower temperatures. The determined diffusion coefficient values increased at higher carrier densities due to degeneracy of carrier distribution.

A novel all-optical way to monitor carrier lifetime, diffusion coefficient, and diffusion length in HPHT and CVD diamonds was demonstrated. The similar values of carrier diffusion coefficient  $D \approx 9.4 \text{ cm}^2/\text{s}$  and lifetime  $\tau_R = 2.7 \text{ ns}$  were deduced for high quality single crystal HPHT and CVD diamonds. The correlation between the carrier lifetime and concentration of nitrogen defects pointed out that nitrogen-related defects act as the main centers of nonradiative recombination. The dependence of carrier mobility on temperature showed that the scattering by acoustic phonons is a dominant mechanism at room temperature.

### **Padėka**

Pirmiausia, norėčiau ypatingai padėkoti savo vadovui prof. Kęstučiui Jarašiūnui už jo begalinę energiją, užsidegimą bei rūpestį.

Didelis dėkui visam laboratorijos kolektyvui už puikią darbinę atmosferą, gerą nuotaiką, patarimus bei pagalbą.

Nuoširdus ačiū mano šeimai už supratimą ir visapusišką paramą.

## Ivadas

III-grupės nitridai bei deimantai yra labai perspektyvios plačiatarpės puslaidininkinės medžiagos optoelektroniniams, aukštų temperatūrų, didelių galių elektronikos taikymams. GaN yra tikriausiai antras pagal svarbumą puslaidininkis po silicio. Deja, platesnį GaN panaudojimą riboja GaN tūrinių kristalų trūkumas. Kadangi GaN padėklų negalima išgauti komerciniu būdu, III-grupės nitridų technologija remiasi heteroepitaksija ant svetimų padėklų.

Dauguma dabartinių prietaisų yra auginami ant safyro arba silicio karbido padėklų. Kadangi skiriasi šių medžiagų ir GaN gardelės konstantos, o taip pat ir šiluminio plėtimosi koeficientai, užauginti heteroepitaksijos būdu sluoksniai pasižymi dideliu dislokacijų tankiu ( $10^9$  to  $10^{11}$   $\text{cm}^{-2}$ ), o tai riboja nitridinių šviestukų bei lazerinių diodų efektyvumą bei darbo trukmę.

Pasauliniu mastu technologiškai pirmaujančios šalys skiria didelį dėmesį III-grupės nitridų technologijos vystymui. DARPA (JAV) bei Europos Sąjungos remiamos programos (WBSTI, DENIS, EURONIM, ISCE-MOCVD) buvo skirtos tobulinti tiek epitaksinių sluoksnių, tiek ir tūrinių GaN kristalų auginimo būdus, siekiant gauti GaN padėklus su kuo mažesniu dislokacijų tankiu. Norint sumažinti dislokacijų tankį auginant GaN sluoksnius MOCVD būdu yra naudojami sudėtingi buferiniai sluoksniai (LT-GaN, AlN, SL-AlGaN, SiO ir kiti), įvairios skersinio epitaksinio peraugimo modifikacijos (ELO, 2S-ELO,  $\mu$ -ELO bei nano-ELO). Tuo tarpu sluoksnius auginant HVPE technologija, kuri pasižymi dideliu sluoksnių augimo greičiu  $\sim 50$   $\mu\text{m/h}$ , dislokacijų tankis mažinamas didinant sluoksnio storį iki kelių šimtų mikrometrų.

InGaN/GaN medžiagų sistema jau yra naudojama komerciniams šviestukams bei lazeriniams diodams mėlynajame ir UV spektrų ruožuose. Vis dėlto, technologija yra nuolat tobulinama optimizuojant kvantinių struktūrų parametrus (barjerų bei duobių storius, legiravimą ir kitus), taip pat norit išvengti pjezoelektrinių laukų sluoksniai auginami nepolinėmis kryptimis. Pastaruoju metu didelis dėmesys skiriamas GaN/InGaN šviestukų efektyvumo sumažėjimo reiškiniai esant dideliems maitinimo srovės tankiams. Yra iškelta keletas kontraversišku hipotezių aiškinančių šį reiškinį, tokių kaip: nespindulinė Ožė rekombinacija, viršbarjerinė krūvininkų difuzija, elektroninių būsenų užpildymas.

Deimantas, turintis mažai defektų, pasižymi didžiausiomis šilumos laidumo bei krūvininkų judrio vertėmis tarp visų plačiatarpių puslaidininkių, taip pat yra labai tvirta bei chemiškai atspari medžiaga, turi didelį (5,5 eV) draustinės juostos tarpą. Ši medžiaga tiktų didelės galios elektronikai, UV bei jonizuojančios spinduliuotės detektoriams, kurie galėtų dirbti ekstremaliomis sąlygomis (aukštos temperatūros, radiacija). Deja, keletas technologinių problemų - seklių donorinių priemaišų trūkumas, žema kristalinė sintetinių deimantų kokybė, pristabdė deimantų panaudojimą elektronikoje. Sintetiniai deimantai auginami didelio slėgio didelės temperatūros (HPHT) technologija jau apie 50 metų, o pastaruoju metu naudojant epitaksiniu būdu naudojant cheminį garų nusodinimą (CVD). Ši technologija dar nėra optimizuota - pasižyminti lėta auginimo sparta, nepageidaujama priemaišų (pagrinde, silicio ir azoto) koncentracija ir kita.

Naujų medžiagų charakterizavimas yra labai svarbus etapas optimizuojant sluoksnių bei heterosandūrų auginimo procesą. Nitridų ir deimantų struktūrinės savybės tiriamos komerciniais prietaisais bei gerai žinomomis metodikomis – elektronų

pluoštelio bei atominės jėgos mikroskopija, Rentgeno difrakcija. Optinėms bei elektroninėms savybėms tirti naudojamos fotoluminescencijos, katodoluminescencijos, elektronų pluoštelio indukuotos srovės, krūvininkų lėkio trukmės bei krūvininkų surinkimo nuotolio metodai. Eksperimentinės metodikos pasižymintys aukšta laikine skyra yra labai universalios, lengvai pritaikomos puslaidininkų tyrimams, nes suteikia tiesioginę informaciją apie krūvininkų dinamiką, leidžia išmatuoti svarbius parametrus tokius kaip: krūvininkų/eksitonų gyvavimo trukmė, difuzijos koeficientas bei nuotolis.

Krūvininkų rekombinacija ir difuzija yra stipriai įtakojama kristalo defektų, todėl krūvininkų dinamikos tyrimai leidžia charakterizuoti medžiagas siekiant optimizuoti kristalų auginimo technologijas. Krūvininkų gyvavimo trukmė yra labai jautri taškinių defektų bei dislokacijų tankiui. Krūvininkų spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos spartų santykis nulemia vidinį kvantinį efektyvumą, todėl yra labai svarbus parametras apibūdinant medžiagas naudojamas gaminant šviesą emituojančius prietaisus. Krūvininkų difuzijos koeficientas ir nuotolis yra labai svarbūs elektriniai parametrai, lemiantys (opto)elektroninių prietaisų veikimo efektyvumą.

Krūvininkų dinamikos tyrimams plačiatarpiuose puslaidininkuose mes naudojame šviesa indukuotą dinaminį gardelių metodą (ŠIDG). ŠIDG metodika įgalina tirti elektronines, temperatūrines, akustines puslaidininkų savybes optiniu būdu. Dinaminį gardelių metodą pasižymi keletu privalumų: 1) bekontaktis, neardantis medžiagos, 2) didelis jautris, nes signalas matuojamas tamsiame lauke, 3) leidžia atskirti pernašos ir relaksacijos procesus (keičiant gardelės periodą), 4) galimas tiek paviršinis, tiek ir tūrinis kristalo žadinimai, 5) galima atlikti eksperimentus įvairiomis sąlygomis (keičiant temperatūrą, žadinimo intensyvumą bei bangos ilgį), 6) platus pritaikomumas, galima tirti stipriai legiruotus, didžiavaržius, mažą kvantinį efektyvumą turinčius puslaidininkius.

#### **Darbo uždaviniai:**

1. Išplėtoti ir įdiegti šviesa indukuotą dinaminį gardelių metodo schemą su holografiniu pluoštelio dalikliu, kuri supaprastina dinaminės gardelės užrašymą ir nuskaitymą, bei įgalina heterodininį signalo detektavimą.
2. Ištirti didelio nepusiausvyrųjų krūvininkų tankio rekombinacijos ir difuzijos ypatumus skirtingo defektiškumo GaN, InGaN sluoksniuose bei InGaN kvantinėse duobėse. Skaitmeniškai modeliuojant krūvininkų dinamiką nustatyti dominuojančius krūvininkų rekombinacijos mechanizmus bei jų gyvavimo trukmes, difuzijos koeficientus ir nuotolius.
3. Ištirti krūvininkų dinamiką skirtingo tipo sintetiniuose deimantuose bei nustatyti jų fotoelektrinius parametrus.

#### **Darbo naujumas ir svarba**

Optinių metodikų bei prietaisų pasižymintys aukšta laikine skyra plėtojimas yra reikalingas neardančiam naujų medžiagų charakterizavimui, jų auginimo metodų tobulinimui.

Įdiegta dinaminį gardelių schema su holografiniu optiniu dalikliu supaprastina dinaminės gardelės užrašymą bei gardelės periodo keitimo procedūrą. Parodyta, kad ši schema leidžia kontroliuoti fazę tarp difrakcijos signalo ir sklaidytos šviesos, kas įgalina



heterodininį difrakcijos signalo detektavimą. Naudojant šį detektavimo būdą lūžio rodiklio moduliacijos ženklų pokyčiai gali būti stebimi tiesiogiai. Nauja HOLO (ŠIDG metodika pagrįsto prietaiso) versija gali būti projektuojama naudojant šią schemą.

Dinaminių gardelių metodu ištirtas didelis kiekis skirtingo defektiškumo GaN sluoksnių, kuriuos užaugino pasaulyje pirmaujantys technologiniai centrai ir kompanijos. Nustatyti dominuojantys krūvininkų rekombinacijos mechanizmai, dislokacijų nulemta krūvininkų gyvavimo trukmė plačiame dislokacijų tankio intervale. Skaitmeninis krūvininkų dinamikos modeliavimas parodė, kad difuzijos ir rekombinacijos spartų kitimas yra nulemtas nuosavų medžiagos efektų – Fermi slėgio bei bimolekulinės rekombinacijos.

InGaN sluoksnių su skirtingu In kiekiu tyrimas parodė In segregacijos sukeltą krūvininkų lokalizaciją. Buvo nustatyta, kad InGaN kvantinėse duobėse krūvininkų gyvavimo trukmės yra ilgesnės nei sluoksniuose. Matavimai esant skirtingam krūvininkų tankiui bei temperatūrai parodė, kad bimolekulinės rekombinacijos mechanizmas yra dominuojantis, o Ožė rekombinacija nestebima.

Pirmą kartą optiniu būdu (ŠIDG) nustatytos krūvininkų difuzijos koeficiento ir gyvavimo trukmės vertės sintetiniuose deimantuose. Optiniai matavimai yra labai svarbus indėlis žinant, kad elektriniai matavimai patiria įvairių eksperimentinių ir interpretacijos sunkumų.

### **Ginamieji teiginiai**

1. Dislokacijų sąlygojama nespindulinė krūvininkų rekombinacija dominuoja GaN sluoksniuose su dislokacijų tankiu didesniu nei  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Dislokacijų nulemta krūvininkų rekombinacijos trukmė aproksimuojama funkcija:  $\tau[\text{ns}] = 2.6 \cdot 10^4 / \sqrt{N_D[\text{cm}^{-2}]}$  plačiame dislokacijų tankio intervale ( $10^6 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ).

2. Bimolekulinė krūvininkų rekombinacija GaN sluoksniuose kambario temperatūroje dominuoja stipraus sužadavimo sąlygomis ( $N \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), jeigu dislokacijų tankis yra mažesnis nei  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ .

3. Krūvininkų difuzijos padidėjimas GaN ir InGaN esant dideliems krūvininkų tankiams ( $N > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) yra nulemtas Fermi slėgio išsigimusioje krūvininkų sistemoje.

4. Su azotu susieti defektai yra pagrindiniai rekombinacijos centrai sintetiniuose deimantuose. Deimanto monokristalams būdinga krūvininkų difuzijos koeficiento vertė kambario temperatūroje yra  $D_a = 9,7 \pm 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

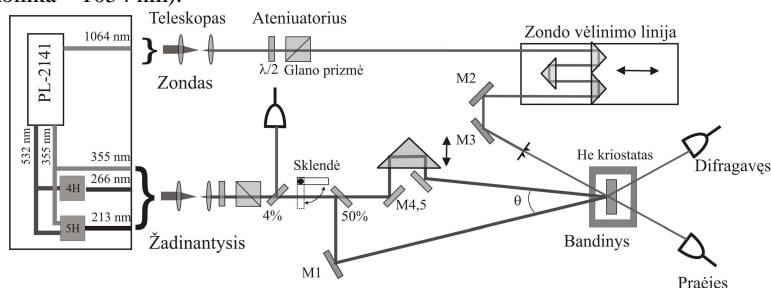
5. Fazės skirtumas tarp difragavusios ir sklaidytos šviesos dinaminių gardelių metodikoje gali būti kontroliuojamas keičiant holografinio pluoštelių daliklio padėtį išilgai jo gardelės vektoriaus krypties ir panaudojamas heterodininiam signalo detektavimui bei indukuoto lūžio rodiklio moduliacijos ženklų kitimo nustatymui.

## Disertacijos santrauka

Disertacija susideda iš šešių pagrindinių skyrių. **Pirmajame skyriuje** trumpai apžvelgiami krūvininkų dinamikos plačiatarpiuose puslaidininkiuose tyrimai naudojant metodikas su laikine skyra. **Antrajame skyriuje** pristatoma šviesa indukuotų dinaminė gardelių metodika skirta šiems tyrimams. Aprašomas gardelės sužadinimas, detektavimas bei irimas.

### 3 skyrius. Standartinė ir heterodinė detektavimą įgalinanti ŠIDG eksperimentinės schemos

Šiame skyriuje yra pristatomos eksperimentinės ŠIDG schemos – standartinė (1 pav.) bei žadinančių pluoštelių gavimui naudojant holografinį pluoštelių daliklį (HPD) (2 pav.). Dinaminė difrakcinė gardelė bandinyje užrašoma 25 ps impulso trukmės sinchronizuotų modų 10 Hz dažnio YAG:Nd<sup>3+</sup> lazerio impulsais, naudojant trečią (355 nm), ketvirtą (266) ar penktą (213 nm) harmonikas. Dinaminė gardelė zondojuama pirmos harmonikos (1064 nm) užvėlintais iki ~2 ns impulsais. Visos tirtos medžiagos yra skaidrios šiam bangos ilgiui, todėl zonduojantis spindulys (toliau bus vadinamas zonu) bandinyje silpnai sugeriamas ir difraguoja nuo viso dinaminės difrakcinės gardelės storio. Tai pat buvo naudotas YLF:Nd<sup>3+</sup> analogiškas lazeris, kuris pasižymi trumpesne impulso trukme – 7 ps, ir šiek tiek skirtingu spinduliuotės bangos ilgiu (fundamentinė harmonika – 1054 nm).



1 pav. Standartinė ŠIDG eksperimento schema.

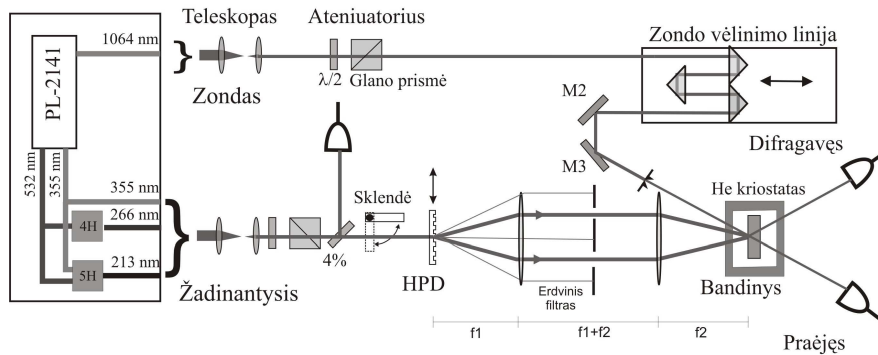
Standartinėje ŠIDG schemoje gardelę užrašantys spinduliai gaunami naudojant pusiau skaidrų dielektrinį veidrodį. Padalinti spinduliai kampu  $\theta$  suvedami bandinyje, interferuoja ir užrašo dinaminę gardelę. Pluoštelių optiniai keliai suvienodinami naudojant vėlinimo liniją. Dinaminės gardelės periodą apsprendžia pluoštelių susikirtimo kampas:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

Gardelės irimas stebimas matuojant dinaminės gardelės difrakcijos efektyvumą, t.y. difragavusio ( $I_d$ ) ir praėjusio ( $I_{pr}$ ) zondo energijų santykį:

$$\eta = \frac{I_d}{I_{pr}} = |J_1(\phi)|^2 \approx \left| \frac{\pi \Delta \tilde{n} d}{\lambda} \right|^2 = \left( \frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c d}{4} \right)^2, \quad (2)$$

kur  $J_1$  – pirmosios eilės Beselio funkcija,  $\phi = \pi \Delta n d$ ,  $\Delta n$  ir  $\Delta \alpha$  – indukuota lūžio rodiklio bei sugerties moduliacija,  $d$  – dinaminės gardelės storis. Disertacijoje dažniausiai nagrinėjama laisvųjų krūvininkų gardelė, kurios sukelta lūžio rodiklio moduliacija yra tiesiog proporcinga laisvųjų krūvininkų tankio moduliacijai -  $\Delta n = n_{eh} \Delta N$ .



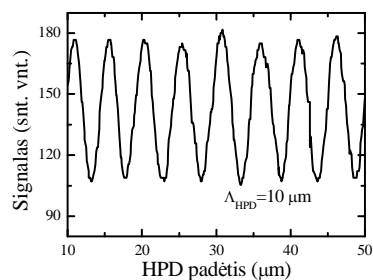
2 Pav. ŠIDG eksperimento schema su holografiniu pluoštelių dalikliu.

Antroje trečiojo skyriaus dalyje aprašyta ŠIDG metodikos schema su HPD (2 pav.), kuri įgalina heterodininį detektavimą. Naudojant standartinę ŠIDG schemą yra sudėtinga pakeisti gardelės periodą, nes reikia suderinti žadinančių impulsų optinius kelius, ką padaryti nėra lengva. Kita problema yra ta, kad kietų medžiagų (GaN, safyras, SiC, deimantų) bandinius labai sudėtinga idealiai nupoliruoti, todėl jie sklaido šviesą. Sklaidyta zondo šviesa (toliau ją vadinsime fonu) interferuoja su difrakcijos signalu ir detektoriaus matuojamas signalas priklauso nuo difragavusios ir sklaidytos šviesos fazių skirtumo  $\theta$ .

$$I_S(\theta, \Delta t) = I_D(\Delta t) + I_F + 2\gamma \sqrt{I_D(\Delta t) I_F} \cos(\theta) \quad (3)$$

Kadangi šis fazių skirtumas negali būti kontroliuojamas įprastoje schemoje matuojamas difrakcijos efektyvumo kinetikos ( $I_D(\Delta t)$ ) bus iškraipomos interferencijos nario.

Abi šios problemos gali būti išspręstos naudojant schemą su HPD. Ši schema skiriasi užrašančiųjų pluoštelių formavimo būdu. Jie gaunami naudojant HPD –



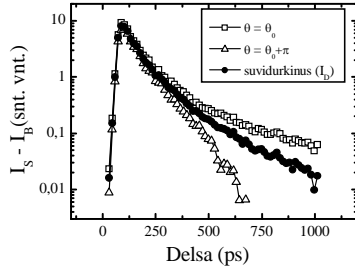
3 pav. Difrakcijos signalą matuojančio detektoriaus parodymai keičiant HPD padėtį, parodo ženkliai difrakcijos signalo ir fono interferenciją [P2]

stačiakampio profilio difrakcinę gardelę iššedintą kvarce, parenkant šedimo gylį taip, kad pirmųjų difrakcijos eilių (+/-1) difrakcijos efektyvumas būtų maksimalus (~70%). Šie pluošteliai teleskopu, sudarytu iš dviejų lęšių su židinio nuotoliais  $f_1$  ir  $f_2$ , yra suvedami į bandinį. Kitos difrakcinės eilės yra blokuojamos erdvinio filtru. Tokiu būdu suformuotos dinaminės difrakcinės gardelės periodas lygus  $A = A_{HPD} / 2 f_2 / f_1$ . Norint pakeisti dinaminės gardelės periodą, reikia pakeisti HPD su kitu periodu bei pakoreguoti erdvinio filtro padėtį. Šioje schemoje užrašančiųjų pluoštelių keliai yra

simetriški, tokiu būdu automatiškai gaunamas užrašančiųjų impulsų erdvinis ir laikinis sutapimas.

Mes parodėme, kad fazės skirtumas tarp fono ir difrakcijos signalo gali būti kontroliuojamas keičiant HPD padėtį išilgai jo gardelės vektoriaus krypties. Keičiant HPD padėtį, keičiamas ir jo atvaizdas bandinyje, tai yra judinama dinaminė difrakcinė gardelė. Difrakcijos signalo fazė bei dinaminės

difrakcinės gardelės padėtis yra susieti -  $\theta = 4\pi\Delta x/\lambda$  [1], nes keičiant jos padėtį keičiasi



4 pav. Heterodininio signalo kinetikos esant dviem fazės skirtumo reikšmėms tarp difrakcijos signalo ir fono (atviri simboliai). Pagal (4) formulę suskaičiuota difrakcijos signalo kinetika (juodi apskritimai) [P2].

optinis difragavusio spindulio kelias. Kadangi judinant HPD fono fazė nekinta, tokiu būdu galime keisti fazę tarp fono ir difrakcijos signalo (3 pav.) ir įgyvendinti heterodininį detektavimą

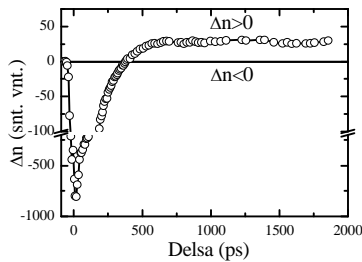
Naudodami šią schemą galima eliminuoti interferencijos narį (3) formulėje ir teisingai išmatuoti difrakcijos efektyvumo kinetiką. Tai atliekame darydami matavimus dviejuose HPD padėtyse tarp kurių skirtumas yra  $\Lambda_{\text{HPD}}/4$ , kas atitinka matavimus su fazės skirtumais  $\theta = \theta_0$  ir  $\theta = \theta_0 + \pi$ . Kadangi pagal (3) formulę skiriasi tik interferencijos nario ženklas, suvidurkinę šiuos matavimus eliminuojame šį narį ir išmatuojame difrakcijos intensyvumo kinetiką, kuri yra proporcinga lūžio rodiklio moduliacijos kvadratui (fono intensyvumas  $I_F$

išmatuojamas atskiru matavimu uždengus vieną iš užrašančių pluoštelių):

$$\Delta n^2(\Delta t) \propto I_D(\Delta t) = (I_S(\theta, \Delta t)|_{\theta=\theta_0} + I_S(\theta, \Delta t)|_{\theta=\theta_0+\pi})/2 - I_F \quad (4)$$

Lūžio rodiklio ženklo kitimas gali būti tiesiogiai stebimas, jeigu suskaičiuosime minėtų matavimų skirtumą. Tada, difrakcijos ir fono signalo intensyvumai susiprastina ir lieka tik interferencinis narys, kuris yra proporcingas lūžio rodiklio moduliacijai pirmame laipsnyje (o ne kvadratui, kaip yra gaunama matuojant difragavusio signalo intensyvumą):

$$\Delta n(\Delta t) \propto \sqrt{I_D(\Delta t)} \propto (I_S(\theta, \Delta t)|_{\theta=\theta_0} - I_S(\theta, \Delta t)|_{\theta=\theta_0+\pi})/\sqrt{I_F} \quad (5)$$



5 pav. Lūžio rodiklio moduliacijos kinetika CVD deimante, išmatuota naudojant heterodininį ŠIDG signalo detektavimą [P2].

Naudojant šį būdą buvo stebėta dviejų optinių netiesiškumų konkurencija. Sužadinus daug defektų turinčiame deimanto bandinyje laisvųjų krūvininkų gardelę, buvo stebima neigiama lūžio rodiklio moduliacija ( $\Delta n < 0$ ) (5 pav.). Krūvininkams rekombinuojant nespinduliniu būdu susidarė temperatūrinė gardelė, kuri didina lūžio rodiklį ( $\Delta n > 0$ ). Taigi šis naujoviškas ŠIDG signalo heterodininis detektavimo būdas leidžia tiesiogiai fiksuoti lūžio rodiklio moduliacijos ženklo kitimą.

## 4 Skyrius. Krūvininkų dinamika GaN

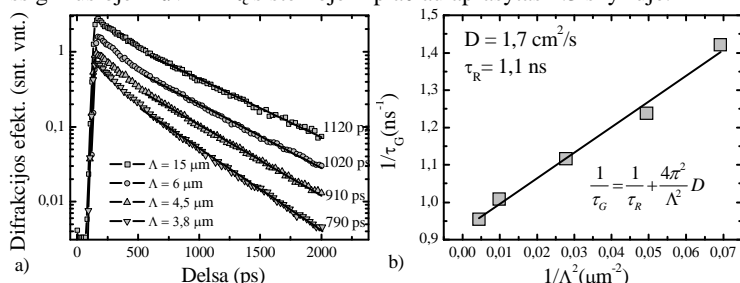
### 4.1 Dislokacijų įtaka krūvininkų rekombinacijai GaN

Šiame skyriuje aprašomi išsamūs GaN sluoksnių tyrimai ŠIDG metodu. Eksperimentai atlikti daugiau nei dvidešimtyje MOCVD, karštos-sienelės MOCVD,  $\mu$ -ELO, HVPE metodais užaugintų GaN sluoksnių ant safyro, SiC bei Si padėklų. Sluoksnių storis kito nuo  $\sim 1 \mu\text{m}$  iki kelių šimtų  $\mu\text{m}$ , dislokacijų tankis – nuo  $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$  iki  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ .

Krūvininkų ambipolinis difuzijos koeficientas bei rekombinacijos trukmė buvo nustatomi matuojant ŠIDG kinetikas esant skirtingiems gardelės periodams, nes difuzinė gardelės irimo sparta gali būti varijuojama keičiant gardelės periodą:

$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{4\pi^2}{\Lambda^2} D. \quad (6)$$

6 pav. pavaizduotos tipinės tokio eksperimento metu gautos kinetikos, kai kinetikų irimo sparta didėja mažinant periodą. Atidėjus atvirkštinio irimo trukmės priklausomybę nuo atvirkštinio gardelės periodo buvo nustatyti krūvininkų ambipolinės difuzijos koeficientai bei gyvavimo trukmės. Buvo nustatyta, kad esant mažam žadinančiųjų pluoštelių energijos tankiui ( $I_0 < 0,5 \text{ mJ/cm}^2$ ) visuose tirtuose GaN sluoksniuose difuzijos koeficiento vertė yra apie  $D = 1,7 \pm 0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$  (1 Lentelė). Didinat žadinimą, t.y. nepusiausvirųjų krūvininkų tankį, bandiniuose su ilgesne krūvininkų gyvavimo trukme buvo fiksuojamas ambipolinės difuzijos koeficiento didėjimas iki  $\sim 2,9 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Šis difuzijos koeficiento didėjimas buvo paaiškintas, kaip sukeltas Fermi slėgio išsigimusiyoje krūvininkų sistemoje ir plačiau aprašytas 4.3 skyriuje.



6 pav. ŠIDG kinetikos MOCVD būdu užaugintame GaN sluoksnyje ( $N_D = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) esant skirtingiems gardelės periodams (a). Atvirkštinės gardelės trukmės priklausomybė nuo atvirkštinio gardelės periodo kvadrato naudota krūvininkų difuzijos koeficiento ir rekombinacijos trukmės nustatymui pagal (6) formulę (b) [A5].

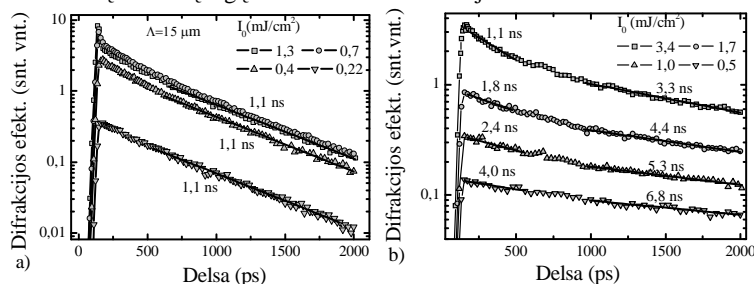
Krūvininkų rekombinacijos ypatumai buvo nagrinėjami naudojant didelį dinaminės gardelės periodą ( $\Lambda > 10 \mu\text{m}$ ), nes šiuo atveju difuzinis gardelės irimas yra žymiai lėtesnis nei krūvininkų rekombinacija trukmė ( $\tau_D = \Lambda^2/4\pi^2 D \gg \tau_R$ ). Buvo matuojamos ŠIDG kinetikos keičiant žadinimo energijos tankį, t.y. nepusiausvirųjų krūvininkų tankį. Tipinės GaN sluoksniams tokių eksperimentų kinetikos pavaizduotos 7 ir 8 pav.

GaN sluoksniams su dideliu dislokacijų tankiu ( $N_D > 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) būdingos vienkspontinės kinetikos su pastovia nuo žadinimo intensyvumo nepriklausiančia rekombinacijos trukme (7a pav.). Kadangi nustatyta, kad rekombinacijos trukmės vertės stipriai priklauso dislokacijų tankio (1 lentelė, 10b pav.), teigiame, kad nespindulinė

1 Lentelė. GaN sluoksnių fotoelektrinių parametrų priklausomybė nuo dislokacijų tankio.

Bandinio Nr.	Auginimo technologija	Storis ( $\mu\text{m}$ )	$N_D$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	$\tau_R$ (ns)	$D_a$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$L_D$ ( $\mu\text{m}$ )
1	MOCVD/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	2,6	$10^9$	0,7	1,7	0,34
2		3-4	$5 \cdot 10^8$	0,9 - 1,1	1,7-1,8	0,42
4		0,3 -1,7	-	0,06 -0,42	1,7-1,8	0,1-0,26
5-7	MOCVD/SiC	0,75-1,9	$>10^9$	0,37- 0,34	1,8-2,1	$\sim$ 0,25
8-10	MOCVD/Si	0,75-1,2	$>10^9$	0,05-0,16	$\sim$ 1,6	0,16
3	$\mu$ -ELO	10	$5 \cdot 10^7$	2,7	1,8-2,4	0,8
11	HVPE	270	$2,5 \cdot 10^7$	2,9	1,9-2,9	0,7 - 0,9
12		400	$5 \cdot 10^6$	3,3 - 5,2	1,9-2,7	0,94 -1
13-17		10 - 150	-	0,4 - 4,8	1,8-2,5	0,27-0,93

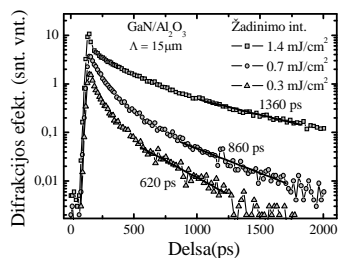
rekombinacija ties dislokacijomis yra dominuojantis rekombinacijos mechanizmas šiuose bandiniuose. Padidinus žadinimo energijos tankį, pradinėje kinetikų dalyje atsiranda lazerio impulsą kartojanti kinetikos dalis (7a, 8 pav). Toks kinetikos pobūdis stebimas visuose GaN sluoksniuose, tik skiriasi slenkstinis žadinimo intensyvumas. Ši sparti kinetikų dalis yra nulemta priverstinės rekombinacijos esant šviesos stiprinimo sąlygoms. Tai buvo įrodyta atlikus fotoluminescencijos matavimus [2]. Stipriai žadinant puslaidininkį realizuojama užpildos apraža, vyksta sparti spindulinė krūvininkų rekombinacija nulemta priverstinių šuolių. Krūvininkų tankiui sumažėjus iki slenkstinės vertės tolimesnę kinetikų eigą lemia kiti rekombinacijos mechanizmai.



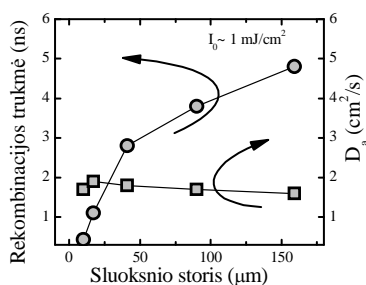
7 pav. Keičiant žadinimo energijos tankį išmatuotos ŠIDG kinetikos GaN sluoksniuose su skirtingu dislokacijų tankiu  $N_D=5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  (a) bei  $N_D=2,5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$  (b) esant dideliame gardelės periodui [P3, P11].

GaN sluoksniuose su mažu dislokacijų tankiu ( $N_D < 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) krūvininkų rekombinacijos kinetikos yra ne eksponentinės (7b pav.). Bėgant laikui po krūvininkų sužadavimo krūvininkų rekombinacijos sparta lėtėja (momentinė rekombinacijos trukmė ilgėja), tai reiškia, kad mažėjant krūvininkų tankiui mažėja ir rekombinacijos tikimybė. Padidinus žadinimo intensyvumą, buvo stebėtas kinetikų spartėjimas, kas irgi rodo, kad didėjant krūvininkų tankiui spartėja jų rekombinacija. Atlikus detalius krūvininkų dinamikos modeliavimus (4.4 skyrius) buvo parodyta, kad tokį kinetikų pobūdį lemia bimolekulinė rekombinacija. Šis rekombinacijos kanalas dominuoja GaN sluoksniuose turinčiuose mažą dislokacijų tankį, bei esant dideliems žadinimo intensyvumams ( $N \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).

Žadinant krūvininkus ties GaN ir safyro sandūra buvo stebėtos neeksponentinės difrakcijos efektyvumo kinetikos. Safyras yra skaidrus 355 nm bangos ilgio spinduliuotei, todėl gardelę galima užrašyti šviečiant iš „blogosios“ bandinio pusės (per safyrą). Taip išmatuotos kinetikos yra spartesnės nei matuojant iš GaN sluoksnio augimo pusės. Pirma, tai parodo, kad pradinis augimo sluoksnis yra žymiai labiau defektuotas. Antra, šios kinetikos yra neeksponentinės ir lėtėja didinant žadinimo energijos tankį. Neeksponentinės kinetikos gaunamos dėl medžiagos savybių nevienalytiškumo, t.y. prie GaN/safyro sandūros yra daugiau defektų (t.y. trumpesnė



8 pav. ŠIDG kinetikos išmatuotos žadinant per safyro padėklą prie GaN ir safyro sandūros esant skirtingiems žadinimo energijos tankiams [A5].



9 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės bei ambipolinio difuzijos koeficiento priklausomybė nuo HVPE būdu užauginto GaN sluoksnio storio.

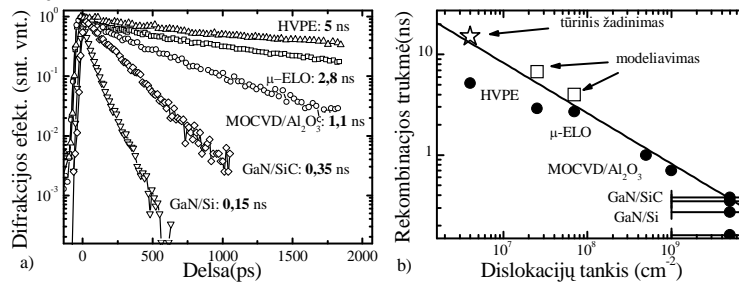
1 lentelėje reziumuojami ŠIDG tyrimai atlikti įvairiomis technologijomis užaugintuose GaN sluoksniuose. Matyti, kad krūvininkų gyvavimo trukmė kinta dviem eilėmis (nuo 50 ps iki 5,2 ns), o difuzijos koeficientas yra praktiškai pastovus, iš to seka, kad krūvininkų difuzijos nuotolis kinta nuo 0,1 iki 1 μm. Tai rodo, kad dislokacijos yra svarbūs rekombinaciniai centrai bei tai, kad krūvininkų rekombinacijos trukmė labai jautriai atspindi medžiagos kokybę (10 pav.). Naudojant šiuos duomenis, buvo nustatyta krūvininkų rekombinacijos trukmės priklausomybė nuo dislokacijų tankio (10b pav.). Didelio dislokacijų tankio intervale ( $N_D > 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) stebima stipri gyvavimo trukmės priklausomybė nuo dislokacijų tankio ( $\tau_R \propto (N_D)^{-0.5}$ ), tai rodo, kad dislokacijų nulemta rekombinacija yra dominuojanti. Tuo tarpu, mažo dislokacijų tankio intervale ši

gyvavimo trukmė), o tolstant nuo sandūros medžiagos kokybė gerėja. Sužadinus įvairios kokybės vietas stebimos neeksponentinės, t.y. ne viena gyvavimo trukmė apibūdinamos kinetikos. Kad GaN sluoksnio savybės gerėja (ilgėja krūvininkų gyvavimo trukmė) didėjant jo storiui mes patikrinome išmatavę kinetikas specialiai nuėsdintame bandinyje, sudarytame iš kelių skirtingo storio laiptelių [A7]. Kinetikų lėtėjimą keliant žadinimą, o taip pat ir neeksponentinę jų formą lemia ir defektnių būsenų gaudančių krūvininkus pildymasis.

ŠIDG metodas buvo naudotas GaN sluoksnių charakterizavimui. Buvo iširta HVPE būdu užaugintų skirtingo storio (10 – 145 μm) GaN sluoksnių ant safyro serija. Nustatyta, kad krūvininkų gyvavimo trukmė ilgėja, didinat sluoksnio storį nuo 400 ps 10 μm storio bandinyje iki 4,1 ns 145 μm storio sluoksnyje (9 pav.). Tai patvirtino, kad HVPE būdu auginamų GaN sluoksnių dislokacijų tankis mažėja didinat sluoksnio storį [3]. Tuo tarpu krūvininkų difuzijos koeficientas yra pastovus visuose bandiniuose, ir nepriklauso nuo dislokacijų tankio. Taip yra todėl, kad kambario temperatūroje sklaida fononais lemia krūvininkų judrį, o sklaida dislokacijomis bei kitais defektais yra svarbi tik žemose temperatūrose.

priklausomybė sušvelnėja, ir gyvavimo trukmė tampa mažiau priklausoma nuo dislokacijų tankio. Taip atsitinka todėl, kad šiuose bandiniuose aukšto sužadavimo sąlygomis ( $N \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) dominuoja bimolekulinė rekombinacija. Norint nustatyti dislokacijų lemiamą krūvininkų gyvavimo trukmę buvo atlikti tūrinio žadinimo matavimai esant žemam sužadintų krūvininkų tankiui ( $N \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), naudojant žadinimui šviesą su mažesniu energijos kvantu nei GaN draustinės juostos tarpas. Esant šioms sąlygoms bimolekulinės rekombinacijos tikimybė sumažėjo ir buvo nustatyta 15 ns rekombinacijos trukmė mažiausią dislokacijų tankį turinčiame bandinyje. Plonuose bandiniuose esant tūriniam žadinimui ŠIDG signalas yra per mažas, todėl 4.2 skyriuje aprašytu krūvininkų dinamikos modeliavimu buvo atskirti bimolekulinės ir dislokacijų nulemtos rekombinacijos indėliai. Atidėjus šias vertes, dislokacijų lemiamą krūvininkų rekombinacijos trukmę gali būti aprašoma  $\tau[ns] = \frac{2,6 \cdot 10^4}{\sqrt{N_D[cm^{-2}]}}$  funkcija visame

dislokacijų tankio intervale. Kadangi vidutinis atstumas tarp dislokacijų yra proporcingas  $1/\sqrt{N_D}$ , gautas rezultatas rodo, kad krūvininkų rekombinacijos trukmė proporcinga vidutiniam atstumui tarp dislokacijų, o tai patvirtina krūvininkų rekombinacijos dislokacijomis modelį.



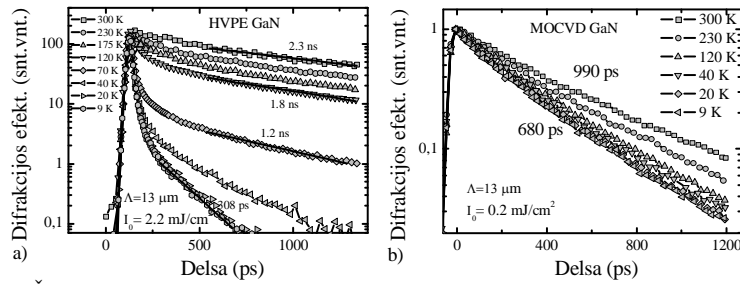
10 pav. ŠIDG kinetikos išmatuotos skirtingomis technologijomis užaugintuose GaN sluoksniuose (a). Krūvininkų rekombinacijos trukmės priklausomybė nuo dislokacijų tankio esant dideliame (juodi simboliai) žadinimo intensyvumui (b). Atviri simboliai gauti naudojant tūrinį žadinimą, kuris užtikrina mažą sužadintų krūvininkų tankį arba modeliavimo būdu įvertinus nespindulinės rekombinacijos indėlį [A6].

#### 4.2. Krūvininkų dinamikos GaN tyrimai žemose temperatūrose

Šiame skyriuje aprašomi žemų temperatūrų nepusiausvirųjų krūvininkų dinamikos tyrimai GaN sluoksniuose. Šie tyrimai buvo inspiruoti bimolekulinės rekombinacijos stebėjimo kambario temperatūroje. Pagal teoriją, bimolekulinės rekombinacijos koeficientas  $B \propto T^{-3/2}$  [4] turėtų išaugti žemose temperatūrose, o tuo pačiu ir spindulinės rekombinacijos tikimybė bei indėlis.

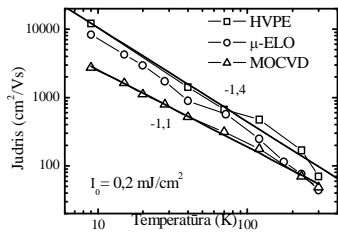
ŠIDG tyrimams žemose temperatūrose buvo parinkti trys GaN sluoksniai su skirtingu dislokacijų tankiu bei užauginti skirtingomis technologijomis (MOCVD -  $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ,  $\mu$ -ELO -  $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$  ir HVPE -  $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ). Eksperimentai buvo atliekami uždaro ciklo helio kriostate, kuris leido varijuoti temperatūrą 9–300 K intervale.





11 pav. ŠIDG kinetikos išmatuotos keičiant temperatūrą mažo (a) ir didelio (b) dislokacijų tankio GaN sluoksniuose [A9].

Tipinės ŠIDG kinetikų šeimos išmatuotos GaN sluoksniuose su skirtingu dislokacijų tankiu pavaizduotos 11 paveiksle. HVPE,  $\mu$ -ELO būdu užaugintuose bandiniuose, kurie pasižymi mažu dislokacijų tankiu, stebimos neekspontinės krūvininkų rekombinacijos kinetikos (11a pav.). Žemose temperatūrose neekspontentiškumas tapo stipriau išreikštas. Šios tendencijos patvirtina, kad krūvininkų pagrindinis rekombinacijos kanalas šiuose bandiniuose yra bimolekulinė rekombinacija, kurios koeficientas didėja žeminant temperatūrą. Tuo tarpu, tiesinė (nospindulinė rekombinacija) dominuoja bandiniuose su dideliu dislokacijų tankiu, todėl žeminant temperatūrą kinetikos išlieka vienekspontinės, o spartėjanti bimolekulinė rekombinacija tik šiek tiek pagreitina stebimas kinetikas (11b pav.).



12 pav. Judrio priklausomybė nuo temperatūros išmatuota skirtingomis technologijomis užaugintuose GaN sluoksniuose [A9].

Išmatavę ŠIDG kinetikas esant skirtingiems gardelės periodams nustatėme, krūvininkų ambipolinės difuzijos koeficiento temperatūrinės priklausomybes įvairiomis technologijomis užaugintuose GaN sluoksniuose. Panaudoję Einšteino sąryšį ( $D = \mu kT/e$ ) suskaičiavome kaip krūvininkų judris priklauso nuo temperatūros (12 pav.). Iš šių priklausomybių matyti, kad mažai dislokacijų turinčiuose bandiniuose krūvininkų judrį riboja sklaida akustiniais fononais (polinkis -1,4) visame matuotame temperatūrų intervale.

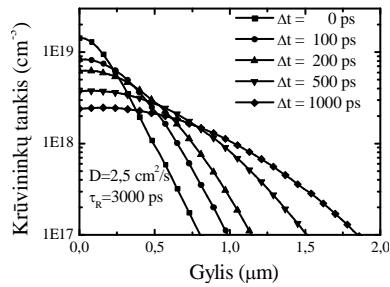
Norint kiekybiškai paaiškinti išmatuotas ŠIDG kinetikas, įvertinti spindulinės ir nospindulinės rekombinacijos indėlius, bei nustatyti bimolekulinės rekombinacijos koeficiento vertę plačiame temperatūrų intervale atlikome skaitmeninį krūvininkų dinamikos modeliavimą. Kadangi krūvininkus žadina artai paviršiaus sukuriama dviejų kryptių krūvininkų tankio gradientai, turime spręsti dvimatę krūvininkų tolydumo lygtį:

$$\frac{\partial N(x, z, t)}{\partial t} = \nabla [D \nabla N(x, z, t)] - \frac{N(x, z, t)}{\tau_R} - BN^2(x, z, t) + G(x, z, t), \quad (7)$$

kur  $B$  bimolekulinės rekombinacijos koeficientas,  $G$ - generacijos narys, atitinkantis eksperimentines žadinimo sąlygas pikosekundinės trukmės interferenciniu stipriai sugeriamos šviesos lauku:

$$G(x, z, t) = \frac{I_0 \alpha}{h \nu} (1 - R)(1 + \cos(2\pi x/\Lambda)) \exp(-\alpha z) \cdot \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\tau_{las} \sqrt{\pi}} 2^{-\frac{4(t-t_0)^2}{\tau_{las}^2}} \quad (8)$$

kur  $I_0$  – žadinimo energijos tankis,  $h\nu$  – žadinančiojo kvanto energija,  $\alpha$  – sugerties koeficientas,  $R$  – atspindžio koeficientas,  $\tau_{las}$  – lazerio impulso trukmė.

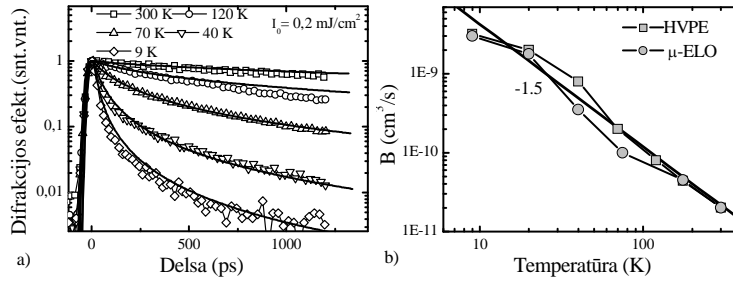


13 pav. Sumodeliuoti krūvininkų tankio profiliai į bandinio gylį ties gardelės maksimaliais skirtingais laiko momentais po žadinimo. Modeliavimo parametrai -  $D = 2,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\tau_R = 3 \text{ ns}$ ,  $I_0 = 1 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,  $\Lambda = 10 \text{ μm}$ ,  $\alpha = 7 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ,  $d = 10 \text{ μm}$ .

Lygties sprendinys, tai krūvininkų tankio dvimačiai profiliai (13 pav.), kuriuos atitinkamai suintegravus gaunamas dydis proporcingas eksperimentiškai matuojamam difrakcijos efektyvumui. Sumodeliuoti profiliai rodo, kad krūvininkų rekombinacijos kinetikoms yra labai svarbi krūvininkų difuzija į bandinio gylį, nes ji mažina vidutinį krūvininkų tankį ir lėtina bimolekulines rekombinacijos spartą ( $\tau_R = 1/BN$ ).

Varijuojant tik bimolekulines rekombinacijos koeficientą bei tiesinės rekombinacijos trukmę pavyko sumodeliuoti eksperimentiškai išmatuotas kinetikas esant skirtingiems žadinimo intensyvumams, temperatūroms bei dislokacijų tankiams (14a pav.). Nustatytos bimolekulines

rekombinacijos koeficiento priklausomybė nuo temperatūros ( $B(300 \text{ K}) = 2 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$  ir  $B(9 \text{ K}) = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ ). Gauta, kad šios priklausomybės polinkis yra  $-1,5$  (14b pav.), kaip ir numato teoriniai skaičiavimai [4].

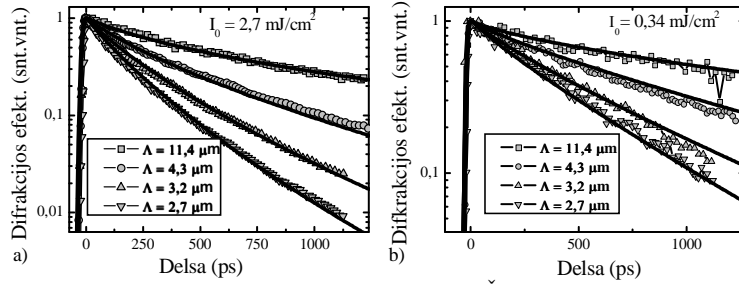


14 pav. Išmatuotos ir sumodeliuotos ŠIDG kinetikos HVPE GaN sluoksnyje 9 – 300 K temperatūrų intervale (a). Modeliuojant krūvininkų dinamika dviejuose GaN sluoksniuose nustatyta bimolekulines rekombinacijos koeficiento priklausomybė nuo temperatūros (b) [A9].

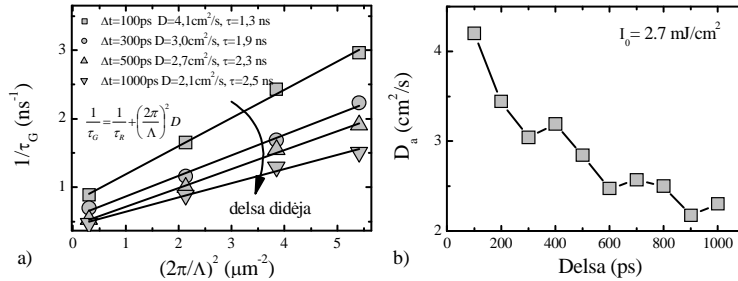
### 4.3 Krūvininkų difuzija GaN stipraus sužadavimo sąlygomis

Šiame skyriuje aprašomi ambipolinės krūvininkų difuzijos koeficiento matavimai esant dideliems krūvininkų tankiams ( $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Eksperimentuose buvo užfiksuotas ambipolinės krūvininkų difuzijos koeficiento didėjimas didinant sužadintų krūvininkų tankį geros kokybės GaN sluoksnyje. Šis efektas buvo paaiškintas, kaip Fermi slėgis išsigimusiame krūvininkų sistemoje.

Krūvininkų difuzijos koeficientas nustatomas matuojant ŠIDG kinetikas esant skirtingiems periodams, taip keičiant difuzijos įtaką į gardelės irimą (pagal 6 formulę). Išmatuotos neekspontinės ŠIDG kinetikos esant tiek dideliame, tiek ir mažame gardelės periodui (15a pav.) parodė, kad tiek krūvininkų rekombinacija, tiek ir difuzija vyksta nepastoviu greičiu. Atlikus difuzijos koeficiento ir momentinės rekombinacijos trukmės nustatymo procedūrą skirtinguose laiko intervaluose po krūvininkų sužadavimo buvo pastebėta, kad difuzijos koeficientas laikui bėgant mažėja (t.y. mažėjant krūvininkų tankiui) nuo  $D_a = 4,1 \text{ cm}^2/\text{s}$  iki  $D_a = 2,1 \text{ cm}^2/\text{s}$  (16 pav.). Atlikus matavimus žemesniuose žadinimuose buvo stebėtas pastovus difuzijos koeficiento vertės mažėjimas, o žemiausiame naudotame žadinime gautos eksponentinės kinetikos (15b pav.) ir nustatyta pastovi difuzijos koeficiento vertė ( $D = 1,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ).



15 pav. Išmatuotos (taškai) bei sumodeliuotos (linijos) ŠIDG kinetikos esant skirtingiems gardelės periodams HVPE GaN sluoksnyje esant skirtingiems žadinimo energijos tankiams [A11].



16 pav. Atvirkštinės gardelės irimo trukmės priklausomybė nuo atvirkštinio gardelės periodo kvadrato naudota krūvininkų difuzijos koeficiento ir momentinės rekombinacijos trukmės nustatymui, esant skirtingiems laiko momentams po krūvininko sužadavimo (a). Ambipolinio krūvininko difuzijos koeficiento kitimas laike stipriai sužadintus GaN sluoksnį (b) [A11].

Kad netiesinę krūvininkų rekombinacija nulemia bimolekulinė rekombinaciją buvo parodyta praeitame skyriuje. Krūvininkų difuzijos koeficiento didėjimą dideliuose krūvininkų tankiuose mes priskyreme Fermi slėgiui išsigimusioje krūvininkų sistemoje. Toks efektas buvo stebimas GaAs[5]. Krūvininkų judrį ir difuzijos koeficientą sieja apibendrintas Einšteino sąryšis:

$$D(N) = \frac{\mu k T}{e} \frac{F_{1/2}(\eta)}{F_{-1/2}(\eta)} \quad (9)$$

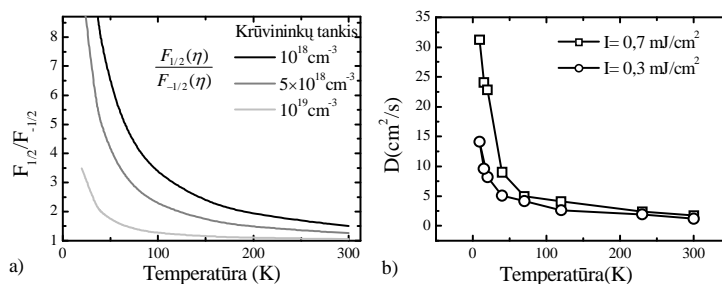
Esant krūvininkų išsigimimui Fermi integralai neišsiprastina ir difuzijos koeficientas didėja didinant krūvininkų tankį.

Norint įsitikinti, kad Fermi slėgis gali paaiškinti stebėtą ryškų difuzijos koeficiento didėjimą GaN sluoksniuose buvo atliktas krūvininkų dinamikos modeliavimas, siekiant sutapatinti eksperimentines ir modelines ŠIDG kinetikas. Modeliavimui naudojome lygtį aprašytą 4.2 skyriuje, tik šiuo atveju buvo naudotas nuo krūvininkų tankio priklausantis difuzijos koeficientas. Buvo laikoma, kad krūvininkų judris yra pastovus, o difuzijos koeficientas kinta tik dėl Fermi integralų santykio pokyčio:

$$D(N) = D_0 \frac{F_{1/2}(\eta)}{F_{-1/2}(\eta)}. \quad (10)$$

Naudojant vieną parametrų rinkinį, šiuo modeliu mums pavyko labai gerai aprašyti ŠIDG kinetikas išmatuotas keturiuose gardelės perioduose ( $\Lambda = 2,7 - 11,4 \mu\text{m}$ ) bei keturiuose žadinimo energijos tankiuose ( $I_0 = 0,34 - 2,7 \text{ mJ/cm}^2$ ) (15 pav.). Buvo nustatyta žemų krūvininkų tankių difuzijos koeficiento GaN sluoksnyje vertė  $D_0 = 1,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Žemose temperatūrose tas pats krūvininkų tankis tampa labiau išsigimęs, nes mažėja efektyvusis būsenų tankis. Todėl skaičiavimai rodo, Fermi integralų santykis žemesnėje nei 50 K temperatūroje sparčiai išauga (17a pav.), o tai turėtų nulėmti krūvininkų difuzijos koeficiento padidėjimą (pagal 10 lygtį). Difuzijos koeficiento matavimai žemose temperatūrose parodė, kad difuzijos koeficientas staigiai išauga temperatūrose žemesnėse nei 50 K, o šis efektas labiau išreikštas esant didesniai sužadintų krūvininkų tankiui (17b pav.), kaip ir numato pritaikytas modelis.



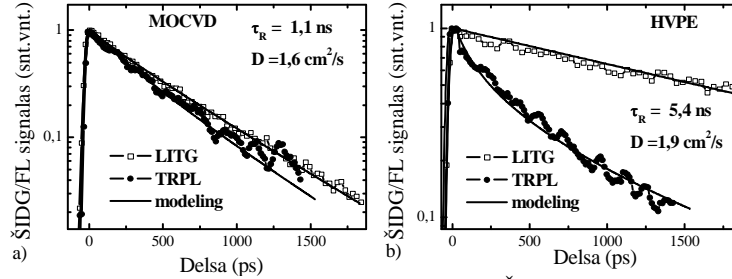
17 pav. Fermi integralų santykio priklausomybė nuo temperatūros esant skirtingiems krūvininkų tankiams (a). Eksperimentiškai nustatyta krūvininkų difuzijos koeficiento GaN sluoksnyje priklausomybė nuo temperatūros esant dviem krūvininkų žadinimo intensyvumams [A11].

#### 4.4 Krūvininkų rekombinacijos trukmės nustatymas ŠIDG bei FL metodais

Šiame skyriuje aprašomas ŠIDG ir fotoluminescencijos (FL) su laikine skyra matavimų GaN sluoksniuose palyginimas bei sprendžiamos dvi problemos. Pirma, kodėl skiriasi ŠIDG ir FL kinetikos išmatuotos geros kokybės storuose GaN sluoksniuose[6], antra, kodėl literatūroje aprašomos FL kinetikos matuojamos GaN sluoksniuose yra neekspontinės, o mažėjant sluoksnių defektiškumui FL gesimo trukmės auga labai silpnai[7-9].

Krūvininkų dinamika buvo tiriama ŠIDG ir FL metodais, naudojant panašias žadinimo sąlygas (juosta-juosta krūvininkų žadinimas, žadinimo energijos tankis apie  $0,5 \text{ mJ/cm}^2$ ). Buvo nustatyta, kad didelio dislokacijų tankio ( $N_D = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) MOCVD

technologija užaugintame GaN sluoksniuose[10-12] ŠIDG ir FL kinetikos praktiškai sutampa (18a pav.) ir rodo krūvininkų rekombinacijos trukmę apie 1 ns. Tuo tarpu ŠIDG ir FL išmatuotos mažai dislokacijų ( $N_D = 5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) turinčiame HVPE GaN sluoksnyje[13] ŠIDG ir FL kinetikos stipriai skiriasi (18b pav.). ŠIDG metodu išmatuota krūvininkų rekombinacijos kinetika yra vienkسونentinė ir rodo krūvininkų gyvavimo trukmę  $\tau_R = 5,4 \text{ ns}$ , o FL kinetika yra neeksonentinė ir jos irimo sparta kur kas greitesnė nei išmatuota dinaminių gardelių metodu.



18 pav. Eksperimentinių (simboliai) bei modeliųjų (kreivės) ŠIDG ir FL kinetikų palyginimas MOCVD ( $N_D = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) (a) ir HVPE ( $N_D = 5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) (b) technologijomis užaugintuose GaN sluoksniuose [A12]. FL matavimus atliko prof. S. Juršėno vadovaujama grupė.

Tiek ŠIDG, tiek ir FL signalas (didelio sužadavimo sąlygomis) priklauso kvadratiškai nuo krūvininko tankio, bet skirtingu būdu. Difrakcijos efektyvumas priklauso nuo viso krūvininkų kiekio suintegruoto per bandinio gylį, todėl signalas nepriklauso nuo krūvininkų tankio profilio į gylį:

$$\eta_{SIDG}(t) \propto \left[ \int_0^d N(z,t) dz \right]^2. \quad (11)$$

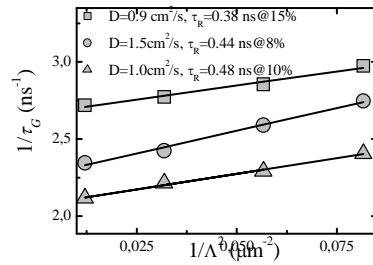
Tuo tarpu FL signalas yra proporcingas skylių ir elektronų tankio kvadratu kiekvienoje sužadintoje bandinio vietoje, o taip pat išspinduliuota šviesa besklidama iki bandinio paviršiaus yra reabsorbuojama, todėl FL signalas yra proporcingas tokiam krūvininkų tankio integralui:

$$I_{FL}(t) \propto \int_0^d N^2(z,t) \exp(-\alpha_{FL} z) dz. \quad (12)$$

Naudodami ŠIDG metodu nustatytas krūvininkų difuzijos koeficiento bei gyvavimo trukmės vertes suskaičiavome erdvinis krūvininkų tankio profilius skirtingais laiko momentais po jų sužadavimo (panašiai kaip 13 Pav., pagal 7 lygtį). Atitinkamai juos suintegravę (pagal 11, 12 formules) sumodeliavome eksperimentiškai išmatuotas ŠIDG ir FL gesimo kinetikas. Naudotas modelis gerai aprašė išmatuotas kinetikas tiek trumpą, tiek ir ilgą gyvavimo trukmę turinčiuose bandiniuose (18 pav.) ir tokiu būdu parodė, kad FL kinetikos yra iškraipomos (paspartinamos) krūvininkų difuzijos į bandinio gylį. Dėl krūvininkų difuzijos mažėja krūvininkų tankis (nors krūvininkų skaičius ir nekinta), o tuo pačiu ir FL tikimybė, nes ji proporcinga krūvininkų tankio kvadratu. Todėl storuose bei ilgą gyvavimo trukmę turinčiuose GaN sluoksniuose FL gesimą lemia ne tik krūvininkų rekombinacija, bet ir, didele dalimi, difuzija. Todėl šiais atvejais krūvininkų gyvavimo trukmės nustatymas ŠIDG metodu yra lengviau interpretuojamas.

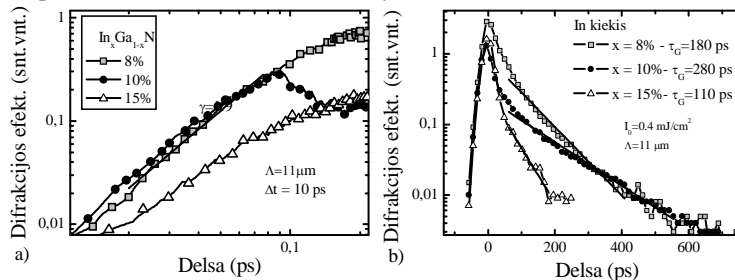
## 5 Skyrius. Krūvininkų dinamikos InGaN tyrimas

Šiame skyriuje aprašomi ŠIDG metodu atlikti krūvininkų dinamikos tyrimai InGaN sluoksniuose ir kvantinėse duobėse. Krūvininkų lokalizacija, kuri priklauso nuo In kiekio [14, 15], buvo tirta 50 nm InGaN epitaksiniuose sluoksniuose su skirtingu In kiekiu (8%, 10% ir 15%). Išmatavus ŠIDG kinetikas žadinant 355 nm šviesa esant skirtingiems gardelės periodams nustatėme krūvininkų ambipolinės difuzijos koeficientus (19 pav.), kurių vertės mažėja nuo 1,5 cm<sup>2</sup>/s iki 0,9 cm<sup>2</sup>/s didėjant In kiekiui sluoksniuose nuo 8% iki 15%. Šią tendenciją mes priskiriame didesniam krūvininkų lokalizuojančių būsenų tankiui bei juostos potencialo fluktuacijoms dėl netolygaus In pasiskirstymo [15, 16], kas sumažina krūvininkų judrį.



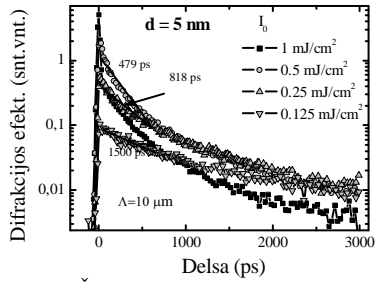
19 pav. Gardelės irimo spartos priklausomybė nuo atvirkštinio gardelės periodo kvadrato naudota krūvininkų difuzijos koeficiento ir rekombinacijos trukmės nustatymui InGaN sluoksniuose su skirtingu In kiekiu naudojant 355 nm žadinimą [A13].

Naudodami 266 nm žadinamą (siekdami sužadinti krūvininkus tik InGaN sluoksnyje, o ne po juo esančiame GaN buferyje) išmatavome ekspozicines charakteristikas esant nedideliame zondo vėlinimui bei difrakcijos kinetikas (20 pav.). Nustatėme, kad krūvininko gyvavimo trukmė koreliuoja su priverstinės rekombinacijos slenksčiu, t.y. bandiniuose su ilga krūvininkų gyvavimo trukme stebimas žemesnis priverstinės rekombinacijos slenkstis. Bandinyje turinčiame 10% In buvo nustatyta ilgiausia gyvavimo trukmė (280 ps) bei žemiausias priverstinės rekombinacijos slenkstis (~0,1 mJ/cm<sup>2</sup>). Gyvavimo trukmės pailgėjimas lyginat 8% ir 10% bandinius yra sukeltas stipresnės krūvininkų lokalizacijos pastarajame bandiniame, kuri neleidžia krūvininkams pasiekti rekombinacijos centrų, todėl ilgina jų gyvavimo trukmę. Labai trumpa gyvavimo trukmė (110 ps) 15% bandinyje yra dėl prastos kristalinės sluoksnio kokybės, kuria pasižymi InGaN sluoksniai su didesniu nei 10% In kiekiu [17]. Taigi, 10% legiravimas In yra optimalus norint pasiekti žemą priverstinės rekombinacijos slenkstį bei patenkinamą InGaN sluoksnio kokybę.



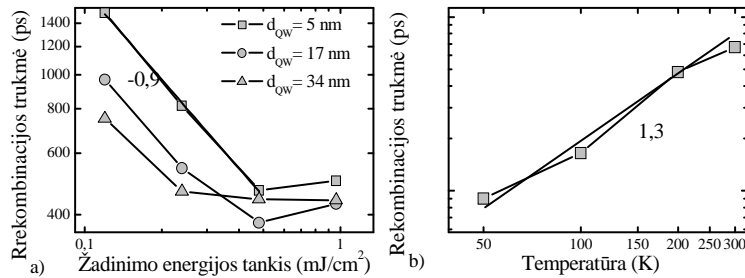
20 pav. ŠIDG ekspozicinės(a) bei laikinės(b) charakteristikos išmatuotos InGaN sluoksniuose su skirtingu In kiekiu naudojant 266 nm žadinimą [A13].

Didelės galios InGaN/GaN šviestukų gamintojai susiduria su našumo mažėjimu esant didelėms maitinimo srovėms[18]. Buvo pasiūlyta keletas krūvininkų nuotėkio mechanizmų, tokių kaip: srovės nuotėkis[19], krūvininkų delokalizacija[20] ar nespindulinė Ožė rekombinacija[21]. Krūvininkų dinamikos tyrimai su laikine skyra gali tiesiogiai stebėti krūvininkų rekombinacijos spartą ir tokiu būdu patvirtinti arba paneigti Ožė rekombinacijos galimybę.



21 pav. ŠIDG kinetikos išmatuotos InGaN kvantinėse duobėse ( $x = 5\%$ ,  $d = 5$  nm).

( $d = 5, 17$  ir  $34$  nm). Išmatavus ŠIDG kinetikas nustatyta, kad ilgiausia krūvininkų gyvavimo trukmė yra bandinyje su siauriausiomis kvantinėmis duobėmis ( $\sim 2,7$  ns mažiausiam žadiname), o trumpiausia storiausiose kvantinėse duobėse ( $\sim 1$  ns). Išmatuotos krūvininkų rekombinacijos kinetikos buvo neeksponentinės (21 pav.) ir spartėjo didinant žadinimo energijos tankį, t.y. sužadintų krūvininkų tankį. Atidėjus momentinę krūvininko rekombinacijos trukmę nuo žadinimo energijos tankio (22a pav.) buvo nustatyta, kad ji beveik tiesiškai priklauso nuo krūvininkų tankio –  $\tau \propto 1/N$ . Tai rodo, kad bimolekulinė krūvininkų rekombinacija yra dominuojantis rekombinacijos kanalas, esant maksimaliam galimam krūvininkų tankiui, kurį riboja priverstinės rekombinacijos atsiradimas toliau didinant žadinimą (21 pav greita pradinė dalis, kai  $I_0 = 1$  mJ/cm<sup>2</sup>).



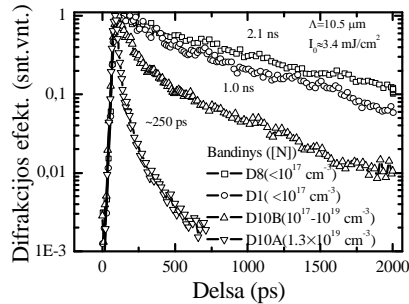
22 pav. Krūvininkų momentinės gyvavimo trukmės išmatuotos InGaN kvantinėse duobėse priklausomybė nuo žadinimo energijos tankio (a) bei temperatūros (b)

Krūvininkų dinamikos tyrimai žemose temperatūrose parodė, krūvininkų rekombinacijos trukmės priklausomybė nuo temperatūros  $\tau \propto T^{1.3}$  (22b pav.) yra labai artima bimolekulinei rekombinacijai  $\tau \propto T^{3/2}$ [4]. Taigi, šis faktas patvirtino, kad

bimolekulinė rekombinacija dominuoja šiose medžiagose, o Ožė mechanizmas nėra stebimas.

## 6 Skyrius. Krūvininkų dinamikos sintetiniuose deimantuose tyrimas

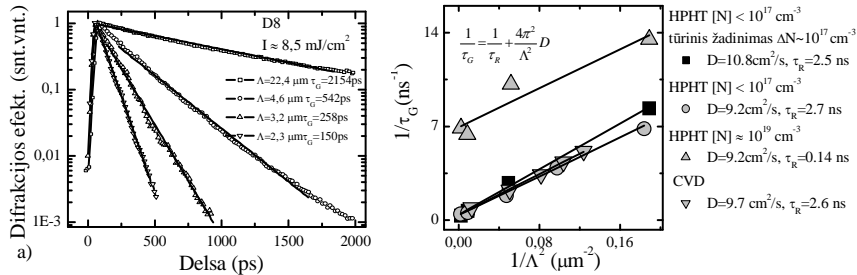
Šeštajame skyriuje aprašomi pirmą kartą atlikti krūvininkų dinamikos tyrimai sintetiniuose deimantuose ŠIDG metodu. Tirtieji deimantai buvo užauginti didelio slėgio bei didelės temperatūros (HPHT) bei cheminio garų nusodinimo (CVD) metodais [22, 23]. Vandenilio, azoto priemaišų kiekis buvo nustatytas iš UV ir matomos srities sugerties spektrų. ŠIDG eksperimento metu dinaminė gardelė buvo užrašoma penktos YAG:Nd harmonikos šviesa (213 nm), kas užtikrina juosta-juosta krūvininkų generaciją bei didelį sužadintų krūvininkų tankį ( $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). Norint pasiekti žemesnį krūvininkų tankį buvo naudojamas tūrinis žadinimas, t.y. buvo naudota 266 nm UV spinduliūtė, kuri yra silpnai sugerama deimante ir užtikrina tūrinį žadinimą.



23 pav. ŠIDG kinetikos išmatuotos HPHT deimantuose su skirtinga azoto priemaišų koncentracija. Skaičiais parodytos gardelės irimo trukmės atitinka krūvininkų rekombinacijos trukmes [A14].

23 pav. parodytos ŠIDG kinetikos išmatuotos HPHT deimantuose su skirtinga azoto priemaišų koncentracija. Kadangi šie matavimai atlikti esant dideliame gardelės periodui ( $\Lambda = 10,5 \mu\text{m}$ ) difuzinis gardelės trynimasis yra labai lėtas, o gardelės irimą apsprendžia krūvininkų rekombinacija. Šios kinetikos rodo, kad krūvininkų rekombinacijos sparta HPHT deimantuose koreliuoja su azoto priemaišų koncentracija. Švairiuose nuo azoto deimantuose krūvininkų rekombinacijos trukmė viršijo 2,1 ns, tuo tarpu esant azoto priemaišų kiekiui  $1,3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  krūvininkų rekombinacijos trukmė nukrito iki  $\sim 250 \text{ ps}$ . Krūvininkų rekombinacijos trukmės koreliacija su azoto priemaišų koncentracija

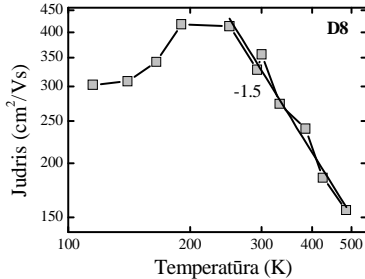
taip pat buvo stebėta ir nehomogeniškame D10B bandinyje.



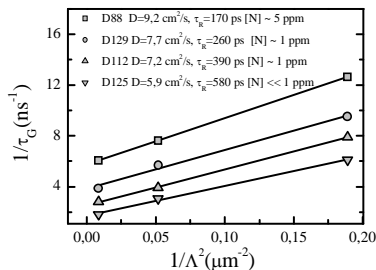
24 pav. ŠIDG kinetikos esant skirtingiems gardelės periodams išmatuotos deimante D8 naudojant juosta-juosta žadinimą (213 nm) (a). Gardelės irimo spartos priklausomybė nuo atvirkštinio gardelės periodo kvadrato naudota krūvininkų difuzijos koeficiento ir rekombinacijos trukmės nustatymui naudojant paviršinį (pilki simboliai) bei tūrinį (juodi kvadratai) žadinimus deimantuose su skirtinga azoto koncentracija [A14].



Norint nustatyti krūvininkų ambipolinius difuzijos koeficientus sintetiniuose deimantuose buvo išmatuotos ŠIDG kinetikos esant skirtingiems gardelės periodams (24a pav.). 24b paveiksle parodytos “kampinės” charakteristikos išmatuotos CVD ir HPHT technologijomis užaugintuose deimantuose, taip pat bandiniuose su skirtingu azoto priemaišų tankiu, naudojant tiek tūrinį, tiek ir paviršinį žadinimus. Nors skyrėsi ir sužadintų krūvininkų tankiai bei defektų nulemta krūvininkų rekombinacijos trukmė, visiems bandiniams buvo gauta apytiksliai vienoda ambipolinės difuzijos koeficiento vertė -  $D_a = 9,7 \pm 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Manome, kad ši vertė yra būdinga monokristaliniam deimantui.



25 pav. Krūvininkų judrio priklausomybė nuo temperatūros HPHT būdu užaugintame deimante.



26 pav. Atvirkštinės gardelės trukmės priklausomybė nuo atvirkštinio gardelės periodo kvadrato naudota krūvininkų difuzijos koeficiento ir rekombinacijos trukmės nustatymui CVD deimantuose. Nustatytos difuzijos koeficiento ir gyvavimo trukmės vertės bei azoto koncentracija bandiniuose nurodytos paveiksle [A14].

ambipolinės ir matuojamasis judris ( $\mu = (N_e + N_h)/(N_e/\mu_p + N_h/\mu_n)$ ) tampa artimesnis elektronų judriui, kuris yra paprastai didesnis už skylių.

Atlikus krūvininkų ambipolinės difuzijos koeficiento matavimus keičiant temperatūrą bei pasinaudojus Einšteino sąryšiu buvo nustatyta krūvininkų judrio priklausomybė nuo temperatūros geriausiame HPHT būdu užaugintame deimante (25 pav.), kuri rodo du dominuojančius krūvininkų sklaidos mechanizmus. Šios priklausomybės polinkis virš 220 K yra -1.5, kas rodo, kad krūvininkų judrį riboja sklaida akustiniais fononais. Teigiamas  $\mu = f(T)$  polinkis žemiau šios temperatūros nulemtas nenustatytos kilmės defektų. Toks pat judrio nuo temperatūros pobūdis buvo nustatytas ir CVD būdu užaugintame monokristaliniame deimante.

Atlikus ŠIDG matavimus polikristaliniuose CVD deimantuose su skirtinga azoto priemaišų koncentracija, nustatyta, kad difuzijos koeficiento vertės (5,9 – 9,2  $\text{cm}^2/\text{s}$ ) yra šiek tiek mažesnes nei monokristaliniuose deimantuose ( $\sim 9,7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ), o gyvavimo trukmės yra žymiai trumpesnės nuo 170 ps iki 580 ps. Polikristaliniuose CVD deimantuose krūvininkų gyvavimo vertės koreliuoja su azoto koncentracija (26 pav.), kas buvo stebėta ir monokristaliniuose HPHT bandiniuose. Visiems tirtiesiems CVD bandiniams buvo nustatytas pastovus krūvininkų difuzijos nuotolis  $L_D \approx 0,5 \mu\text{m}$ , kadangi bandiniams turintiems trumpesnę gyvavimo trukmę, buvo nustatytas didesnis difuzijos koeficientas. Toks dėsningumas stebimas, kai elektronai yra sugaudomi greičiau nei skylės ( $N_e < N_h$ ), tada krūvio transporto sąlygos tampa ne grynai

## Literatūra

- [1] H. J. Eichler, P. Gunter, and D. W. Pohl, (Springer, Berlin, 1986).
- [2] S. Jursenas, S. Miasojedovas, G. Kurilcik, A. Zukauskas, R. Aleksiejunas, T. Malinauskas, M. Sudzius, and K. Jarasiunas, *Acta Physica Polonica A*, **107**, 240 (2005).
- [3] S. K. Mathis, A. E. Romanov, L. F. Chen, G. E. Beltz, W. Pompe, and J. S. Speck, *J. Cryst. Growth*, **231**, 371 (2001).
- [4] A. Dmitriev and A. Oruzhenikov, *J. Appl. Phys.*, **86**, 3241 (1999).
- [5] R. Ziebold, T. Witte, M. Hubner, and R. G. Ulbrich, *Phys. Rev. B*, **61**, 16610 (2000).
- [6] K. Jarasiunas, T. Malinauskas, A. Kadys, R. Aleksiejunas, M. Sudzius, S. Miasojedovas, S. Jursenas, A. Zukauskas, D. Gogova, A. Kakanakova-Georgieva, E. Janzen, H. Larsson, B. Monemar, P. Gibart, and B. Beaumont, *Phys. Status Solidi C*, **2**, 1006 (2005).
- [7] S. Jursenas, N. Kurilcik, G. Kurilcik, A. Zukauskas, P. Prystawko, M. Leszczynski, T. Suski, P. Perlin, I. Grzegory, and S. Porowski, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3776 (2001).
- [8] S. Jursenas, S. Miasojedovas, G. Kurilcik, A. Zukauskas, and P. R. Hageman, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 66 (2003).
- [9] U. Ozgur, Y. Fu, Y. T. Moon, F. Yun, H. Morkoc, and H. O. Everitt, *J. Appl. Phys.*, **97** (2005).
- [10] S. Haffouz, B. Beaumont, P. Venegues, and P. Gibart, *Phys. Status Solidi A*, **176**, 677 (1999).
- [11] P. Venegues, B. Beaumont, S. Haffouz, M. Vaille, and P. Gibart, *J. Cryst. Growth*, **187**, 167 (1998).
- [12] H. Lahreche, P. Venegues, B. Beaumont, and P. Gibart, *J. Cryst. Growth*, **205**, 245 (1999).
- [13] B. Beaumont, J. P. Faurie, E. Aujol, and P. Gibart, in *Proc. NATO ARW on UV solid state light emitters and devices*, edited by M. S. Shur and A. Zukauskas (Kluwer Acad. Publ., 2004), Vol. 144, p. 189.
- [14] K. Kazlauskas, (Vilnius University, Vilnius, 2004), Vol. PhD thesis.
- [15] S. F. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, T. Mukai, and S. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, **88**, 5153 (2000).
- [16] M.-Y. Ryu, E. Kuokstis, C. Q. Chen, J. W. Yang, G. Simin, M. Asif Khan, G. G. Sim, and P. W. Yu, *Solid State Communications*, **126**, 329 (2003).
- [17] F. A. Ponce, S. Srinivasan, A. Bell, L. Geng, R. Liu, M. Stevens, J. Cai, H. Omiya, H. Marui, and S. Tanaka, *Phys. Status Solidi B*, **240**, 273 (2003).
- [18] G. Chen, G. Craven, A. Kim, A. Munkholm, S. Watanabe, A. Camras, W. Gotz, and F. Steranka, *Phys. Status Solidi A*, **2005**, 1086 (2009).
- [19] M. H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Piprek, and Y. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007).
- [20] B. Monemar and B. E. Sernelius, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007).
- [21] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007).
- [22] N. V. Novikov, T. A. Nachalna, S. Ivakhnenko, O. A. Zanevsky, I. S. Belousov, V. G. Malogolovets, G. A. Podzyarei, and L. A. Romanko, *Diamond Relat. Mater.*, **12**, 1990 (2003).
- [23] V. G. Ralchenko, A. A. Smolin, V. I. Konov, K. F. Sergeichev, I. A. Sychov, I. I. Vlasov, V. V. Migulin, S. V. Voronina, and A. V. Khomich, *Diamond Relat. Mater.*, **6**, 417 (1997).

### Mokslinių straipsnių disertacijos tema sąrašas

- [A1] K. Jarasiunas, R. Aleksiejunas, **T. Malinauskas**, V. Gudelis, T. Tamulevicius, S. Tamulevicius, A. Guobiene, A. Usikov, V. Dmitriev, H. J. Gerritsen, "Implementation of diffractive optical element in four-wave mixing scheme for *ex situ* characterization of hydride vapor phase epitaxy-grown GaN layers," Rev. Sci. Instrum. **78**, 033901 (2007).
- [A2] **T. Malinauskas**, S. Nargelas, R. Aleksiejunas, K. Jarasiunas, "Heterodyne detection scheme for light-induced transient grating experiment," Opt. Commun. **281**, 6061-6064 (2008).
- [A3] R. Aleksiejunas, M. Sudzius, **T. Malinauskas**, J. Vaitkus, K. Jarasiunas, S. Sakai, "Determination of free carrier bipolar diffusion coefficient and surface recombination velocity of undoped GaN epilayers," Applied Physics Letters **83** (6), 1157-1159 (2003).
- [A4] S. Jursenas, S. Miasojedovas, G. Kurilcik, A. Zukauskas, R. Aleksiejunas, **T. Malinauskas**, M. Sudzius, K. Jarasiunas, "Transients of carrier recombination and diffusion in highly excited GaN studied by photoluminescence and four-wave mixing techniques," Acta Physica Polonica **107** (2), 240-244 (2005).
- [A5] K. Jarasiunas, R. Aleksiejunas, **T. Malinauskas**, M. Sudzius, E. Frayssinet, B. Beaumont, J.-P. Faurie and P. Gibart, "Characterization of differently grown GaN epilayers by time-resolved four-wave mixing technique", Phys. Status Solidi (a) **202**, 566 (2005).
- [A6] **T. Malinauskas**, R. Aleksiejunas, K. Jarasiunas, P. Gibart, B. Beaumont, A. Kakanakova, E. Janzen, D. Gogova, B. Monemar, and M. Heuken, "All-optical characterization of carrier lifetimes and diffusion lengths in MOCVD-, ELO-, and HVPE-grown GaN", J. Cryst. Growth **300** (1), 223-227 (2007).
- [A7] E. V. Lutsenko, A. L. Gurskii, V. N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, **T. Malinauskas**, K. Jarasiunas, B. Schineller, M. Heuken, "Determination of carrier diffusion length in MOCVD-grown GaN epilayers on sapphire by optical techniques," Physica Status Solidi (c) **3**, No. 6, 1935-1939 (2006).
- [A8] K. Jarašiūnas, **T. Malinauskas**, A. Kadys, R. Aleksiejūnas, M. Sūdžius, S. Miasojedovas, S. Juršėnas, A. Žukauskas, D. Gogova, A. Kakanakova-Georgieva, E. Janzen, H. Larsson, B. Monemar, P. Gibart and B. Beaumont, "Application of picosecond four-wave mixing and photoluminescence techniques for investigation of carrier dynamics in bulk crystals and heterostructures of GaN". Phys. Status Solidi (c) **2**, No. 3, 1006-1009 (2005).
- [A9] **T. Malinauskas**, K. Jarašiūnas, R. Aleksiejūnas, D. Gogova, B. Monemar, B. Beaumont, and P. Gibart, "Contribution of dislocations to carrier recombination and transport in highly excited ELO and HVPE GaN layers", Phys. Status Solidi (b) **243**, No. 7, 1426-1430 (2006).
- [A10] K. Jarasiunas, **T. Malinauskas**, R. Aleksiejunas, B. Monemar, V. Ralchenko, A. Gontar, and E. Ivakin. "Optical characterization of defect-related carrier recombination and transport features in GaN substrates and CVD diamonds, Mat. Sci. Forum **600-603**, 1301-1304 (2009)

- [A11] **T. Malinauskas**, K. Jarasiunas, M. Heuken, F. Scholz, and P. Bruckner, "Diffusion and recombination of degenerate carrier plasma in GaN", *Phys. Status Solidi (c)* **6**, No. S2, S743-S746 (2009).
- [A12] **T. Malinauskas**, K. Jarasiunas, S. Miasojedovas, S. Juršėnas, B. Beaumont, P. Gibart, "Optical monitoring of nonequilibrium carrier lifetime in freestanding GaN by time-resolved four-wave mixing and photoluminescence techniques," *Appl. Phys. Lett.* **88**, 202109 (2006).
- [A13] K. Jarašiūnas, R. Aleksiejūnas, **T. Malinauskas**, M. Sūdžius, S. Miasojedovas, S. Juršėnas, A. Žukauskas, R. Gaska, J. Zhang, M. S. Shur, J. W. Yang, E. Kuokštis, and M.A. Khan, "Carrier diffusion and recombination in highly excited InGaN/GaN heterostructures", *Phys. Status Solidi (a)* **202**, No. 5, 820 (2005).
- [A14] **T. Malinauskas**, K. Jarasiunas, E. Ivakin, V. Ralchenko, A. Gontar, S. Ivakhnenko, "Optical evaluation of carrier lifetime and diffusion length in synthetic diamonds", *Diamond and Relat. Mat.* **17**, 1212-1215 (2008).

#### Konferencijų pranešimų disertacijos tema sąrašas

1. R. Aleksiejūnas, V. Gudelis, M. Sudzius, T. Malinauskas, K. Jarasiunas, Q. Fareed, R. Gaska, M. S. Shur, J. Zhang, J. Yang, E. Kuokštis, and M. A. Khan "Carrier transport and recombination in InGaN/GaN heterostructures, studied by optical four-wave mixing technique". *Int. Conf. on Nitride Semiconductors ICNS-5* (Nara, Japan, 2003).
2. S. Juršėnas, S. Miasojedovas, G. Kurilčik, A. Žukauskas, R. Aleksiejūnas, T. Malinauskas, M. Sūdžius, and K. Jarašiūnas, "Transients of carrier recombination and diffusion in highly excited GaN studied by photoluminescence and four-wave mixing techniques". *Int. Conf. on Ultrafast Processes in Semiconductors UFPS-12* (Vilnius, 2004).
3. K. Jarasiunas, R. Aleksiejūnas, T. Malinauskas, M. Sudzius, E. Frayssinet, B. Beaumont, J.-P. Faurie and P. Gibart, "Characterization of differently grown GaN epilayers by time-resolved four-wave mixing technique". *7<sup>th</sup> Int. Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies EXMATEC* (Montpellier, 2004).
4. K. Jarašiūnas, T. Malinauskas, A. Kadys, R. Aleksiejūnas, M. Sūdžius, S. Miasojedovas, S. Juršėnas, A. Žukauskas, D. Gogova, A. Kakanakova-Georgieva, E. Janzen, H. Larsson, B. Monemar, P. Gibart and B. Beaumont, "Application of picosecond four-wave mixing and photoluminescence techniques for investigation of carrier dynamics in bulk crystals and heterostructures of GaN". *European Materials Society meeting EMRS-2004* (Warsaw, 2004).
5. T. Malinauskas, K. Jarašiūnas "Optical characterization of carrier lifetimes in GaN epilayers by time resolved four-wave mixing and photoluminescence techniques", *XXXII International School on Physics of Semiconducting Compounds* (Poland, Jaszowiec, 2005).
6. T. Malinauskas, K. Jarašiūnas, R. Aleksiejūnas, D. Gogova, B. Monemar, B. Beaumont and P. Gibart "Contribution of dislocations to carrier recombination and

- transport in highly excited ELO and HVPE GaN layers". Int. Conf. on Nitride Semiconductors ICNS-6 (Bremen, Germany, 2005).
7. K. Jarasiunas, T. Malinauskas, and R. Aleksiejunas, "Dislocation-density Dependent Carrier Lifetime and Stimulated Recombination Threshold in GaN", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 24-28, Vienna, Austria, 2006).
  8. T. Malinauskas, K. Jarašiūnas, E. Dimakis and A. Georgakilas, "Nonequilibrium carrier governed nonlinear optical and electrical properties of InGaN alloys", European Workshop on III-Nitrides Semiconductor Materials and Devices, Crete (Greece, September 18-20, 2006).
  9. T. Malinauskas, R. Aleksiejunas, K. Jarasiunas, P. Gibart, B. Beaumont, A. Kakanakova, E. Janzen, D. Gogova, B. Monemar, and M. Heuken, "All-optical characterization of carrier lifetimes and diffusion lengths in MOCVD, ELO, and HVPE grown GaN", First International Symposium on Growth of III-Nitrides, Linköping (Sweden, June 4 - 7, 2006).
  10. T. Malinauskas, K. Jarasiunas, E. Ivakin, V. Ralchenko, A. Gontar, S. Ivakhnenko, "18th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides" "Optical evaluation of carrier lifetime and diffusion length in synthetic diamonds", Berlin, Germany, 9-14 September, 2007.
  11. K. Jarasiunas, T. Malinauskas, R. Aleksiejunas, B. Monemar, V. Ralchenko, A. Gontar, E. Ivakin, "International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2007" "Optical evaluation of carrier lifetime and diffusion length in synthetic diamonds" (Otsu, Japan, October 14 – 19, 2007).
  12. T. Malinauskas, K. Jarašiūnas "Šviesa indukuoto lūžio rodiklio moduliacijos ženklo nustatymas dinaminių gardelių metodu, naudojant heterodininį detektavimą" (Lietuvos nacionalinė fizikų konferencija, Vilnius, Lietuva, birželio 11-13 d. 2007).
  13. T. Malinauskas, K. Jarasiunas, M. Heuken, F. Scholz, P. Bruckner "Diffusion and recombination of degenerate carrier plasma in GaN", Int. Workshop on Nitride semiconductors (October 6 – 10, 2008, Montreux, Switzerland).

## Informacija apie autorių

<b>Vardas Pavardė</b>	<b>Tadas Malinauskas</b>	
<b>Gimimo data ir vieta</b>	1980 m. spalio 7 d., Vilnius, Lietuva	
<b>Adresas</b>	Gulbių 14, Vilnius, Lietuva	
<b>Elektroninis paštas</b>	tadas.malinauskas@ff.vu.lt	
<b>Išsilavinimas</b>	1999 m.	Vilniaus licėjus
	1999-2003 m.	Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas gautas bakalauro laipsnis
	2003-2005 m.	Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas gautas magistro laipsnis
	2005-2009 m.	Vilniaus universitetas doktorantūros studijos
<b>Darbo patirtis</b>	2001– 2005 m.	Vilniaus universitetas, Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, inžinierius
	2005 m. -	Vilniaus universitetas, Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, jaunesnysis mokslo darbuotojas
<b>Specializacija</b>	Puslaidininkų ir jų darinių optinis charakterizavimas šviesa indukuotų dinaminių gardelių, fotoluminescencijos su laikine skyra metodais, krūvininkų dinamikos modeliavimas.	
<b>Stażuotės</b>	2004.08 - 2005.01 Studijos pagal Erasmus programa Švedijos Linčopingo universitete	
<b>Publikacijos</b>	~35 straipsniai (30 žurnaluose, įtrauktuose į ISI duomenų bazę), ~30 pranešimų konferencijose	