

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FTMC PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

PATRIK ŠČAJEV

PLAČIATARPIŲ PUSLAIDININKIŲ FOTOELEKTRINIŲ SAVYBIŲ
OPTINĖ DIAGNOSTIKA SU LAIKINE IR ERDVINE SKYRA

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

Vilnius, 2013

Disertacija rengta Vilniaus universitete Taikomųjų mokslų institute 2009-2013 metais.

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Kęstutis Jarašiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslų krypties taryboje:

Pirmininkas:

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

Nariai:

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

Prof. habil. dr. Gytis Juška (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. Gintaras Valušis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265).

Oponentai:

Prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis (Vilniaus universitetas, 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 viešame gynimo tarybos posėdyje 2013 m. spalio 29 dieną 14 valandą Vilniaus universiteto Mokslinės komunikacijos ir informacijos centro (MKIC) A119 seminaro kambaryje, Saulėtekio al. 5, LT-10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. rugsėjo ... d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bei Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY
CPST SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE

PATRIK ŠČAJEV

INVESTIGATION OF WIDE-BAND-GAP SEMICONDUCTOR
PHOTOELECTRIC PROPERTIES BY USING OPTICAL TECHNIQUES
WITH TEMPORAL AND SPATIAL RESOLUTION

Summary of doctoral thesis

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

Vilnius, 2013

The research has been carried out in 2009–2013 at the Institute of Applied Research, Vilnius University.

Scientific supervisor:

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

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

Chairman:

Prof. habil. dr. Artūras Žukauskas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265).

Members:

Prof. habil. dr. Julius Dudonis (Kaunas University of Technology, Physical sciences, Physics – 02 P, Solid State Physics – P 260).

Prof. habil. dr. Gytis Juška (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. Gintaras Valušis (Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor physics – P 265).

Opponents:

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

Prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Solid State Physics – P 260).

The official defense of the doctoral thesis will be held in the public session of the Vilnius university Defense Council of Physical sciences at 2.00 p. m. on October 29, 2013, in seminar room A119 of SCIC (Scholarly Communication and Information Center), Vilnius University, Saulėtekio al. 5, LT-10222, Vilnius, Lithuania.

The summary of the doctoral thesis has been distributed on September ..., 2013.

The doctoral thesis is available at Vilnius University library and at the library of Center for Physical Sciences and Technology.

Abstract

Silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), and diamond are extremely promising wide band gap semiconductor materials for optoelectronics and high temperature, high power electronics. Therefore their electrical and optical properties are intensively investigated by using standard spectroscopic techniques such as photoluminescence and absorption. On the other hand, study of photoexcited carrier dynamics provides deeper understanding of suitability of those materials for (opto)electronic applications, therefore in addition to standard techniques of photoluminescence spectroscopy, complementary techniques are needed to study defect-related and fundamental properties. Thus, nonlinear time-resolved optical techniques have been developed to study temporal and spatial carrier redistribution, e.g. light induced transient grating (LITG), time-resolved differential transmittivity (TRDT), and differential reflectivity (TRDT).

Main task of the thesis was to gain new knowledge on photoelectrical properties of wide-bandgap semiconductors (SiC, GaN, diamond), applying the existing and developing novel nonlinear optical techniques. Methodological novelty was a complementary use of various techniques for experimental investigation of carrier recombination and diffusion peculiarities in high density plasma. Subsequent numerical modeling was performed to determine the dominant photoelectrical parameters, such as carrier lifetime, diffusion coefficient and diffusion length, and the physical mechanisms determining their dependences on temperature and nonequilibrium carrier density.

The work required to develop a new way for measurement of interband absorption coefficient of bulk SiC and diamond crystals at experimentally used conditions (in a 80-800 K temperature range at 351 and 213 nm excitation). This goal was reached by exploring peculiarities of light diffraction on thin and thick transient gratings.

A new carrier lifetime microscopy setup, based on TRDT technique with a CCD detector (charge coupled device) was developed. It was applied for determination of carrier lifetime spatial distribution in bulk GaN layer and allowed to bridge the structural and electronic properties of the crystal by discriminating processes in defect-free areas and at grain boundaries of the crystallites.

Carrier diffusion measurements in SiC and GaN revealed mechanisms, which lead to reduction and enhancement of bipolar diffusion coefficient, D_a , in high density plasma: decrease of D_a due to bandgap renormalization and its increase at higher

excitations due to degeneracy and hole-phonon interaction screening. In diamonds, much stronger dependence of D_a on excitation (i.e. decrease from 50 cm²/s to 7 cm²/s at 300 K) was explained by carrier-carrier scattering processes and additional impact of exciton, biexciton and electron-hole droplet formation at low temperatures.

In the indirect-gap semiconductors, SiC and diamond, it was found that recombination at low excitations is limited by nonradiative traps (lifetimes up to 700 ns were observed at 300 K) and surface recombination (10^3 - 10^5 cm/s). At high excitations, the decreasing with carrier density recombination rates were measured experimentally in 10-800 K range, while the precise numerical modeling of the nonlinear recombination rates was explored using the determined excitation- and temperature- dependent absorption and diffusion coefficients. Nonlinear recombination in 4H-SiC was dominated by Auger recombination with coefficient $C_0=(5\pm 1)\times 10^{-31}$ cm⁶/s, which at lower excess carrier densities was Coulomb-enhanced up to 10 times, while at higher carrier densities it decreased due to screening of electron-phonon interaction. The unscreened Auger coefficient of SiC was weakly dependent on temperature, which allowed to ascribe it to phonon-assisted one.

In diamond, at high temperatures impact of exciton-assisted Auger process, with 490 meV threshold, was observed. At low temperatures ($T < 150$ K) biexciton and electron-hole droplet formation led to strong lifetime reduction with ~42 meV deactivation threshold. Finally, the lifetime saturated at 1,5 ns in the electron-hole drops.

Comparison of carrier dynamics with photoluminescence measurements revealed that the radiative recombination coefficient B in SiC is carrier density independent, while in direct-bandgap GaN its value decreases with excess carrier density due to screening of electron-phonon interaction and carrier plasma degeneracy, leading to saturation of radiative recombination rate.

Contribution of compensating traps (aluminum in SiC and boron in diamond) to carrier dynamics was studied experimentally by monitoring processes of optically recharged traps as temperature dependent recovery rate and their saturation with excitation. In this way, activation energies E_a and concentrations of these traps, N_T , were determined: E_a of 200 meV and N_T of $\sim 10^{16}$ - 10^{18} cm⁻³ for 3C-SiC and $E_a=340$ meV and $N_T \sim 10^{14}$ - 10^{16} cm⁻³ in diamond. The new method allowed to discriminate free carrier and trap contributions to the LITG and DT decays.

Padėka

Pirmiausia, norėčiau ypatingai padėkoti savo vadovui prof. Kęstučiui Jarašiūnui už sudarytas puikias sąlygas vykdyti įvairių plačiatarpių puslaidininkių tyrimus, reiklumą bei kantrybę. Taip pat dėkoju Puslaidininkinės optoelektronikos skyriaus kolegoms už pagalbą bei geranorišką bendradarbiavimą.

Šį darbą rėmė Lietuvos Valstybinis mokslo ir studijų fondas, Lietuvos mokslo taryba bei tarptautinio bendradarbiavimo projektai.

Ivadas

Silicio karbidas (SiC), galio nitridas (GaN) ir deimantas yra perspektyvūs plačiatarpiai puslaidininkiai, taikomi optoelektronikoje, aukštų temperatūrų bei galių elektronikoje. SiC ir deimantas yra netiesiatarpiai puslaidininkiai, labiau tinkantys elektronikai, tuo tarpu GaN yra tiesiatarpis puslaidininkis ir todėl taipogi svarbus taikymams optoelektronikos technologijose.

Tarp beveik 200 SiC politipų dažniausiai paplitę yra kubinis 3C-SiC bei heksagoniniai 4H- ir 6H-SiC junginiai. Pastarieji du politipai plačiausiai naudojami gaminant lauko ir dvipolius tranzistorius, kurių veikimo supratimui svarbūs tokie elektriniai parametrai, kaip krūvininkų judris, rekombinacijos trukmė bei difuzijos koeficientas. Nors kubinio SiC parametrai (judris, paviršinių būsenu tankis) yra pranašesni nei kitų politipų, jo gamyba yra komplikauta dėl heksagoninių intarpų. Technologiškai perspektyvus jo auginimo būdas ant silicio padėklų yra komplikuotas dėl didelės struktūrinių defektų koncentracijos, atsirandančios dėl gardelių konstantų nesuderinamumo.

GaN sluoksnių defektiškumą taipogi apsprendžia jo nesuderinamumas su padėklo medžiagos gardele ir šiluminio plėtimosi koeficientu, bei tūrinių GaN padėklų nebuvimas. Todėl yra paplitusi GaN heteroepitaksija ant safyro bei 6H-SiC padėklų (gardelių nesutapimai yra 50 ir 4 %, atitinkamai). Jos auginimo metu generuojama didelė struktūrinių defektų koncentracija (ypatingai svarbios yra dislokacijos, kurių tankis siekia 10^{10} cm^{-2}). Defektų buvimas stipriai riboja gaminamų prietaisų veikimą bei veikimo trukmę. Storesnių ir kokybiškesnių GaN sluoksnių auginimui ieškoma pigesnių sprendimų, auginant tūrinius GaN padėklus vandenilio garų fazės epitaksijos (angl. HVPE, hydride vapor phase epitaxy) ir amonoterminiu būdais.

Monokristalinis deimantas pasižymi didžiausiu kietumu, šiluminiu laidumu bei skylių judriu lyginant su kitomis puslaidininkinėmis medžiagomis. Tai daro šią medžiagą patrauklią didelės galios aukštatemperatūrinių elektroninių prietaisų, ultravioleto detektorių, jonizuojančios spinduliuotės daviklių gamyboje. Tačiau deimanto elektronikos vystymasis apribotas seklių legirantų nebuvimu, nepakankamai dideliu kristalų dydžiu bei žema heteroepitaksinių deimantų struktūrine kokybe. Todėl plėtojamos cheminių garų nusodinimo (angl. CVD, chemical vapor deposition) mono- ir

poli-kristalinių deimantų technologijos, taipogi didelio slėgio ir temperatūros (angl. HPHT, high-pressure high-temperature) auginimo būdai, siekiant mažo liekamųjų priemaišų tankio bei tinkamo legiravimo.

Dėl aptartų aukščiau auginimo problemų, lemiančių išaugintų medžiagų ne tik struktūrinės, bet ir elektrinės savybės, reikalingas adekvatus fotoelektrinių savybių charakterizavimas, kuris leistų įvertinti medžiagos tinkamumą prietaisų gamybai bei optimizuoti auginimo procesą. Yra išvystyta daug metodikų ir prietaisų, skirtų tirti SiC, GaN bei deimantų struktūrinę kokybę: elektroninė mikroskopija, atominės jėgos mikroskopija, Rentgeno difrakcija, Ramano spektroskopija. Optinės bei elektrinės savybės yra dažniausiai tiriamos fotoluminescencijos (FL), katoduliuminescencijos, elektroninio pluoštelio srovėmis, lėkio trukmės ir kt. Laikinės skyros metodikos, tokios kaip šviesa indukuotos dinaminės gardelės (DG), diferencinis pralaidumas (DP), diferencinis atspindys (DA), laikinės skyros fotoluminescencija (LKFL) pasižymėjo kaip universaliosios ir neardančiosios puslaidininkinių tyrimo metodikos, kadangi jos duoda tiesioginę informaciją apie nepusiausviriųjų krūvininkų dinamiką bei tokius svarbius puslaidininkio parametrus, kaip krūvininkų gyvavimo trukmė, difuzijos koeficientas bei difuzijos ilgis.

Krūvininkų rekombinacija ir difuzija yra apspręsta medžiagos fundamentinių bei defektinių savybių, todėl medžiagos fotoelektrinių parametrų nustatymas leidžia įvertinti jos kokybę ir atitinkamai optimizuoti auginimo sąlygas. Nedefektinės medžiagos savybės savo ruožtu bus apribotos fundamentiniais procesais, tokiais kaip Ože rekombinacija, sąveika tarp krūvininkų ir fononų. Tiriamose medžiagose galima plati rekombinacijos procesų (spindulinių, nespindulinių, eksitonų ir elektron-skylinės plazmos), sklaidos mechanizmų, bei defektų erdvinio pasiskirstymo (paviršiuje, tūryje) įvairovė.

Skirtingų defektų bei rekombinacijos procesų įtaka medžiagos kokybei gali būti atskirta tik pasitelkiant kelias optines metodikas. Todėl šiame darbe pasirinkti kelių medžiagų - SiC, GaN bei deimantų tyrimai ir pritaikytos įvairios optinės metodikos su laikine ir erdvine skyra. Taipogi sukurtos naujos sugerties koeficiento nustatymo, krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos bei kompensuojančių priemaišų koncentracijos ir aktyvacijos energijos nustatymo metodikos. Kelių charakterizavimo metodų (DG, DP, DA, FL) teikiamos informacijos papildomumas leido iširti sugerties,

krūvininkų difuzijos bei rekombinacijos procesų priklausomybes nuo temperatūros ir krūvininkų tankio. Gilesnės žinios apie sąveikos mechanizmus ir jų sąlygotas parametrų vertes didelio sužadavimo sąlygomis gautos skaitmeniškai modeliuojant generuotų krūvininkų pernašą, rekombinaciją, ir jų sąryšius defektinėse ir „švariose“ terpėse.

Darbo tikslai ir uždaviniai

Šio darbo tikslas yra gauti naujų žinių apie krūvininkų ir eksitonų dinamiką SiC, GaN bei deimanto kristaluose, tam tikslui išplėtoti žinomas bei sukurti naujas optines metodikas, tinkamas patikimai charakterizuoti erdvinį ir laikinį fotosužadintų krūvininkų pasiskirstymą. Visi eksperimentiniai tyrimai atlikti nesąlytiniais optiniais metodais. Eksperimentinės fotoelektrinių procesų priklausomybės nuo krūvininkų tankio bei temperatūros buvo teoriškai paaiškintos skaitmeninio modeliavimo būdu, įvertinant fotosužadavimo sąlygas, kristalų defektiškumą bei galimus rekombinacijos ir pernašos procesų mechanizmus.

Pagrindiniai tikslai

1. Ištirti krūvininkų rekombinacijos bei difuzijos procesus GaN, SiC, bei deimantuose vienfotonio ir dvifotonio sužadavimo atvejais, tam tikslui kontroliuojant erdvinę ir laikinę krūvininkų dinamiką plačiame sužadavimų ir temperatūrų intervale.
2. Išvystyti pažangias eksperimentines metodikas nesąlytiniam plačiatarpių puslaidininkių charakterizavimui naudojant optines žadinimo-zondavimo metodikas su plačia laikine (nuo ps iki ms) bei kelių mikrometrų erdvine skyra, panaudojant tam tikslui skirtingus lūžio rodiklio ir sugerties koeficiento moduliacijos mechanizmus. Sukurti tarpjuostinės sugerties koeficiento matavimo, krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos bei kompensuojančių priemonių parametrų nustatymo metodikas.
3. Sumodeliuoti nuo krūvininkų tankio ir temperatūros priklausančius difuzijos koeficientus, tiesines bei netiesines rekombinacijos spartas, aprašančias vienu metu vykstančius paviršinės, tūrinės, tiesinės bei netiesinės rekombinacijos procesus GaN, SiC ir deimanto tūriniuose kristaluose.

Darbo naujumas ir svarba

Nors yra gaminama nemažai komercinių elektroninių prietaisų, veikiančių SiC, GaN bei deimanto pagrindu, susidomėjimas pastarosiomis medžiagomis nuolat didėja. Be to nepusiausvirieji procesai, vykstantys šiuose prietaisuose, yra menkai išanalizuoti bei ištirti, nes tyrimams taikomas ribotas metodikų kiekis.

Įvairių optinių charakterizavimo metodikų (šviesa indukuotos dinaminės gardelės, diferencinis pralaidumas, diferencinis atspindys, fotoluminescencija) papildomumas bei aukštos kokybės medžiagų bandiniai (stori sluoksniai bei tūriniai kristalai, užauginti įvairiomis technologijomis), gauti iš pažangių mokslo centrų bei pramonės įmonių, sudarė tinkamas sąlygas darbe numatytoms užduotims atlikti. Be to, tam tikslui buvo sukurta keletas naujų optinių metodikų: sugerties koeficiento nustatymo, krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos bei kompensuojančių priemaišų koncentracijos ir aktyvacijos energijos nustatymo metodikos.

Krūvininkų tankis ir temperatūra yra pagrindiniai parametrai, nusakantys elektroninių prietaisų veikimą. Todėl šitie parametrai buvo keičiami labai plačiose ribose: krūvininkų tankis $10^{15} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ intervale, o temperatūra – 80 - 800 K intervale. Platus krūvininkų tankio intervalas pasiektas, naudojant kombinuotą vienfotonį ir dvifotonį sužadimą. Tikslus sužadintų krūvininkų tankio profilis buvo apskaičiuotas, skaitmeninei duomenų analizei panaudojus tarpjuostinės sugerties koeficientų priklausomybes nuo temperatūros ir sužadavimo. Vienfotoniai sugerties koeficientai ir jų priklausomybės tūriniuose kristaluose buvo nustatyti panaudojus naują DG metodo modifikaciją, pagrįstą difrakcijos efektyvumo asimetriškumu nuo gardelių tarpiniame režime tarp Brego ir Ramana-Natho. Tuo tarpu dvifotonių sugerties koeficientų nustatymas buvo paremtas difrakcijos efektyvumo verčių kalibravimu.

Gera laikinė skyra (iki 10 ps) bei platus (iki 200 μs) vėlinimo diapazonas buvo pasiekti, panaudojus kombinuotą elektrinį bei optinį zondo vėlinimą. Tai leido ištirti greitus bei lėtus rekombinacijos ir difuzijos procesus bei jų priklausomybes nuo sužadavimo ir temperatūros. Iki šiol, lėtų rekombinacijos procesų tyrimai ir jų palyginimas su difuzijos procesais GaN ir SiC nebuvo atlikti. Be to, gyvavimo trukmės bei FL efektyvumo priklausomybės nuo sužadavimo GaN kristale leido stebėti spindulinės rekombinacijos spartos įsisotinimą. Tuo tarpu FL efektyvumo kalibracija 3C-

SiC leido nustatyti nuo krūvininkų tankio nepriklausantį spindulinės rekombinacijos koeficientą.

Krūvininkų gyvavimo trukmių palyginimas polikristaliniame deimante su skirtingais kristalitų dydžiais buvo atliktas tūryje bei paviršinėse srityse DP metodu. Gyvavimo trukmės erdvinio pasiskirstymo GaN tyrimui buvo panaudota nauja metodika su laikine ir erdvine skyra – gyvavimo trukmės mikroskopija, kuri kartu su atvirkštine difuzijos koeficiento ir gyvavimo trukmės koreliacija tiesiogiai patvirtino, jog dominuoja nespindulinė rekombinacija tarpkristalitinėse ribose.

Stipri gyvavimo trukmės ir difuzijos koeficiento priklausomybė nuo krūvininkų tankio ir temperatūros SiC politipuose bei deimantų kristaluose suteikė naujų fundamentinių žinių apie Ože rekombinacijos ypatumus bei eksitonų, elektronų, skylių bei fononų tarpusavio sąveikos procesus, eksitonų difuziją bei elektron-skylinių lašų susidarymą deimante. Stebėtas Ože koeficiento sustiprinimas dėka kuloninės sąveikos bei jo susilpninimas dėl ekranavimo.

Kompensuojančių defektų koncentracija bei jų aktyvacijos energija buvo nustatyti nauju DP metodu, paremtu šviesa pakeistos defektų krūvio būsenos, palydimos sugerties pokyčiu bei defektų relaksacijos trukmės temperatūrinės priklausomybės matavimais. Kompensuojančių akceptorinių fotoneutralizacija paaiškino stipresnę infraraudonojo zondo sugertį nei laisvakrūvė sugertis, o erdvinis defekto perelektrinimas sukėlė stiprų difuzijos koeficiento sumažėjimą, kai sužadintais mažesniais už minėtųjų akceptorinių koncentracijas.

Ginamieji teiginiai

1. Keleriopas dvipolio difuzijos koeficiento sumažėjimas SiC bei GaN, kai krūvininkų tankis viršija 10^{17} - 10^{18} cm^{-3} (priklausomai nuo T) yra nulemtas juostų renormalizacijos, o esant dideliems krūvininkų tankiams (10^{18} - 10^{19} cm^{-3}) difuzijos koeficientas didėja dėl krūvininkų plazmos išsigimimo bei krūvininkų ir fononų tarpusavio sąveikos ekranavimo.
2. Deimante dvipolio difuzijos koeficiento mažėjimas (kai $\Delta N > \sim 10^{15}$ cm^{-3}) apspręstas eksitonų (su 6,5 kartus mažesniu difuzijos koeficientu) formavimusi, elektron-skylinės sklaidos, bieksitonų bei elektron-skylinių lašų formavimusi (kai $T < 150$ K). Tuo tarpu difuzijos koeficiento didėjimas kai $\Delta N > \sim 10^{19}$ cm^{-3} apspręstas kuloninės sąveikos ekranavimu bei krūvininkų plazmos išsigimimu.
3. Nespindulinės rekombinacijos trukmė GaN sluoksniuose su maža dislokacijų koncentracija yra 0.4-60 ns intervale. Ji nulemta krūvininkų difuzinės pernašos ir rekombinacijos tarpkristalitinėse ribose. Tuo tarpu 3C-SiC, 4H-SiC bei mono- ir poli- kristaliniuose deimantuose tiesinė rekombinacijos sparta apspręsta taškiniais defektais.
4. Netiesinė Ože rekombinacija 4H-SiC vyksta dalyvaujant fononams ir yra sustiprinama kuloniškai esant mažiems sužadanimams ($\Delta N < 5 \times 10^{18}$ cm^{-3}) ir susilpninama dėl fononų ir krūvininkų sąveikos ekranavimo esant dideliems sužadanimams ($\Delta N > 10^{19}$ cm^{-3}).
5. Kompensuojančių akceptorinių priemaišų koncentracija 3C-SiC ir deimanto puslaidininkiuose gali būti nustatyta optinio žadinimo-zondavimo būdu, panaudojus priemaišų pilną fotoneutralizaciją, ir stebint jų fotojonizacijos sąlygotos sugerties įsotinimą zondojuančiu pluošteliu. Aliuminio (3C-SiC) ir boro (deimante) priemaišų aktyvacijos energija buvo nustatyta naudojant perkrautų priemaišų atsistatymo trukmės temperatūrinės priklausomybes.

Disertacijos santrauka

Disertaciją sudaro šeši skyriai.

1 Skyrius. SiC, GaN bei deimanto savybės

Šiame skyriuje aprašomos pagrindinės plačiatarpių puslaidininkų savybės, tokios kaip kristalinė struktūra, juostinė struktūra, efektinės masės, būsenų tankiai. Jame taip pat aptariami darbe nagrinėjami medžiagos parametrai: tarpjuostiniai ir dvifotoniai sugerties koeficientai, krūvininkų judris, difuzijos koeficientas bei rekombinacijos procesai. Be to apžvelgiamos publikacijos apie krūvininkų dinamiką SiC, GaN bei deimantuose.

2 Skyrius. Bandiniai ir eksperimentinės optinės metodikos

Antrame skyriuje pateikiama išsami informacija apie tirtus bandinius bei darbe naudotas eksperimentines metodikas. Pateikiamas sugrupuotas SiC, GaN bei deimanto bandinių sąrašas. Čia aprašytos standartinės metodikos, tokios kaip šviesa indukuotos dinaminės gardelės (DG) [1], diferencinis atspindys (DA) [2], diferencinis pralaidumas (DP) [3] bei fotoluminescencija (FL) [4]. Be to pateikiamas naujų tarpjuostinės sugerties koeficiento matavimo bei krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos metodų aprašai.

Dinaminės gardelės šiame darbe pritaikytos krūvininkų difuzijos tyrimams. **DG eksperimentinė schema parodyta 2.1 pav.** Du susikertantys spinduliai, kurių bangos ilgis λ_3 , bandinyje sukuria interferencinį lauką, kurio periodiškumas priklauso nuo kampo tarp jų, Θ . Sukurtos dinaminės gardelės periodas aprašomas tokiu sąryšiu:

$$\Lambda = \lambda_3 / (2 \sin (\Theta / 2)). \quad (2.1)$$

Atitinkamai yra moduluotas ir krūvininkų tankis, kuris sukuria lūžio rodiklio moduliaciją. Savo ruožtu zondojuantis spindulys nuskaityto šią dinaminę gardelę. Sugeneruoto krūvininkų tankio moduliacija aprašoma tokiu sąryšiu:

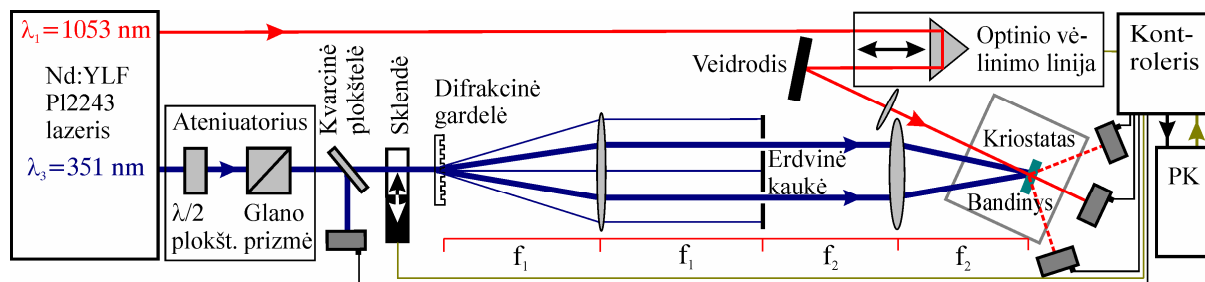
$$\Delta N(x) = \alpha I_0 (1 + \cos(2\pi x / \Lambda)) / h\nu = \Delta N_0 (1 + \cos(2\pi x / \Lambda)). \quad (2.2)$$

Čia $I_0 = (1-R)I_{inc}$ yra sužadavimo srautas bandinyje, α , R yra sugerties ir atspindžio koeficientai naudotiems bangos ilgiams su kvantu $h\nu$; I_{inc} yra kritęs į bandinį sužadavimo srautas ir $\Delta N_0 = \alpha I_0 / h\nu$ yra nepusiausvirųjų elektron-skylinių porų tankis ties paviršiumi neužilgo po sužadavimo. Vidutinis jų tankis aprašomas $\Delta N_{av} = \Delta N_0 / 2$ sąryšiu [5].

Sprendžiant krūvinų dinamikos tolydumo lygtį gauta tokia laikinė difrakcijos efektyvumo išraiška:

$$\eta(t) = \eta_{t=0} \exp(-2t/\tau_G), \quad \frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_D}, \quad \frac{1}{\tau_D} = \frac{4\pi^2 D}{\Lambda^2}. \quad (2.3)$$

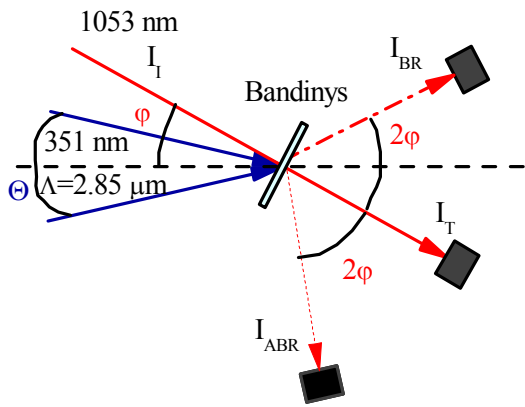
Čia τ_G yra gardelės irimo trukmė, kuri priklauso nuo gardelės periodo Λ , τ_R yra krūvinų gyvavimo trukmė, τ_D yra gardelės difuzinio irimo trukmė, apspręsta krūvinų dvipoliu difuzijos koeficientu D . Išmatavus gardelių irimo laikus keliems gardelės periodams, nustatomi difuzijos koeficientas ir gyvavimo trukmė.



2.1 pav. DG eksperimentinė schema. [P11]

Eksperimentinė DG schema parodyta 2.1 pav. Dinaminė difrakcinė gardelė bandinyje buvo užrašoma 8 ps impulso trukmės sinchronizuotų modų 10 Hz dažnio Nd:YLF lazerio pluoštais, kurie praeidavo f_1 ir f_2 židinio lęšius ir sudarydavo bandinyje interferencinį lauką. Tai pat buvo naudotas Nd:YAG lazeris, kuris pasižymi ilgesne impulso trukme – 25 ps, ir šiek tiek skirtingu spinduliuotės bangos ilgiu (fundamentinė harmonika – 1053 nm). Sužadimui naudotos trečia (351 nm) arba penkta (213 nm) lazerio harmonikos. Dinaminė gardelė zonduojama pirmos harmonikos (1053/1064 nm) impulsais, užvėlintais iki ~ 4 ns. Visos tirtos medžiagos yra skaidrios šiam bangos ilgiui, todėl zonduojantis pluoštelis (zondas) bandinyje silpnai sugeriamas ir difraguoja nuo viso dinaminės difrakcinės gardelės storio. Difragavusių ir praėjusių pluoštelių intensyvumai registruojami Si fotodetektoriais. Žadinimo spindulio diametras buvo kelis kartus didesnis nei zondo. Sužadimui srautas buvo reguliuotas atenuatoriumi, kuris sudarytas iš pusės bangos ilgio fazinės plokštelės ir Glano prizmės. Tai leido matuoti krūvinų dinamiką plačiame sužadimų intervale ir esant skirtingoms temperatūroms T . Pastaruoju atveju bandinys buvo talpinamas uždaro ciklo helio kriostate ($T=10-300$ K) arba azotiniame kriostate ($T=80-800$ K).

Sugerties koeficiento matavimas DG metodu remiasi anti-Breginės (ABR) ir Breginės (BR) difrakcijos eilių intensyvumų santykio priklausomumu nuo dinaminės gardelės santykinio storio, kuris aprašomas $Q = 2\pi\lambda_1/n_1\Lambda^2\alpha$ parametru, kur α yra sugerties koeficientas sužadavimo bangos ilgiui, λ_1 ir n_1 yra zondo bangos ilgis ir medžiagos lūžio rodiklis, atitinkamai. Gardelės yra plonos (Ramano-Natho) kai $Q \ll 1$, ir storos (Brego), kai $Q \gg 1$. Šiais kraštutiniais atvejais stebimi du vienodo intensyvumo BR ir ABR difrakciniai pluošteliai (+1 ir -1 difrakcinės eilės) arba tik viena BR eilė, atitinkamai. Tarpiniu atveju (kai gardelė nei plona nei stora) difrakcijos efektyvumas ABR difrakcijos eilėje priklauso nuo parametro Q . Išmatuotas ABR eilės intensyvumas atžvilgiu nuo gardelės storio nepriklausančios Breginės eilės intensyvumo leidžia nustatyti gardelės storį (sugerties koeficientą). Eksperimento schema parodyta 2.1 pav.



2.2 pav. Sugerties koeficiento matavimo DG metodu eksperimentinė schema. Bandinys talpinamas statmenai zondui, kad atspindys būtų vienodas abiemis difragavusiems pluošteliams. [P11]

esant 351 nm ir 213 nm sužadanimams):

$$\frac{I_{ABR}}{I_{BR}} = 1 / \left[1 + \left(\frac{2\pi\lambda_1}{n_1\Lambda^2\alpha[1-4\phi_1^2]} \right)^2 \right] = \frac{1}{1+Q^2}. \quad (2.4)$$

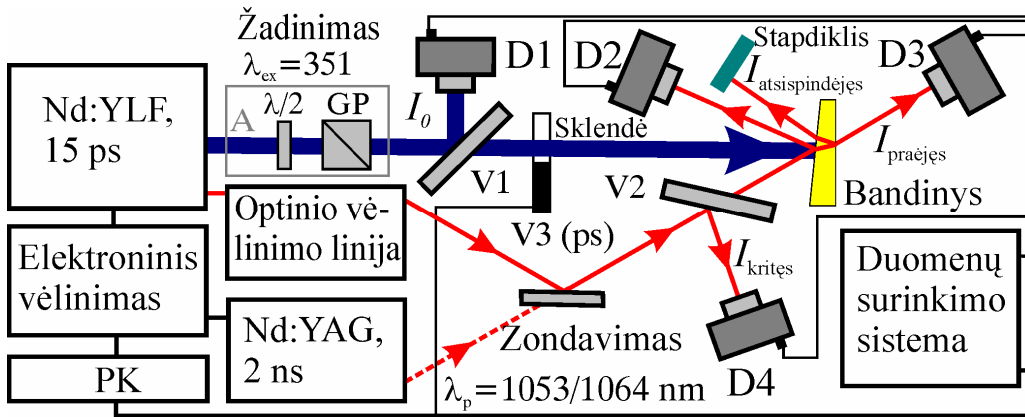
Diferencinio pralaidumo (DP) ir diferencinio atspindžio (DA) kombinuotoji schema parodyta 2.3 pav. Diferencinio pralaidumo kinetikos buvo naudotos krūvininkų gyvavimo trukmių τ_R nustatymui esant skirtingiems sužadanimams ir temperatūroms. DP kinetika aprašoma (2.5a) sąryšiu, kuriame $\sigma_{eh} = \sigma_e + \sigma_h$ yra laisvakrūvės sugerties (LS)

skerspjūvis, susidedantis iš elektronų (σ_e) ir skylių (σ_h) sugerties skerspjūvių [3]; Θ yra zondo kritimo kampas, n_p lūžio rodiklis jo bangos ilgiui. Diferencinio atspindžio (DA) kinetikos aprašomos (2.5b) sąryšiu. Jos rodo krūvininkų relaksaciją arti bandinio paviršiaus (gylyje $d_{obs} \sim \lambda_p/4\pi n_0$ [2]).

$$DP(t) = \ln\left(\frac{T_0}{T(t)}\right) - \ln\left(\frac{1-R_0}{1-R(t)}\right) = \frac{\sigma_{eh} \int_0^d \Delta N(z,t) dz}{\cos(\arcsin[n_p \sin(\Theta)])}, \quad (2.5a)$$

$$DA(t) = \frac{R_0 - R(t)}{R_0} = \frac{4n_p \cos(\Theta)}{(n_p^2 - 1)[n_p^2 - \sin^2(\Theta)]^{1/2}} n_{eh} \Delta N(z = d_{obs}, t). \quad (2.5b)$$

Nuliniam užvėlinimui ($t=0$) integralas (2.5a) begaliniam bandiniui yra $\sigma_{eh} I_0 / h\nu$ DP atveju o DA atveju $DA(t=0) = 4n_{eh} \Delta N(z = d_{obs}, t=0) / (n_p^2 - 1)$, kai $\Theta \sim 0^\circ$ (2.5b). Vidutinis sužadintų krūvininkų tankis neužilgo po sužadavimo yra $\Delta N_{av} = \Delta N_0/2$ esant vienfotoniam ir $\Delta N_{av} = \Delta N_{02}/(1+bdI_0)$ esant dvifotoniam sužadanimams, atitinkamai. Čia $\Delta N_{02} = bI_0^2/(2h\nu_L)$, $b = \beta/(1,25\tau_L)$, kur β ir τ_L yra dvifotonės sugerties koeficientas bei sužadinančio lazerio impulso trukmė $1/e$ aukštyje, atitinkamai.

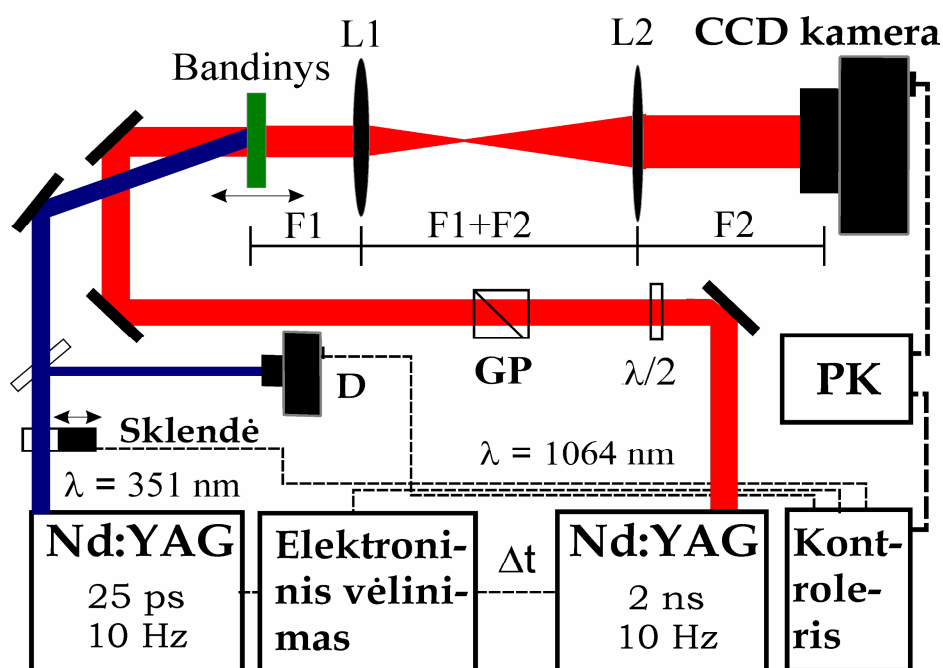


2.3 pav. Kombinuoji DP ir DA experimentinė schema. [Pagal P1,P2]

Sužadimui buvo naudotos įvairios Nd:YLF (Nd:YAG) lazerių harmonikos: $\lambda_{ex} = 351$ (355, 266, 213) nm. Optiškai vėlintas 15 ps trukmės 1053 nm zondas buvo naudotas stebėti greitas DP ir DA relaksacijos kreives (iki 4 ns, su ~ 10 ps laikine skyra). Tuo tarpu, elektroniškai vėlinamas 2 ns trukmės 1064 nm bangos ilgio impulsas (iš diodiškai kaupiamo Nd:YAG lazerio, sinchronizuoto pikosekundinio lazerio elektroniškai užvėlintu impulsu) buvo naudotas stebėti lėtas relaksacijos DP komponentes (su ~ 2 ns laikine skyra). Atspindžio/pralaidumo koeficientai buvo matuoti D2 – D4 detektorių

pagalba esant skirtingiems užvėlinimams, t , be sužadavimo: $T_0 = I_{\text{praėjęs0}} / I_{\text{kritęs}}$, $R_0 = I_{\text{atsispindėjęs0}} / I_{\text{kritęs}}$ (kai sklendė uždaryta) ir esant sužadimui: $T(t) = I_{\text{praėjęs}(t)} / I_{\text{kritęs}}$, $R(t) = I_{\text{atsispindėjęs}(t)} / I_{\text{kritęs}}$ (kai sklendė atidaryta). Kiekvienam laiko taškui duomenys buvo filtruoti pagal sužadavimo srautą, I_0 , kalibruojamą pagal D1 detektorių.

Krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos schema parodyta 2.4 pav. Ši schema remiasi laisvagrūvės sugerties principu. Joje pikosekundinis Nd:YAG lazeris generuoja krūvininkus $\sim 1 \text{ mm}^2$ plotelyje, o zonduojama kolimuotu didesnio diametro nanosekundinio Ekspla NL303G lazerio pluošteliu. Diferencinio pralaidumo erdvinis pasiskirstymas užrašomas CCD kameroje (12 bit Thorlabs BC106-UV su $6,5 \text{ }\mu\text{m}$ taško dydžiu). Kameros nuskaitymas elektroniškai vėlinamas kartu su nanosekundiniu lazeriu tuo pačiu vėlinimo generatoriumi kaip ir kombinuotoje DP ir DA schemeje. Naudotas teleskopas leido gauti $\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ erdvinę skyrą. Kadangi prieš kamerą naudotas 20 dB infraraudonosios spinduliuotės filtras, tai sistema veikė normalaus apšvietimo sąlygomis. DP vaizdas pasirinktam užvėlinimui buvo gaunamas per ~ 40 sekundžių, o gyvavimo trukmių žemėlapis – per 10 minučių.



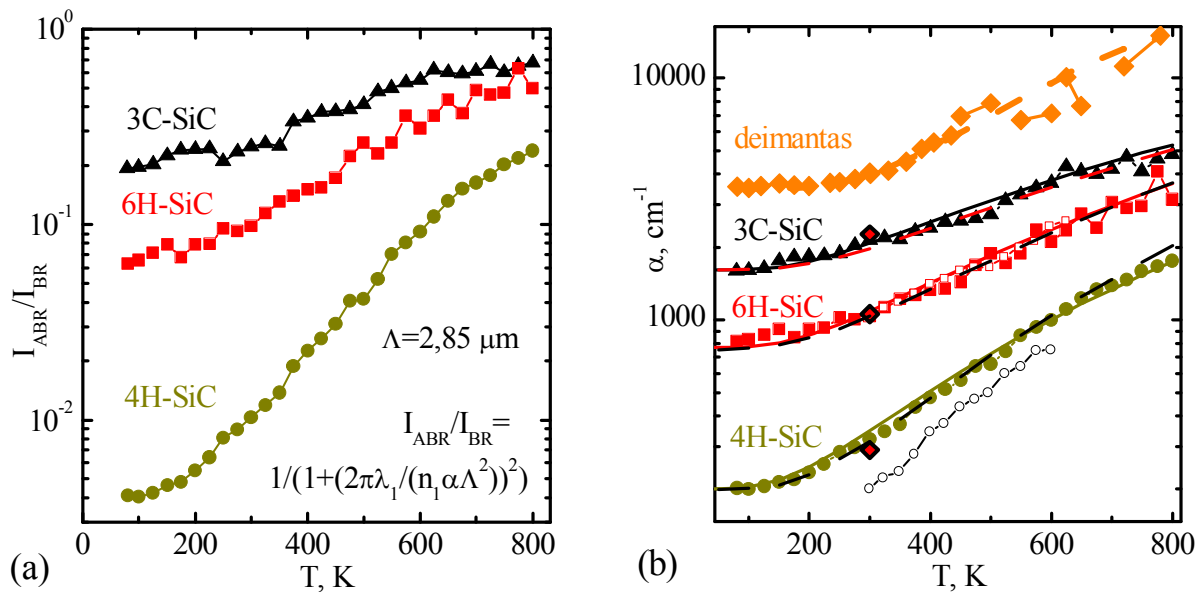
2.4 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės mikroskopijos schema. [P25]

Taipogi šiame skyriuje aprašytos ir **laikinės bei spektrinės skyros fotoluminescencijos (FL)** metodikos. Jos panaudotos spindulinės rekombinacijos spartos, priklausiančios nuo krūvininkų tankio, nustatymui 3C-SiC bei GaN medžiagose.

3 Skyrius. Krūvininkų generacijos ir sugerties mechanizmai

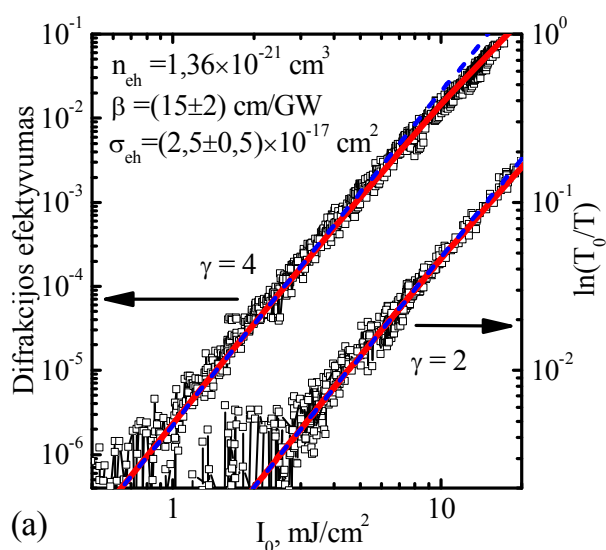
Norint nustatyti tikslias gyvavimo trukmių priklausomybes nuo sužadintų krūvininkų koncentracijos, ΔN , ir temperatūros, reikalingos absoliutinės ΔN vertės, todėl šiame skyriuje nustatomi vienfotonės ir dvifotonės sugerties koeficientai bei jų temperatūrinės priklausomybės. Taipogi nustatomi nepusiausviriųjų krūvininkų tankio, ΔN , ir lūžio rodiklio pokyčio, Δn , bei laisvakrūvės sugerties koeficientų, $\Delta\alpha$, sąryšiai: $\Delta n = n_{eh}\Delta N$ ir $\Delta\alpha = \sigma_{eh}\Delta N$.

Paveiksle 3.1 parodyti I_{ABR}/I_{BR} santykių temperatūrinės priklausomybės 3C-, 4H- bei 6H- SiC politipuose. Kaip matyti, šis santykis nuo temperatūros kinta stipriausiai 4H-SiC, kadangi šiame politipe tarpjuostinė sugertis yra silpniausia. Todėl energijos tarpo mažėjimas ir fononų tankio didėjimas kylant temperatūrai sąlygoja stiprų sugerties koeficiento kitimą ir atitinkamai gardelė „plonėja“ (sužadavimo gylis mažėja). Remiantis sąryšiu (2.4) buvo nustatyti $\alpha(T)$ trijuose SiC politipuose ir deimante (3.1b pav.).



3.1 pav. Temperatūrinės I_{ABR}/I_{BR} santykio priklausomybės SiC politipuose (a) bei nustatytieji sugerties koeficientai SiC esant 351 nm ir deimante esant 213 nm (b) sužadimams, atitinkamai. SiC naudotos Passlerio [6] ir Debajaus draustinio energijos tarpo aproksimacijos. Jos parodytos ištisinėmis bei brūkšniuotomis linijomis, atitinkamai. Žinomi duomenys esant 351 nm [7] ir 355 nm [8] sužadimams parodyti rombais (300 K) ir taškais (4H- ir 6H-SiC, 300-600 K). [Pagal P11,K26]

Paveiksle 3.2 parodytos atitinkamos difrakcijos efektyvumo ir laisvagrūvės sugerties priklausomybės nuo sužadavimo srauto. Jos leido nustatyti GaN dvifotonį sugerties koeficientą (naudojant suskaičiuotą $n_{eh}=1,36\times 10^{-21} \text{ cm}^3$ vertę) $\beta=15 \text{ cm/GW}$, bei laisvagrūvį sugerties skerspjūvį $\sigma_{eh}=2,5\times 10^{-17} \text{ cm}^2$ esant 527 nm žadinimui ir 1053 zondavimui. Panašūs tyrimai atlikti ir deimantuose esant 351 nm dvifotoniam sužadimui ($n_{eh}=1,1\times 10^{-21} \text{ cm}^3$), gauti $\beta=(0,37\pm 0,07) \text{ cm/GW}$ ir $\sigma_{eh}=(1,7\pm 0,03)\times 10^{-17} \text{ cm}^2$ koeficientai. Dvifotonų koeficientų vertės GaN ir deimante nuo temperatūros nepriklausė paklaidų ribose. Diferencinio atspindžio sotis GaN esant 355 nm sužadimui



3.2 pav. Difrakcijos efektyvumo, η , ir diferencinio pralaidumo, DP, priklausomybės nuo sužadavimo srauto, I_0 , GaN esant dvifotoniam sužadimui. γ yra kreivių polinkiai log-log skalėje: numatytieji ($\gamma = 2$ ir 4, brūkšniuotosios linijos) ir eksperimentiniai ($\gamma_{exp} < \gamma$, ištisinės linijos). [P12,P14]

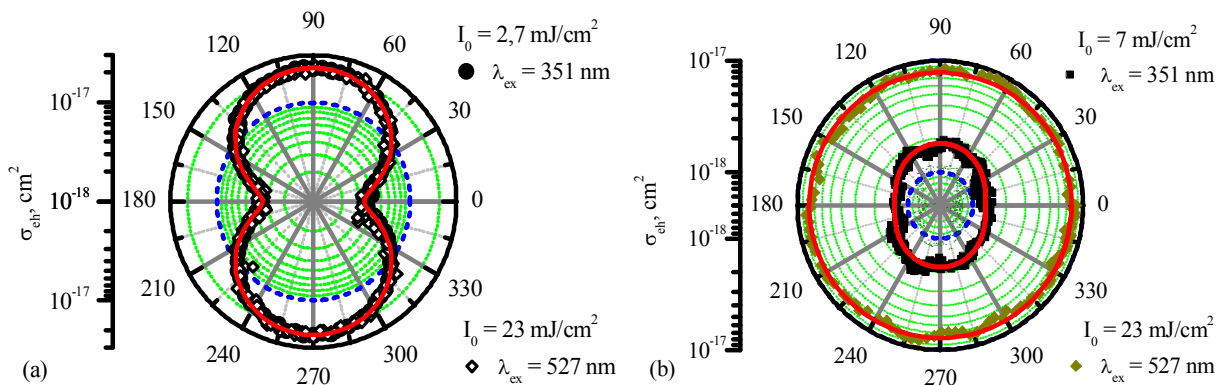
vertės esant žinomiems sužadimams leido taipogi nustatyti n_{eh} vertes, kurios gerai sutapo su teoriškai apskaičiuotomis pagal Drude modelį.

Laisvagrūvės sugerties skerspjūvio priklausomybės nuo zondo poliarizacijos esant stipraus ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ir silpno ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) sužadavimo sąlygomis GaN parodytos 3.3 pav. Esant 1053 nm zondui, nepriklausomai nuo krūvininkų tankio, sugerties anizotropija yra $S = \sigma_{\perp} / \sigma_{\parallel} = 6,5$. Tai gali būti paaiškinta sugertimi tarp valentinės juostos pajuosčių. Esant 527 nm zondui ir silpniems sužadimams anizotropija išnyksta (tas gali būti paaiškinta

leido suskaičiuoti tikslų sužadintų krūvininkų tankio profilį.

Laisvagrūvės sugerties koeficientų vertės buvo nustatytos iš DP matavimų 300 K esant 351 nm sužadimui: $\sigma_{eh}=5,1\times 10^{-18} \text{ cm}^2$; $1,0\times 10^{-17} \text{ cm}^2$; $1,0\times 10^{-17} \text{ cm}^2$; $2,5\times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC bei GaN, atitinkamai. Šitie skerspjūviai SiC ir deimante didėjo su temperatūra dėl stiprėjančios krūvininkų sąveikos su akustiniais bei optiniais fononais. Tuo tarpu GaN σ_{eh} beveik nekito dėl dominuojančios sąveikos su poliniais optiniais fononais. Diferencinio atspindžio ir difrakcijos efektyvumo

izotropine tiesiogine sugertimi tarp laidumo juostos pajuosčių), o stipriems sužadiniams sugertis susilpnėja atskleidama skylių netiesioginės [9] sugerties anizotropiją su $S = 2,4$.



3.3 pav. GaN lasvkrūvės sugerties skerspjūvio polarizacinės priklausomybės 1053 nm zondui esant didelio (351 nm) ir mažo (527 nm) sužadiniimo sąlygoms (a) ir atitinkamos priklausomybės 527 nm zondui (b). [P14]

4 Skyrius. Krūvininkų difuzijos koeficientas ir judris

Šiame skyriuje aprašomi krūvininkų difuzijos koeficiento ir judrio priklausomybės nuo temperatūros ir sužadiniimo 3C-SiC, 4H-SiC, GaN bei deimantuose. Pateikiamos atitinkamos jų aproksimacijos remiantis krūvininkų sklaidos mechanizmais.

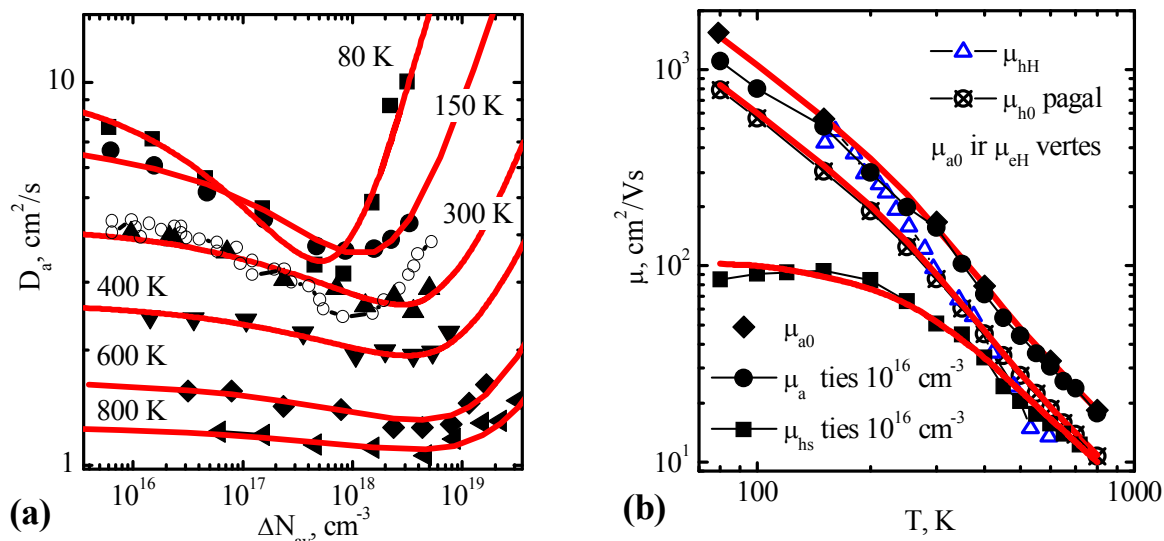
SiC. Difuzijos koeficiento priklausomybė nuo krūvininkų tankio buvo aprašyta analitine $D_a(T, \Delta N)$ formule [10]:

$$D_a(T, \Delta N) = D_{a0}(T) \left[\left(1 + a_1(T) \Delta N / 10^{18} \right)^{2/3} - a_2(T) (\Delta N / 10^{18})^{1/3} \right]. \quad (4.1)$$

Joje pirmas narys aprašo juostų renormalizaciją, o antras išsigimimą. Čia $D_{a0}(T)$ yra mažo sužadiniimo fononiškai apribotas difuzijos koeficientas. D_{a0} , a_1 , ir a_2 yra tapatinimo parametrai. Ši aproksimacija kartu su eksperimentiniais duomenimis $d = 160 \mu\text{m}$ storio 4H-SiC sluoksnyje parodyta 4.1 pav. Nustatytieji koeficientai a_1 ir a_2 mažėjo nuo temperatūros dėl mažėjančios juostų renormalizacijos ir didėjančio būsenų tankio.

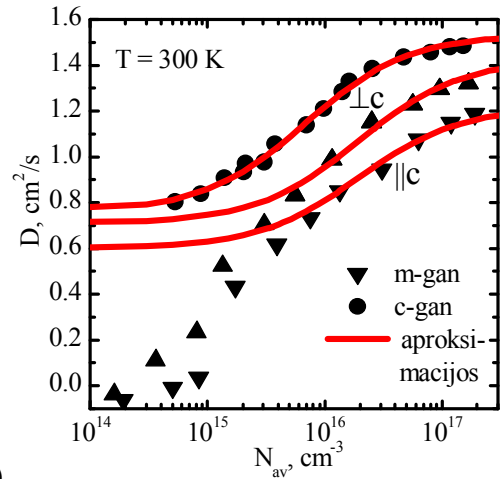
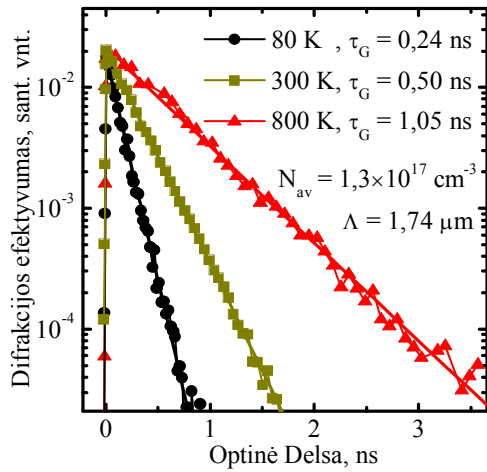
Žemo sužadiniimo difuzijos koeficientas aprašytas $D_{a0} = 2D_e D_h / (D_e + D_h)$ sąryšiu, kur D_e ir D_h yra elektronų ir skylių difuzijos koeficientai, atitinkamai. Paskirieji difuzijos koeficientai gali būti suskaičiuoti iš atitinkamų judrių [11] pagal sąryšius $D_i = \mu_i kT / e$, kur $i = e, h$. Todėl kombinuojant nustatytas $D_{a0}(T)$ vertes su elektronų Holo judriu $\mu_{e0} = \mu_{eH}$ [12], nustatytas skylių judris $\mu_{h0}(T)$ tirtame sluoksnyje (4.1b pav.). Žemo sužadiniimo judris buvo aprašytas supaprastintu $1/\mu_{i0} = 1/\mu_{OPi} + 1/\mu_{ACi}$ sąryšiu, kur μ_{OPi}

$=OP_i \times [\exp(E_{ph}/kT) - 1]^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ yra optinių fononų sklaidos narys, $\mu_{AC} = AC_i \times (T[\text{K}])^{-1,5}$ cm^2/Vs yra akustinių fononų sklaidos narys o $E_{ph} = 120 \text{ meV}$ yra fonono energija. Tapatinimo parametrai $i=a,e,h$ atvejams yra atitinkamai: $OP_i=6,5; 18,5; 3,9$ ir $AC_i=1,05; 7,8; 0,6 \times 10^6$ (žiūrėti kreivės 4.1b pav.). Gauta apytikslė lygybė $\mu_a \approx 1,8\mu_h$.



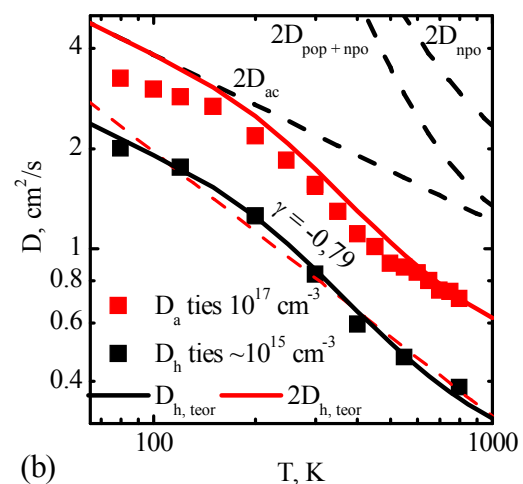
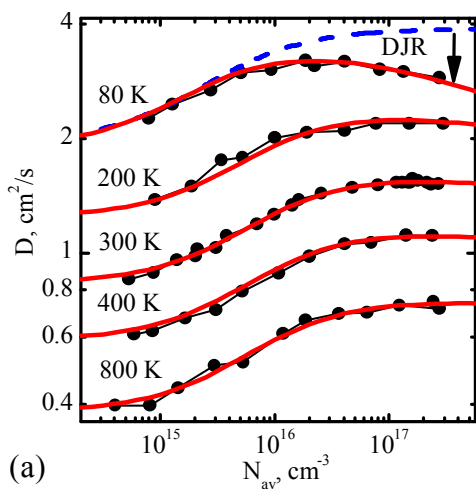
4.1 pav. 4H-SiC dvipolio difuzijos koeficiento D_a priklausomybės nuo sužadavimo pasirinktose temperatūrose (a) bei elektronų, skylių ir dvipolio judrio temperatūrinės priklausomybės esant $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ sužadimams (b). Dalyje (a): pilnaviduriai taškai rodo eksperimentinius duomenis, ištisinės linijos yra tapatinimo kreivės pagal lygtį (4.1), tuščiaviduriai taškai rodo duomenis pagal nuorodą [13] esant 296 K. Dalyje (b): pilnaviduriai taškai rodo eksperimentinius duomenis n -tipo epitaksiniame sluoksnyje (μ_{a0}) ir jo padėkle (μ_{hs}); ištisinės linijos yra tapatinimo kreivės. Perbraukti taškai rodo skylių judrį tirtame sluoksnyje (μ_{h0}), apskaičiuotą iš μ_{a0} ir μ_{eH} [14] priklausomybių. [P24]

GaN. Difrakcijos efektyvumo kinetikos GaN prie skirtingų temperatūrų ir difuzijos koeficiento priklausomybė nuo krūvininkų tankio ir bandinio orientacijos parodytos 4.2 pav. GaN stebėtas perėjimas nuo vienpolės iki dvipolės difuzijos, kas leido nustatyti skylių ir dvipolį difuzijos koeficientą ($1,6 \text{ cm}^2/\text{s}$) bei elektronų koncentraciją bandinyje. Nustatyta $D_{h\perp}=0,81 \text{ cm}^2/\text{s}$ difuzijos koeficiento vertė c-GaN bandinyje ($200 \mu\text{m}$ storio), tuo tarpu m-GaN ($450 \mu\text{m}$ storio) buvo gauta difuzijos koeficiento anizotropija: $D_{h\perp}=0,76 \text{ cm}^2/\text{s}$ ir $D_{h\parallel}=0,65 \text{ cm}^2/\text{s}$. Pakankamai maža skylių difuzijos koeficiento anizotropija paaiškinta priešinga žemesnių valentinės juostos pajuosčių anizotropija. Elektronų koncentracijos, n_0 , buvo atitinkamai $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ir $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ šiuose kristaluose. Prie pačių mažiausių sužadimų ($\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) m-GaN stebėtas stiprus D sumažėjimas dėl perkrautų akceptorų įtakos (žiūrėti 6 skyrių).

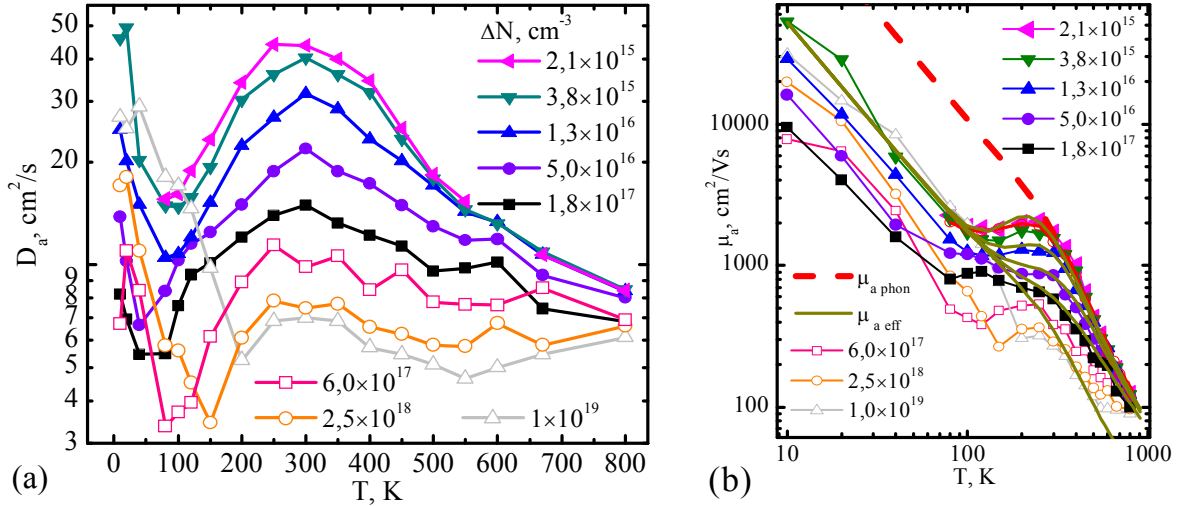


4.2 pav. Difrakcijos efektyvumo gesimo kinetikos esant dvifotoniam c-GaN sužadanimui bei 1,74 μm dinaminės gardelės periodui (a). Difuzijos koeficiento anizotropija m-GaN sluoksnyje (b). [Pagal P13,P14,P18]

Difuzijos koeficiento priklausomybės nuo temperatūros ir krūvininkų tankio c-GaN ir deimantuose pateiktos atitinkamai 4.3 ir 4.4 paveiksluose. Jos gautos naudojant dvifotonį ir tarpjuostinį sužadimą esant dideliems krūvininkų tankiams. Skaitmeniniuose skaičiavimuose panaudotos tikslios krūvininkų sklaidos akustiniais (ac), nepoliniais optiniais (npo) ir poliniais optiniais (pop) fononais trukmių išraiškos [12,14]. GaN įskaitytas juostų renormalizacijos efektas, o deimantuose taipogi įskaityta eksitonų su 6,5 kartus mažesniu difuzijos koeficientu, įtaka. Tolesnis judrio mažėjimas prie didelių sužadimų buvo sąlygotas elektron-skylinės sklaidos bei juostų renormalizacijos, o didėjimas dėl išsigimimo ir kuloninės sąveikos ekranavimo.



4.3 pav. (a) Išmatuotos c-GaN D priklausomybės ties skirtingomis temperatūromis (taškai) ir sumodeliuotos kreivės (ištinės linijos); 80 K temperatūroje įvertinama draustinių juostų renormalizacijos įtaka (DJR). (b) parodytos eksperimentinės ir teorinės skylių ($D_{h, teor}$) bei dvipolio ($D_a = 2D_{h, teor}$) difuzijos koeficientų priklausomybės. [P13]



4.4 pav. Difuzijos koeficiento ir judrio priklausomybės nuo krūvininkų tankio (a) ir temperatūros (b) CVD ($d = 0,42$ mm) deimante. Taškai – eksperimentas, linijos – modeliavimai. Brūkšninė linija (b) apskaičiuota naudojant tik fononinę sklaidą, tuo tarpu ištisinės linijos rodo efektyvųjį judrį ($\mu_{a \text{ eff}}$), gautą įskaičius 6,5 kartus mažesnę eksitonų dvipolį judrį bei nuo tankio priklausančią eksitonų koncentraciją. [Pagal P26,K26]

5 Skyrius. Krūvininkų dinamika SiC, GaN bei deimante esant dideliems sužadiniams

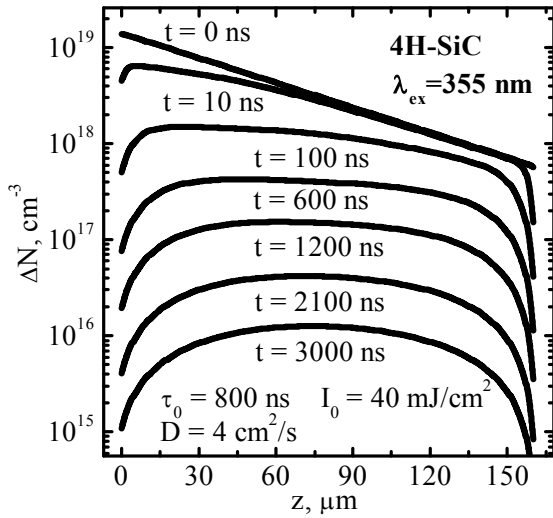
Šiame skyriuje aprašoma krūvininkų rekombinacijos sparta, kuri nustatoma įskaitant sugeneruotų krūvininkų difuziją į gylį. Remiantis tolydumo lygtimi (5.1) ir naudojant $D(\Delta N)$ priklausomybes, nustatomas įvairių rekombinacijos procesų indėlis bei išaiškinama jų prigimtis. Rekombinacijos parametrų nustatymui buvo sprendžiama krūvininkų tankio tolydumo lygtis [15]:

$$\frac{\partial \Delta N(z,t)}{\partial t} = \nabla [D(\Delta N) \nabla \Delta N(z,t)] - \frac{\Delta N(z,t)}{\tau_{SRH}} - B \Delta N(z,t)^2 - C \Delta N(z,t)^3 + G(z,t). \quad (5.1)$$

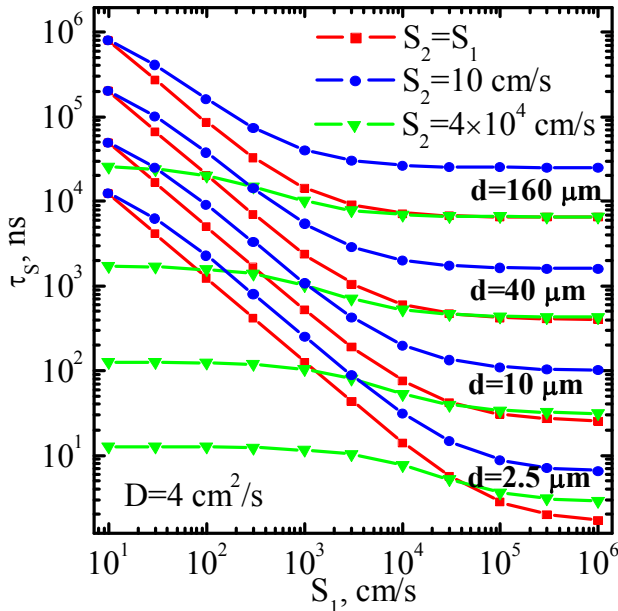
Čia τ_{SRH} yra rekombinacijos trukmė, sąlygota taškinių defektų, $B = B_{rad} + B_{nonr}$ yra kvadratinės rekombinacijos koeficientas, kur B_{rad} yra spindulinės rekombinacijos koeficientas. $B_{nonr} = B_{TAAR} + B_{CE}$ yra nespindulinės kvadratinės rekombinacijos koeficientas, kur B_{TAAR} yra gaudyklių įtakotos Ože rekombinacijos koeficientas [16] o B_{CE} yra kuloniškai sustiprintos Ože rekombinacijos koeficientas [17]. Ože tarpjuostinė rekombinacija aprašoma C koeficientu, o $G(z,t)$ yra krūvininkų generacijos funkcija. Lygties (5.1) kraštinės sąlygos yra:

$$N|_{z=0} = \frac{D(N)}{S_1} \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad N|_{z=d} = \frac{D(N)}{S_2} \frac{\partial N}{\partial z} \Big|_{z=d}. \quad (5.2)$$

S_1 ir S_2 yra atitinkamai paviršinės rekombinacijos spartos epitaksinio sluoksnio paviršiuje ir jo sandūroje su padėklu, arba kitoje pusėje esant tūriniam bandiniui.



5.1 pav. Krūvininkų tankio profilio evoliucijos skaičiavimas 160 μm storio 4H-SiC epitaksiniam sluoksnyje esant 355 nm sužadimui. Buvo naudoti tipiniai 4H-SiC parametrai: $S_1 = 10^4$ cm/s, $S_2 = 4 \times 10^4$ cm/s, $B = 1,2 \times 10^{-12}$ cm³/s, $C = 7 \times 10^{-31}$ cm⁶/s [18] ir $\tau_{SRH} = 800$ ns [19]. [P1]



5.2 pav. Paviršinės rekombinacijos laikas, apskaičiuotas skirtingo storio epitaksiniose sluoksniuose esant skirtingoms paviršinėmis spartomis S_1 ir S_2 . [P1]

SiC. Paveiksle 5.1 parodytas sumodeliuotas krūvininkų tankio profilis storame ($d = 160$ μm) 4H-SiC bandinyje. Kaip matyti po tam tikro užlaikymo krūvininkų tankio profilis nekinta bet mažėja jo amplitudė. Taipogi buvo nustatyta analizinė paviršinės rekombinacijos trukmės formulė (5 % tikslumu), kai paviršinės rekombinacijos spartos skirtingose bandinio pusėse yra skirtingos. Tokiu atveju buvo gauta paviršinės rekombinacijos laiko išraiška stacionaraus krūvininkų tankio profilio atveju:

$$\tau_s = (\tau_{DL} + \tau_{S1} + \tau_{S2})(\tau_{DL} + \tau_{S1}) \times (\tau_{DL} + \tau_{S2}) / (\tau_{DL} + (\tau_{S1} + \tau_{S2})/2)^2 \quad (5.3)$$

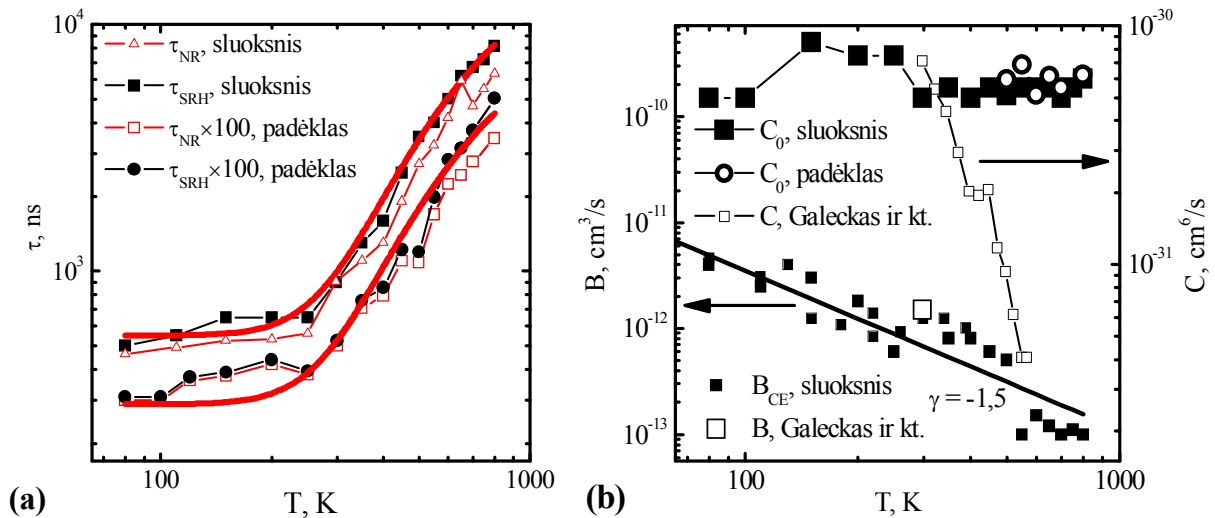
Čia $\tau_{DL} = d^2 / \pi^2 D$ yra difuziškai ribota paviršinės rekombinacijos trukmė (ant abiejų paviršių), $\tau_{S1} = d / 4S_1$ ir $\tau_{S2} = d / 4S_2$ yra paviršiaus ribotos paviršinės rekombinacijos trukmės ant priekinio ir galinio paviršiaus, atitinkamai. τ_s trukmės buvo suskaičiuotos skirtingo storio epitaksiniam sluoksniams esant skirtingoms S_1 bei S_2 vertėms.

Rezultatai parodyti 5.2 pav.

SiC ir deimante nespindulinės rekombinacijos trukmės siekia kelias

mikrosekundes. Naudojant tipines $S_1 = 10^4$ cm/s ir $S_2 = 4 \times 10^4$ cm/s vertes [18], ploniems 4H-SiC sluoksniams (2,5-10 μm) apskaičiuotos paviršinės rekombinacijos trukmės τ_s yra 10-100 ns intervale, kas neleidžia patikimai nustatyti mikrosekundinių gyvavimo trukmių. Storiems sluoksniams ($d > 160$ μm), naudotiems šiame darbe, pastaroji trukmė yra daug didesnė, $\tau_s > 7000$ ns, kas jau leidžia patikimai nustatyti ilgą τ_{SRH} trukmę (tenkinama $\tau_s > \tau_{SRH}$ sąlyga). Būtent todėl šiame darbe daugiausiai buvo tirti geros kokybės stori sluoksniai.

Nustatytųjų tiesinių bei netiesinių rekombinacijos parametrų temperatūrinės priklausomybės 4H-SiC parodytos 5.3 pav. Nespindulinės rekombinacijos trukmė buvo aproksimuota $\tau_{SRH} = \tau_0 \times [1 + 100 / \{1 + \exp(E_{a\tau}/kT)\}]$ formule, kur $E_{a\tau} = 125$ meV yra aktyvacijos energija, bei $\tau_0 = 550$ ns ir $\tau_0 = 2,9$ ns yra žematemperatūrinės defektų sąlygotos gyvavimo trukmės epitaksiniam sluoksnyje ir jo padėkle, atitinkamai. Vadinas ir sluoksnyje ir padėkle dominuoja tie patys $Z_{1/2}$ centrai [19], bet su labai skirtinga (~ 190 kartų) koncentracija.



5.3 pav. (a) Nespindulinės gyvavimo trukmės irimo uodegose (τ_{NR}) ir tiesinės nespindulinės gyvavimo trukmės (τ_{SRH}) temperatūrinės priklausomybės esant mažam sužadiniui ($\Delta N_0 \sim 10^{17}$ cm^{-3}) ir (b) Ožė koeficiento temperatūrinės priklausomybės (neekranuota C_0 vertė su kuloninio sustiprinimo faktoriumi, $B_{CE} \sim T^\gamma$). Tuščiaiduriai taškai (b) dalyje rodo $C(T)$ priklausomybę ir B vertę 300 K temperatūroje pagal [18]. [P24]

Ožė koeficiento priklausomybė nuo sužadiniui buvo nustatyta naudojant (5.1) balanso lygtį. Esant pakankamai mažiems sužadiniams ($< 5 \times 10^{18}$ cm^{-3}), Ožė koeficientas pakluso kvadratinės rekombinacijos dėsnui su kuloninio (eksitoninio) sustiprinimo koeficientu (B_{CE}) [17]. Dideliems sužadiniams ($> 10^{19}$ cm^{-3}) Ožė

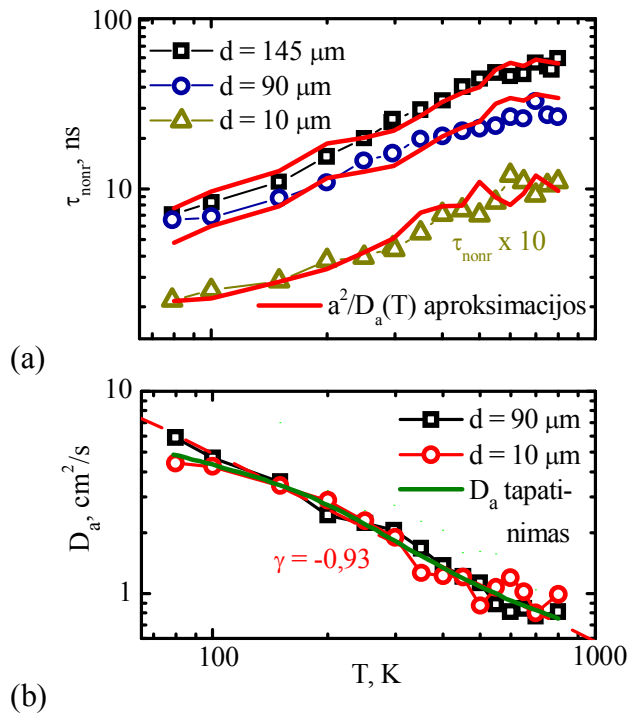
koeficientas mažėjo, kas priskirta krūvininkų ir fononų sąveikos ekranavimui [20]. Atstojamasis Ože koeficientas išreikštas taip:

$$C(T, \Delta N) = (C_0 + B_{CE}(T)/\Delta N)/(1 + \Delta N/(a_{SC} \times T))^2. \quad (5.4)$$

Čia $C_0 = (5 \pm 1) \times 10^{-31}$ cm⁶/s yra nuo temperatūros nepriklausantis neekranuotas fononinis Ože koeficientas [21], $B_{CE}(T) = 3,5 \times 10^{-9}/T^{1.5}$ cm³/s yra kuloninis Ože koeficiento sustiprinimas, $a_{SC} = 7,8 \times 10^{16}$ cm⁻³/K yra ekranavimo parametras. Nesutapimas su nuorodos [18] rezultatais gali būti dėl to, kad tame darbe nebuvo atlikti krūvininkų profilio skaičiavimai esant aukštomis temperatūroms.

3C-SiC išmatuotas integruotas FL intensyvumas, su fotodiodu (HGPD) ir fotodaugintuvi (PMT) bei integruoti FL spektrai esant skirtingiems sužadinimams. Naudojant krūvininkų dinamikos skaičiavimus ($C = (4 \pm 1) \times 10^{-32}$ cm⁶/s, $S = (4 \pm 1) \times 10^4$ cm/s, $\tau_{SRH} = 180$

ns) eksperimentiniai FL duomenys leido nustatyti 3C-SiC energijos tarpą $E_{g0} = 2,374 \pm 0,01$ eV, juostų renormalizacijos koeficientą, $a_{BR} = (1,23 \pm 0,15) \times 10^{-6}$ eV·cm^{3/4}, bei spindulinį rekombinacijos koeficientą, $B_{rad} = 2,05 \times 10^{-15}$ cm³/s. Pastarojo vertė nepriklausė nuo krūvininkų tankio ir gerai sutapo su teorine verte ($2,38 \times 10^{-15}$ cm³/s).



5.4 pav. Gyvavimo trukmės (a) bei dvipolio difuzijos koeficiento (b) temperatūrinės priklausomybės skirtingo storio GaN sluoksniuose. Brūkšniuotoji linija (b) yra laipsninė tapatinimo funkcija, $D_a \sim T^\gamma$. [P9]

Gyvavimo trukmės didėjimas su sluoksnio storiumi aprašytas $\tau_{norr} \sim d^{1,54}$ priklausomybe.

Kaip matyti, stebima atvirkštinė $\tau_{norr}(T)$ ir $D_a(T)$ priklausomybių koreliacija (aprašyta $\tau_{norr}(T) = a^2/D_a(T)$ sąryšiu (išsitiesinės linijos 5.4a pav.), naudojant $a = 6,71, 5,29$ ir $0,98$ cm vertes 145, 90 ir 10 μm sluoksniuose, atitinkamai, atitinka difuziškai ribotos

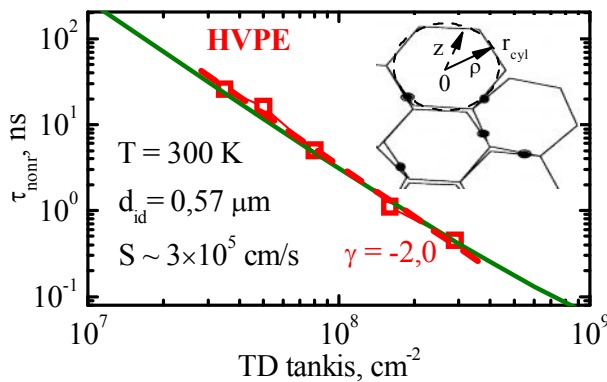
GaN. Temperatūrinės nespindulinės gyvavimo trukmės, $\tau_{norr}(T)$, priklausomybės trims skirtingo storio GaN sluoksniams (atitinkamai skirtingam dislokacijų tankiui) parodytos 5.4 pav. Gyvavimo trukmė monotoniškai didėjo su temperatūra 80-800 K intervale.

paviršinės rekombinacijos atvejį, t.y. $\tau_s \propto d^2/D_a$ [22]. Kadangi sluoksniai pakankamai stori, tai negali būti paviršinė rekombinacija, todėl šį rekombinacijos procesą galima priskirti rekombinacijai ant struktūrinių ir taškinių defektų GaN heksagoninių kolonų suaugimo ribose, kurios tipiškos GaN sluoksniams auginamiems ant safyro [23]. Rekombinacija per šiuos defektus gali būti aprašyta sprendžiant tolydumo lygtį cilindrinėse koordinatėse (ρ, z) paverčiant heksagonus cilindrais (su r_{cyl} spinduliu) paprastumo dėlei:

$$\frac{\partial \Delta N(\rho, t)}{\partial t} = D_a \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Delta N(\rho, t)}{\partial \rho} \right). \quad (5.5)$$

Čia kraštinės sąlygos apibrėžiamos heksagono centre ir sandūroje su kitais heksagonais: $\partial \Delta N(0, t) / \partial \rho = 0$; $\partial \Delta N(r_{cyl}, t) / \partial \rho = -\Delta N(r_{cyl}, t) S_{inter} / D_a$, atitinkamai (žiūrėti 5.5 pav. intarpą), bei S_{inter} yra rekombinacijos greitis ant heksagono ribų. Skaitmeninis šios lygties sprendimas leido nustatyti nespindulinę gyvavimo trukmę (5 % tikslumu):

$$\tau_{nonr} = \pi^{-3/2} r_{cyl}^2 / D_a + \pi^{-1/2} r_{cyl} / S_{inter}. \quad (5.6)$$



5.5 pav. Nespindulinės rekombinacijos trukmės priklausomybė nuo sraigčių dislokacijų (TD) tankio HVPE sluoksniuose: taškai – eksperimentiniai duomenys, linijos – skaičiavimai pagal (5.7). Brūkšniuotoji linija yra $\tau_{nonr} \sim N_{TD}^\gamma$ aproksimacija. Intarpe parodyta polikristalinė GaN struktūra [23], naudota skaičiavimuose; taškais pažymėtos TD. [P9]

atsižvelgta, kad riba priklauso dviems heksagonams) ir vidutinis atstumas tarp kaimyninių dislokacijų kristalito riboje yra $d_{id} = L_{GL} / N_{TD}$. Todėl $r_{cyl} = 1 / (N_{TD} d_{id})$ ir lygtis (5.6) difuziškai ribotam atvejui yra tokia:

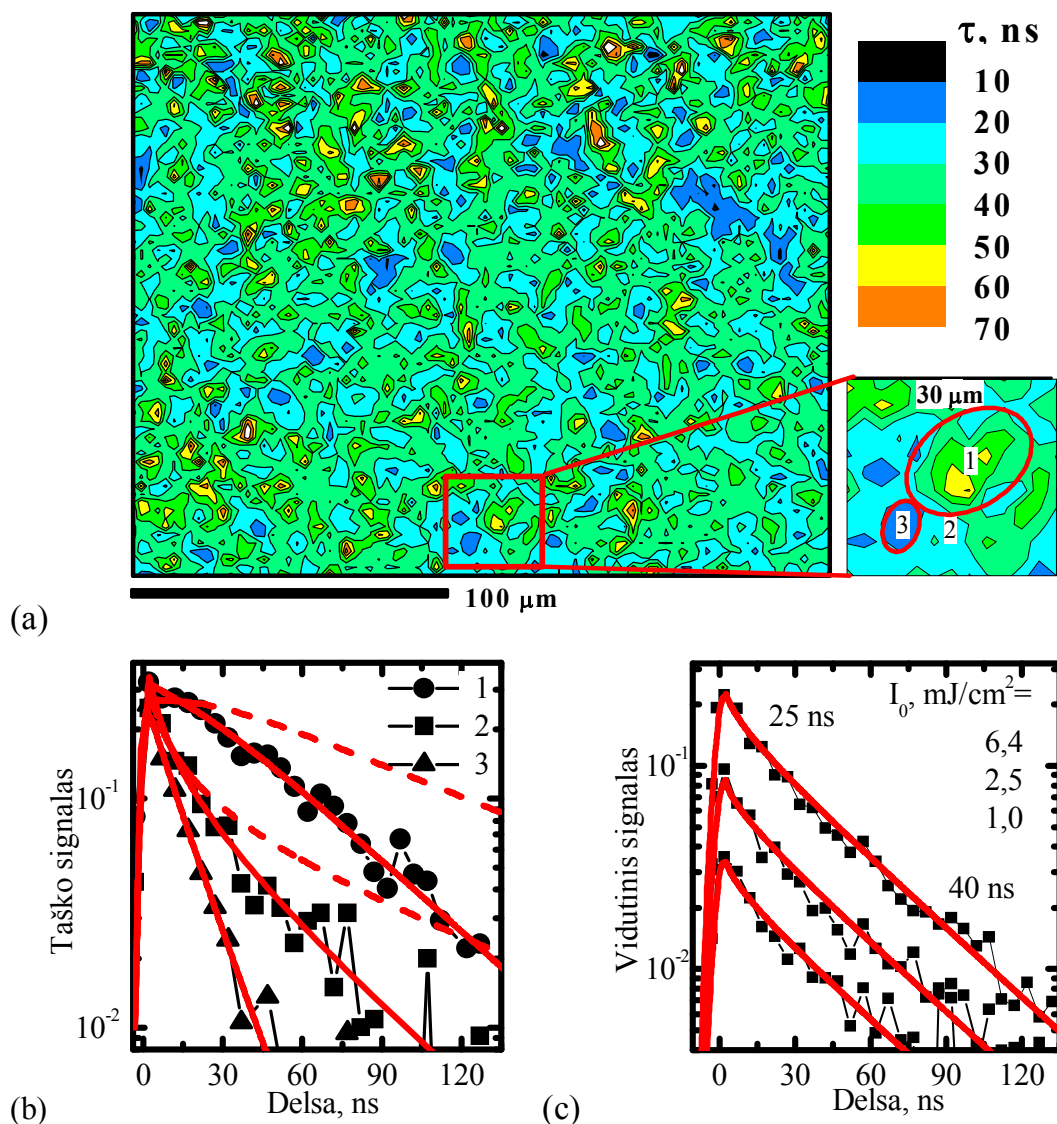
$$\tau_{nonr} = \pi^{-3/2} / (N_{TD}^2 d_{id}^2 D_a). \quad (5.7)$$

Formulė (5.6) aprašo difuziškai ribotą (pirmasis narys) ir paviršiaus ribotą (antrasis narys) paviršinės rekombinacijos trukmę. Pakankamai dideliems cilindų radiusams, pirmasis narys dominuoja, kas ir paaiškina eksperimentiškai stebėtą atvirkštinę koreliaciją. Paveiksle 5.4 a parodytos atitinkamos $\tau_{nonr}(T) = a^2 / D_a(T)$ aproksimacijos.

Heksagonų ilgis ploto vienetui yra $L_{GL} = (\pi r_{cyl}) / (\pi r_{cyl}^2) = 1 / r_{cyl} \text{ [cm}^{-1}]$ (čia

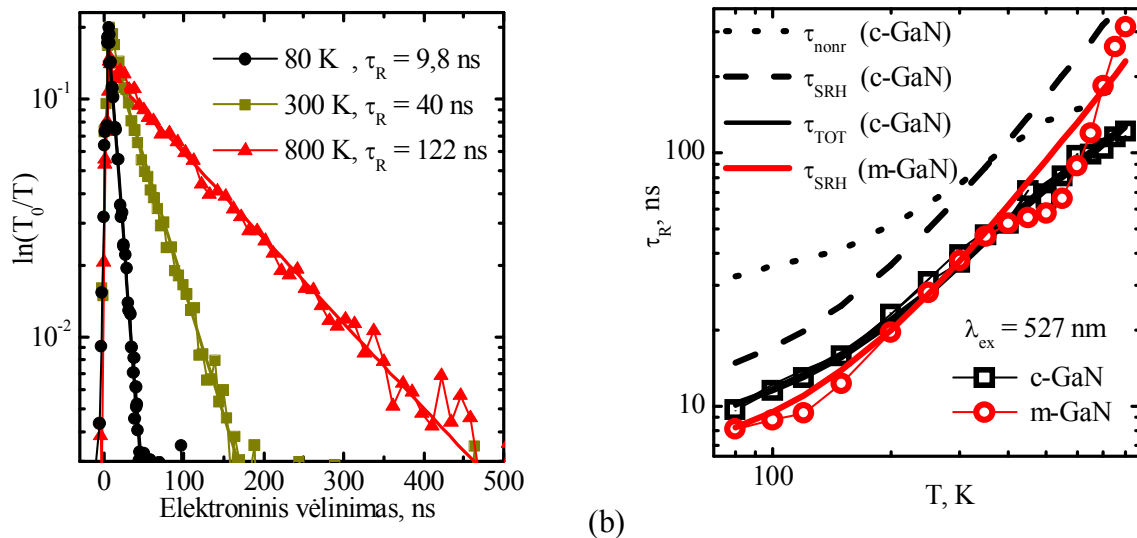
Eksperimentiškai išmatuota gyvavimo trukmės priklausomybė nuo sluoksnio storio (5.5 pav.) patvirtino (5.7) formulę, nes stebėta $\tau_{nonr} \sim 1/N_{TD}^2$ tendencija. Pagal (5.7) nustatyti cilindrų radiusai yra 0,6 ir 5,6 μm esant 10 ir 145 μm storio sluoksniams. Skaičiavimuose naudota $S_{inter} \sim 3 \times 10^5$ cm/s vertė.

Krūvininkų gyvavimo trukmių žemėlapis, naudojant naują mikroskopijos metodą, esant vienfotoniam sužadanimui c-GaN bandinyje parodytas 5.6a pav. Gyvavimo trukmės pasiskirstymas yra labai nehomogeninis, stebimos didelės gyvavimo trukmės „salos“. Irimo kinetikos pasirinktuose taškuose bei erdviškai suvidurkintos tiriamojoje srityje kinetikos parodytos (5.6b,c pav.).



5.6 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmių žemėlapis esant $I_0 = 6,4$ mJ/cm^2 sužadanimui (a), irimo kinetikos pasirinktuose taškuose (b) bei erdviškai suvidurkintos tiriamojoje srityje kinetikos (c). Sumodeliuotos kreivės parodytos ištisinėmis linijomis. Brūkšniuotosios kreivės (b) gautos neįskaičius tūrinės τ_{SRH} rekombinacijos trukmės. [P25]

Kadangi buvo naudoti dideli sužadavimo energijos srautai, I_0 , modeliavimuose buvo atsižvelgta į sugerties koeficiento sumažėjimą. Šis sumažėjimas buvo aprašytas formule $\alpha(z) = \alpha_0/(1+\xi I(z))$, kur $\alpha_0=10^5 \text{ cm}^{-1}$ yra sugerties koeficientas ties 355 nm [24] ir $\xi=1,82 \text{ cm}^2/\text{mJ}$ (pastarasis nustatytas iš DA matavimų). Sugeneruotų krūvininkų profilis buvo aprašytas $\Delta N(z,t=0) = \alpha(z)I(z)/h\nu$ sąryšiu. Erdviniai krūvininkų tankio profilių modeliavimai leido atskirti rekombinacijos ant kristalitų ribų ir jų viduje įtaką rekombinacijos trukmei. Stebėta lėta pradinė kinetikos dalis 18 μm dydžio kristalito centre išryškino vidujkristalinę rekombinacijos trukmę, kadangi krūvininkų judėjimas link heksagonų ribų buvo dar neprasidėjęs. Buvo nustatytos $\tau_{SRH}(\text{c-GaN})=70 \text{ ns}$ bei $r_c = 7,5 \mu\text{m}$ vidutinės vertės.



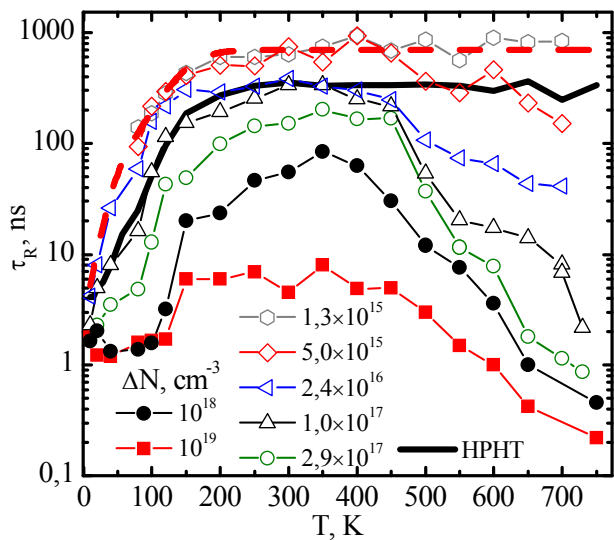
5.7 pav. DP kinetikos c-GaN bandinyje esant dvifotoniam sužadimui (a) ir temperatūrinės atstojamosios gyvavimo trukmės priklausomybės c- ir m-GaN (b). [Pagal P13,P17]

Esant dvifotoniam sužadimui storuose c-GaN ir m-GaN sluoksniuose stebėtos staigesnės gyvavimo trukmės priklausomybės nuo temperatūros (kai $T > 300 \text{ K}$, 5.7 pav.), kas reiškia τ_{SRH} rekombinacijos heksagonų viduje įtaką. Gyvavimo trukmė m-GaN priskirta nespindulinei rekombinacijai kristalitų viduje: $\tau_{SRH}(\text{m-GaN}) = (3,5 \times 10^{-4} \times T^2 + 6) \text{ ns}$. Tą patvirtino gyvavimo trukmės dvigubas sumažėjimas vienpoliame režime, kas prieštarauja difuziškai ribotos rekombinacijos modeliui, kadangi difuzijos koeficientas vienpoliame režime mažėja, o difuzinė trukmė didėja ($\tau_D \sim 1/D$). Tuo tarpu c-GaN, įskaičius rekombinacijos ant kristalitų ribų įtaką, atstojamoji gyvavimo trukmė buvo aprašyta $\tau_{TOT}^{-1} = \tau_{SRH}^{-1} + \tau_{nonr}^{-1}$ priklausomybe, kur $\tau_{SRH}(\text{c-GaN}) = 1,8 \times \tau_{SRH}(\text{m-GaN})$, $r_c =$

7,5 μm ir $S = (5 \pm 1) \times 10^3 \times \text{cm/s} \times (T/300\text{K})^{-3/2}$. c-GaN τ_{TOT} vienpoliame režime sumažėjo nežymiai (iki $\sim 30\%$) dėl minėtų rekombinacijos procesų trukmės priešingo kitimo vienpoliame režime.

Spindulinės rekombinacijos koeficientas GaN stipriai priklausė nuo sužadintų krūvininkų tankio ir esant $\Delta N > 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pasireiškė spindulinės rekombinacijos spartos sotis dėl elektron-fononinės sąveikos ekranavimo ir krūvininkų plazmos išsigimimo. DP kinetikos net ir geriausiuose bandiniuose vis tiek buvo sąlygotos nespindulinės rekombinacijos, kadangi sugeneruotų fotonų išeiga per bandinio paviršių buvo maža ($\phi_{extr} = 1/(4n_{\text{GaN}}^2) = 0,037$), o nuo paviršiaus atspindėti fotonai buvo pakartotinai sugeriami, neprisidėdami esminiai prie krūvininkų tankio mažėjimo.

Deimantai. Skirtingos auginimo technologijos monokristaliniuose deimantuose stebėtos ilgos ($\tau_{R0} = 200\text{-}700 \text{ ns}$) kinetikos esant mažiems sužadiniams (5.8 pav.). Tai parodė, kad gyvavimo trukmė esant mažiems sužadiniams yra nulemta taškiniaių defektų. Ir tai nėra azoto defektai, nes HPHT bei CVD deimantuose gyvavimo trukmės skyrėsi dukart, o azoto koncentracija keliomis eilėmis. Taipogi stebėtas staigus gyvavimo trukmės mažėjimas žemose temperatūrose, kas paaikškinta stipresne eksitonų (su trukme



5.8 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybės nuo temperatūros esant skirtingiems sužadiniams. Brūkšniuotoji linija rodo gyvavimo trukmės aproksimaciją $\tau_{ex} \sim T^{-3/2}$. [Pagal P26,K26]

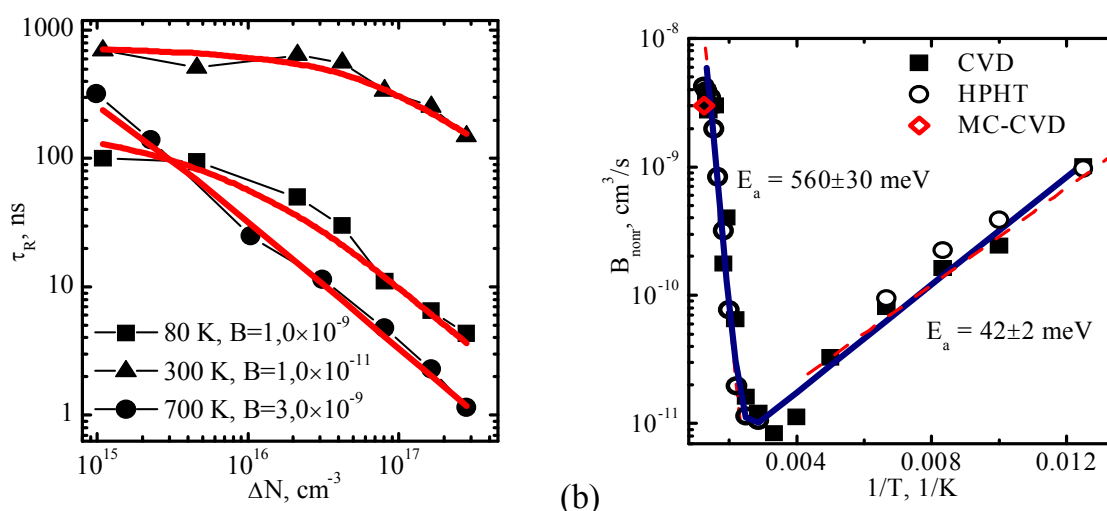
$\tau_{ex} \sim T^{-3/2}$) rekombinacija ant tų pačių taškiniaių defektų (esant $T < 200 \text{ K}$ ir $\Delta N > 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ visi krūvininkai yra susirišę į eksitus).

Prie didelių sužadinių visuose bandiniuose kinetikos greitėjo dėl netiesinės nespindulinės rekombinacijos (5.9 pav.). Ji gali būti aprašyta esant $\Delta N < 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ tokia aproksimacija:

$$B_{nonr} = 4 \times 10^{-5} \times \exp(-E_1/kT) + 0,3 \times 10^{-11} \times \exp(E_2/kT). \quad (5.8)$$

Stiprus B_{nonr} koeficiento didėjimas keliant temperatūrą su $E_1 = 560 \pm 30 \text{ meV}$ aktyvacijos energija priskirtas eksitoninei rekombinacijai. Koeficiento deaktyvacija su $E_2 = 42 \pm 2 \text{ meV}$ energija žemose

temperatūrose paašškinta eksitoniniu, bieksitoniniu (lašų) netiesioginės Ože rekombinacijos sustiprinimu. Rekombinacijos trukmės sotinimasis ties 1,5 ns verte esant pakankamai dideliems krūvininkų tankiams ($\Delta N > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ir kai $T < 150 \text{ K}$ priskirtas Ože rekombinacijai elektron-skyliniuose lašuose. Kambario temperatūroje nustatytas efektyvusis Ože rekombinacijos koeficientas, $C_0 = 4 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$, bei paviršinės rekombinacijos sparta, $S \sim 10^5 \text{ cm/s}$. Šios vertės daug didesnės nei SiC ir GaN. Esant didelėms sužadainimams ($\sim 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) ir temperatūroms ($\sim 800 \text{ K}$) gyvavimo trukmė sotinosi ties $\sim 0,1 \text{ ns}$, kas gali būti paašškinta eksitonų ir laisvų krūvininkų tankių santykio sotimi.

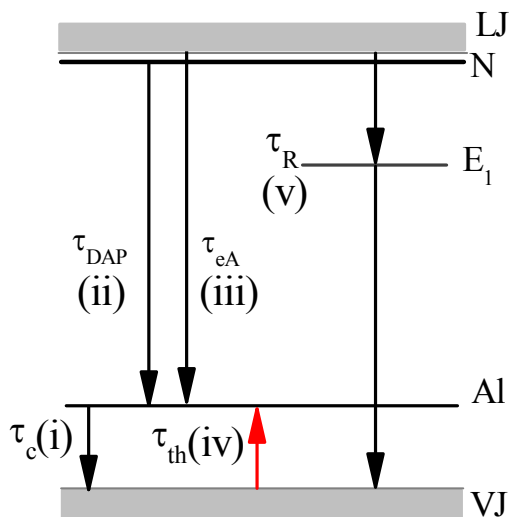


5.8 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybės nuo sužadainimo esant skirtingoms temperatūroms (a) bei rekombinacijos koeficiento B_{nonr} temperatūrinė priklausomybė (b). Rezultatai HPHT ir mikrokristaliniame CVD deimante (MC-CVD) parodyti palyginimui. Aproximacijos dalyje (a) gautos naudojant $1/\tau = 1/\tau_{R0} + B_{\text{nonr}}\Delta N$ sąryšį ($\tau_{R0} = 150; 720; 950 \text{ ns}$ ir $T = 80; 300; 700 \text{ K}$). [P26]

Savo ruožtu polikristaliniuose deimantuose gyvavimo trukmės buvo daug mažesnės (nuo 100 ps iki 8 ns), kas sąlygota didelės taškinių defektų koncentracijos net ir esant pakankamai dideliems kristalitams.

6 Skyrius. Krūvininkų pagavimas ir rekombinacija kompensuojuose kristaluose

Plačiatarpiai puslaidininkiai dažniausiai yra kompensuoti giliais akceptoriais, kas stipriai keičia medžiagos elektrines savybes. Dažniausiai kompensuojančių priemaišų įtaka nustatoma naudojant ardančiąsias metodikas. Šiame skyriuje aprašyta nauja nesąlytinė metodika, įgalinanti nustatyti kompensuojančių akceptorių (aliuminio 3C-SiC bei boro deimante) koncentraciją bei aktyvacijos energiją.



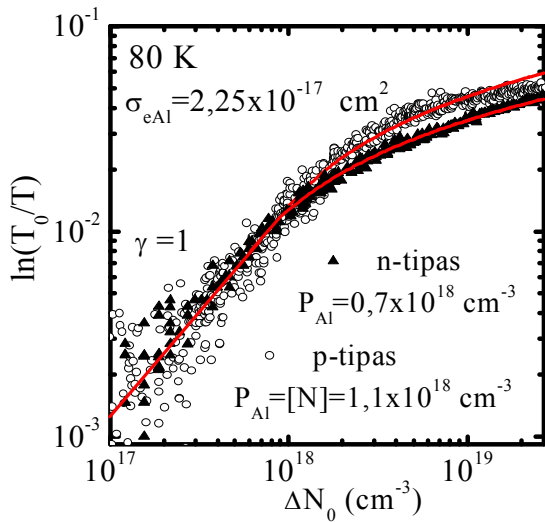
6.1 pav. Galimų elektrono šuolių kompensuotame SiC schema. Čia N – azotas, Al – aliuminis, E_1 – anglies vakansijos. LJ – laidumo juosta, VJ – valentinė juosta. [Pagal P4]

Matuojama gyvavimo trukmė τ_m yra nustatoma iš DP kinetikų, kurios rodo šių dviejų procesų įtaką: $1/\tau_m = 1/\tau_{DAP} + 1/\tau_{eAl}$. Didėjant temperatūrai stiprėja pagautų skylių emisija iš Al^0 būsenų su trukme τ_{th} (iv). Išsilaisvinusios skylės rekombinuoja per nespindulinės rekombinacijos centrus E_1 (v), arba vėl pagaunamos Al^- būsenomis.

3C-SiC. Eksperimentinės DP ekspozicinės charakteristikos ir kinetikos *n*- ir *p*- tipo bandiniuose 3C-SiC parodytos 6.2 bei 6.3 paveiksluose. Kompensuojančio aliuminio koncentracija esant tarpjuostiniam sužadinimui buvo nustatoma iš besisotinančios perkrauto aliuminio sugerties (6.2 pav.). Tam tikslui buvo panaudota formulė esant dideliems sužadinimams ($\Delta N_0 > [Al^-]$):

$$\ln(T_0/T) = \sigma_{eAl}[Al^-]/\alpha(1 + \ln(\Delta N_0/[Al^-])), \quad (6.1)$$

Nepusiasvirųjų krūvininkų relaksacija kompensuotame 3C-SiC puslaidininkyje apspręsta įvairiais galimais elektronų šuoliais, kurie parodyti 6.1 pav. Pakankamai žemose temperatūrose esant mažiems sužadinimams ($\Delta N_0 < [Al^-]$) sužadintos skylės bus pagautos Al^- būsenomis su trukme τ_c . Todėl pastaruoju atveju pusiausvriosios $[Al^-]$ koncentracijos (arba $[B^-]$ deimante) atsistatymas pasiekiamas per (ii) donor-akceptorinių porų (DAP) rekombinaciją ar (iii) elektron-akceptorinę (eAl), nes dalis donorinių azoto (N) priemaišų yra



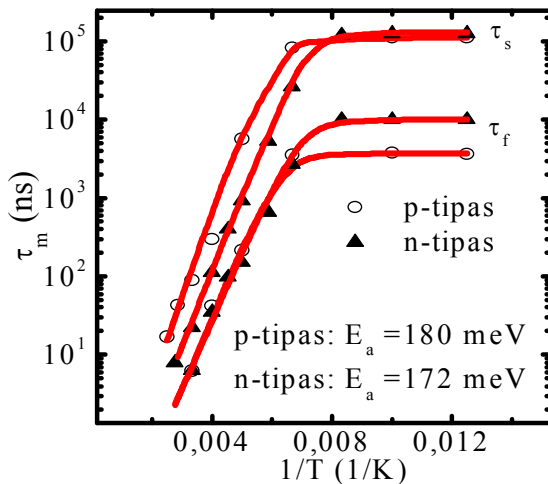
6.2 pav. Ekspozicinės charakteristikos dviems 3C-SiC sluoksniams 80 K temperatūroje. Linijos – tai aproksimacijos pagal (6.1,6.2) sąryšius. [Pagal P21] priemaišomis.

kur $\sigma_{eAl} = \sigma_e + \sigma_{Al}$ yra pilnutinis sugerties skerspjūvis, o σ_{Al} yra Al^0 fotojonizacijos skerspjūvis. Skerspjūvis σ_{eAl} buvo nustatytas iš tiesinės signalo dalies esant mažiems sužadiniams ($\Delta N_0 < [Al^-]$) pagal

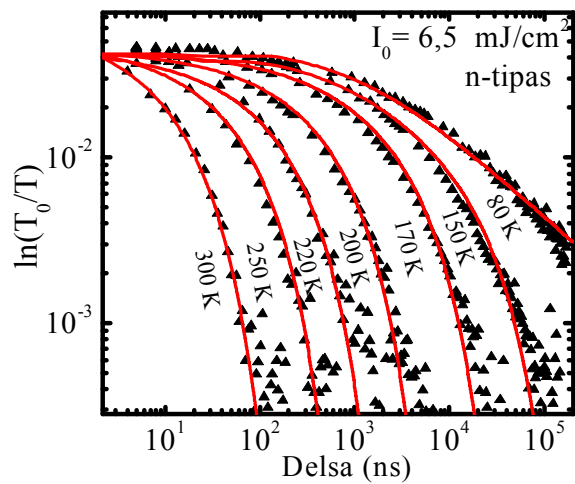
$$\ln(T_0 / T) = \sigma_{eAl} \Delta N_0 / \alpha \quad (6.2)$$

išraišką. Taipogi stebėtas difuzijos koeficiento stiprus sumažėjimas esant mažiems sužadiniams, kas buvo paaiškinta elektronų elektrostatine sąveika su perkrautomis Al

Kinetikų greitėjimas kylant temperatūrai leido nustatyti Al aktyvacijos energiją ~ 175 meV (6.3a pav.), kuri artima vertėms, gautoms kitokiais matavimais, $E_a = (180-220)$ meV [25]. Tam tikslui panaudotas eksperimentinių pradinių ir galinių kinetikų dalių eksponentinis aproksimavimas (6.3a pav.) bei skaitmeninis modeliavimas (6.3b pav.).



(a)

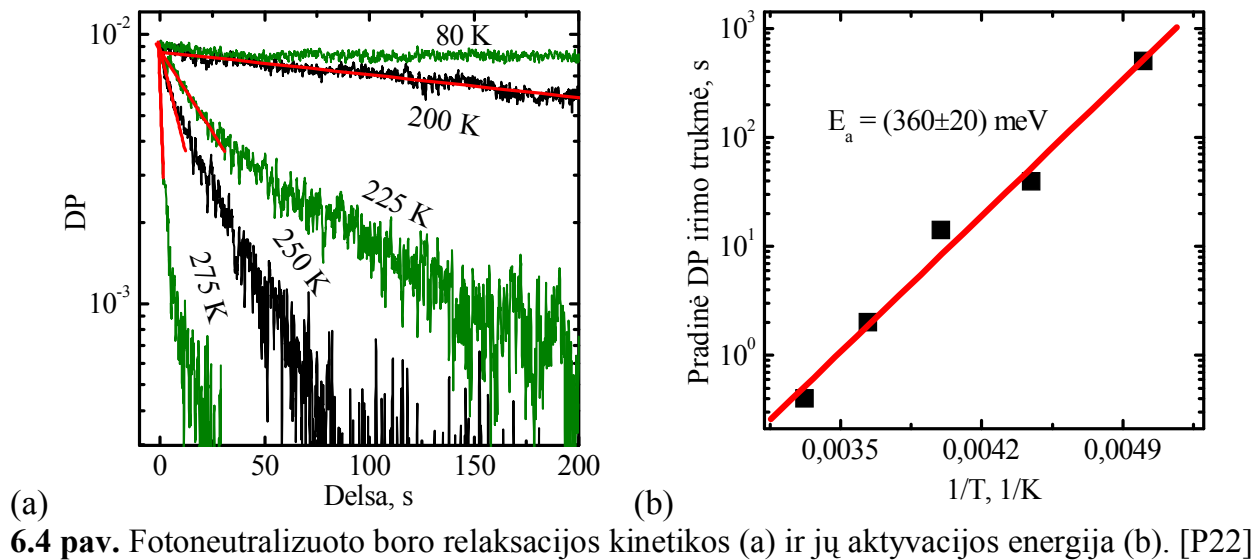


(b)

6.3 pav. (a) Aktyvacijos energijos nustatymas *n*- ir *p*-tipo bandiniuose, naudojant eksponentinės aproksimacijos laikus kinetikos pradžioje (τ_f) ir gale (τ_s). (b) DP irimo kinetikos *n*-tipo bandinyje esant $I_0 = 6,5$ mJ/cm², ištisinės linijos – skaitmeninis modeliavimas. [Pagal P21]

Deimantai. Analogiški tyrimai buvo atlikti HPHT deimantuose, tik sužadiniui buvo panaudota dvifotonė sugertis, kadangi deimantuose kompensuojančio boro

koncentracija yra gana maža. Fotoneutralizuoto boro sužadintos būsenos relaksacijos kinetikos HPHT2 bandinyje parodytos 6.4a pav., o jų aktyvacijos energijos nustatymas – 6.4b pav. Nustatyta ~360 meV aktyvacijos energija artima literatūrinėms vertėms (370 meV [26]). Kitas indikatorius rodantis, kad tai tikrai boras, buvo mėlynoji DAP liuminescencija (~2,5 eV). Ji buvo sąlygota optinių šuolių tarp fotoneutralizuoto boro ir azoto defektų lygmenų.

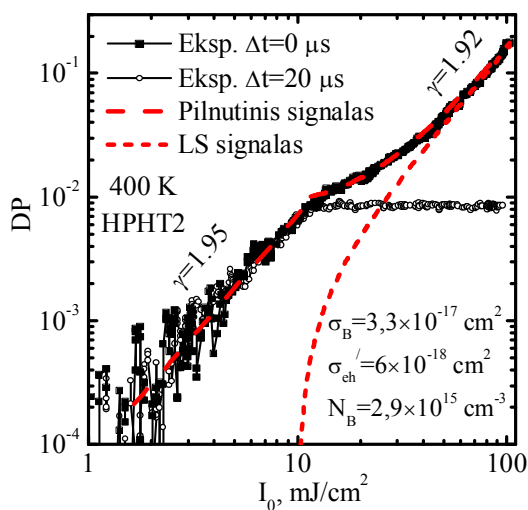


6.4 pav. Fotoneutralizuoto boro relaksacijos kinetikos (a) ir jų aktyvacijos energija (b). [P22]

Boro koncentracija ir fotojonizacijos skerspjūvis buvo nustatyti pagal panašų sąryšį, bet esant dvifotoniam sužadimui:

$$DP(t) = [\sigma_B N_B \exp(-t/\tau_B) + \sigma_{eh} (\Delta N_{02} - N_B) \exp(-t/\tau_R)] \times d. \quad (6.3)$$

Čia τ_B , τ_R bei σ_B yra boro sužadintos būsenos relaksacijos trukmė, krūvininkų gyvavimo



6.5 pav. Boro sugerties skerspjūvio nustatymas. [P22]

trukmė, bei boro fotojonizacijos skerspjūvis, atitinkamai (6.5 pav.). Aukštesnė temperatūra ($T = 400 \text{ K}$) padėjo išvengti lėto komponento kaupinimosi. HPHT2 bandinyje boro koncentracija buvo eile didesnė nei HPHT1, todėl ir DAP liuminescencija HPHT2 buvo daug stipresnė. Taipogi boro koncentracija buvo mažesnė bandinių centrinėse dalyse bei stipriai varijavo $10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ intervale.

Pagrindinės išvados

- Sugerties koeficiento matavimas DG metodu leido nustatyti tarpjuostinius sugerties koeficientus bei jų temperatūrinės priklausomybes SiC bei deimante. Be to, kalibruojant difrakcijos efektyvumą, nustatyti nuo temperatūros nepriklausantys dvifotoniai koeficientai GaN ir deimante. Laisvagrūvės sugerties kalibracija leido nustatyti laisvagrūvės sugerties skerspjūvių temperatūrinės priklausomybes SiC, GaN bei deimante. Laisvagrūvės sugerties skerspjūvio anizotropija m-GaN 527 nm ir 1053 nm zondui esant dideliems sužadanimams (10^{19} cm^{-3}) paaiškinta šuoliais tarp valentinės juostos pajuosčių. Izotropinė tiesioginė sugertis tarp laidumo juostos pajuosčių 527 nm zondui stebėta mažų sužadanimų sąlygomis (10^{17} cm^{-3}).
- Dvipozę ir vienpozę krūvininkų difuziją galima tirti plačiame sužadanimų intervale kombinuojant tarpjuostinį vienfotonį ir dvifotonį sužadanimus. Visose medžiagose prie mažų sužadanimų pavyko stebėti krūvininkų sklaidą fononais ir defektais, tuo tarpu prie didelių sužadanimų pasireiškė juostų renormalizacija, elektron-skylinė sklaida, krūvininkų plazmos išsigimimas bei eksitonų įtaka.
- Visose tirtose medžiagose prie mažų sužadanimų dominuoja nespindulinė rekombinacija. SiC ir deimante ji nulemta taškinių defektų, o GaN – difuziškai ribotos rekombinacijos ant tarpkristalitinių ribų, kas seka iš $D(T)$ ir $\tau_R(T)$ atvirkštinės koreliacijos bei krūvininkų gyvavimo trukmių erdvinio pasiskirstymo, stebimo mikroskopijos būdu. Esant dideliems sužadanimams, SiC bei deimantuose pasireiškia nespindulinė Ože rekombinacija. Spindulinės rekombinacijos koeficientas SiC nepriklauso nuo krūvininkų tankio, tuo tarpu GaN jis mažėja dėl elektron-fononinės sąveikos ekranavimo ir išsigimimo. Pastarasis efektas kartu su maža šviesos išeiga per bandinio paviršių leido priskirti DG ir DP irimo spartas nespinduliniam rekombinacijos procesui.
- Nauja metodika kompensuojančių priemaišų koncentracijos nustatymui leido nustatyti Al (SiC) bei boro (deimante) akceptorių koncentracijas plačiame diapazone bei jų aktyvacijos energijas. Nustatyti 4 kartus didesni Al ir boro akceptorių fotojonizacijos skerspjūviai, lyginant su laisvagrūviais sugerties skerspjūviais. Stebėtas stiprus difuzijos koeficiento sumažėjimas dėl elektronų elektrostatinės sąveikos su fotoneutralizuotais akceptoriais.

Literatūra

- [1] H. J. Eichler, P. Gunter and D. W. Pohl, *Laser-induced Dynamic Gratings* (Springer, Berlin, 1986).
- [2] A. J. Sabbah and D. M. Riffe, *Phys. Rev. B* **66**, 165217 (2002).
- [3] J. Linnros, *J. Appl. Phys.* **84**, 275 (1998).
- [4] J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, second ed. (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999).
- [5] P. B. Klein, R. Myers-Ward, K. -K. Lew, B. L. VanMil, C. R. Eddy, D. K. Gaskill Jr., A. Shrivastava and T. S. Sudarshan, *J. Appl. Phys.* **108**, 033713 (2010).
- [6] R. Passler, *Phys. Status Solidi B* **216**, 975 (1999).
- [7] S. G. Sridhara, T. J. Eperjesi, R. P. Devaty and W. J. Choyke, *Mater. Sci. Eng. B* **61-62**, 229 (1999).
- [8] A. Galeckas, P. Grivickas, V. Grivickas, V. Bikbajevas and J. Linnros, *Phys. Status Sololidi A* **191**, 613 (2002).
- [9] E. Kioupakis, P. Rinke, A. Schleife, F. Bechstedt, and C. G. Van de Walle, *Phys. Rev. B* **81**, 241201(R) (2010).
- [10] J. F. Young and H. M. Driel, *Phys. Rev. B* **26**, 2147 (1982).
- [11] J. F. Schetzina and J. P. McKelvey, *Phys. Rev. B* **2**, 1869 (1970).
- [12] J. Pernot, W. Zawadzki, S. Contreras, J. L. Robert, E. Neyret and L. Di Cioccio, *J. Appl. Phys.* **90**, 1869 (2001).
- [13] P. Grivickas, A. Martinez, I. Mikulskas, V. Grivickas, R. Tomašiusas, J. Linnros and U. Lindelfelt, *Mater. Sci. Forum* **353-356**, 353 (2001).
- [14] J. Pernot, S. Contreras and J. Camassel, *J. Appl. Phys.* **98**, 023706 (2005).
- [15] M. Boulou and D. Bois, *J. Appl. Phys.* **48**, 4713 (1977).
- [16] P. T. Landsberg, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 745 (1987).
- [17] A. Hangleiter and R. Hacker, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 215 (1990).
- [18] A. Galeckas, J. Linnros and V. Grivickas, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 3269 (1997).
- [19] P. B. Klein, *J. Appl. Phys.* **103**, 033702 (2008).
- [20] B. K. Ridley, *Quantum processes in semiconductors* (Clarendon Press, Oxford, 1999).
- [21] M. Takeshima, *Phys. Rev. B* **23**, 6625 (1981).
- [22] A. B. Sproul, *J. Appl. Phys.* **76**, 2851 (1994).
- [23] N. G. Weimann and L. F. Eastman, *J. Appl. Phys.* **83**, 3656 (1998).
- [24] J. F. Muth, J. H. Lee, I. K. Shmagin and R. M. Kolbas, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2572 (1997).
- [25] T. Troffer, M. Schadt, T. Frank, H. Itoh, G. Pensl, J. Heindl, H. P. Strunk, and M. Maier, *Phys. Status Solidi A* **162**, 277 (1997).
- [26] M. Zaitsev, *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook* (Springer, Berlin, 2001).

Publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai

- P1.** P. Ščajev, V. Gudelis, K. Jarašiūnas and P. B. Klein, “Fast and slow carrier recombination transients in highly excited 4H- and 3C-SiC crystals at room temperature”, *J. Appl. Phys.* **108**, 023705 (2010).
- P2.** K. Jarašiūnas, P. Ščajev, V. Gudelis, P. B. Klein and M. Kato, “Nonequilibrium carrier recombination in highly excited bulk SiC crystals”, *Mater. Sci. Forum* **645-648**, 215-218 (2010).
- P3.** A. Kadys, P. Ščajev, G. Manolis, V. Gudelis, K. Jarašiūnas, P. Abramov, S. Lebedev and A. Lebedev, “On the correlation of the structural perfection and nonequilibrium carrier parameters in 3C SiC heterostructures”, *Mater. Sci. Forum* **645-648**, 219-222 (2010).
- P4.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, A. Kadys, J. Storasta, P. L. Abramov, S. P. Lebedev and A. A. Lebedev, “Impact of Nonintentional Al Impurity to Carrier Lifetime and Diffusion in Sublimation Grown 3C Heterostructures”, *AIP Conference Proceedings* **1292**, 107-110 (2010).
- P5.** P. Ščajev, J. Hassan, K. Jarašiūnas, M. Kato, A. Henry and J. P. Bergman, “Comparative Studies of Carrier Dynamics in 3C-SiC Layers Grown on Si and 4H-SiC Substrates”, *J. Electron. Mater.* **40**, 394-399 (2011).
- P6.** P. Ščajev, T. Malinauskas, L. Lubys, E. Ivakin, M. Nesladek, K. Haenen and K. Jarašiūnas, “Optical monitoring of nonequilibrium carrier diffusion in single crystalline CVD and HPHT diamonds under high optical excitation“, *Phys. Status Solidi RRL* **5**, 193–195 (2011).
- P7.** P. Ščajev, A. Mekys, P. Malinovskis, J. Storasta, M. Kato and Jarašiūnas, “Electrical parameters of bulk 3C-SiC crystals determined by Hall effect, magnetoresistivity, and contactless time-resolved optical techniques”, *Mater. Sci. Forum* **679-680**, 157-160 (2011).
- P8.** J. Hassan, P. Ščajev, Jarašiūnas and J. P. Bergman, “Optically detected temperature dependences of carrier lifetime and diffusion coefficient in 4H- and 3C-SiC”, *Mater. Sci. Forum* **679-680**, 205-208 (2011).
- P9.** P. Ščajev, A. Usikov, V. Soukhoveev, R. Aleksiejūnas and K. Jarašiūnas, “Diffusion-limited nonradiative recombination at extended defects in hydride vapor phase epitaxy GaN layers“, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 202105 (2011).
- P10.** P. Ščajev, V. Gudelis, E. Ivakin and K. Jarašiūnas, “Nonequilibrium carrier dynamics in bulk HPHT diamond at two-photon carrier generation“, *Phys. Status Solidi A* **208**, 2067–2072 (2011).
- P11.** P. Ščajev, M. Kato and K. Jarašiūnas, “A diffraction-based technique for determination of interband absorption coefficients in bulk 3C-, 4H- and 6H-SiC crystals“, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 365402 (2011).
- P12.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, S. Okur, Ü. Özgür and H. Morkoç, “Nonequilibrium carrier dynamics in bulk GaN under two photon carrier excitation”, *Phys. Status Solidi B*, **249**, 503-506 (2012).
- P13.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, S. Okur, Ü. Özgür and H. Morkoç, “Carrier dynamics in bulk GaN”, *J. Appl. Phys.* **111**, 023702 (2012).

- P14.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, Ü. Özgür, H. Morkoç, J. Leach and T. Paskova, “Anisotropy of free-carrier absorption and diffusivity in m-plane GaN”, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 022112 (2012).
- P15.** P. Ščajev, V. Gudelis, K. Jarašiūnas, I. Kisialiou, E. Ivakin, M. Nesládek and K. Haenen, “Carrier recombination and diffusivity in microcrystalline CVD-grown and single-crystalline HPHT diamonds“, *Phys. Status Solidi A* **209**, 1744–1749 (2012).
- P16.** P. Ščajev, P. Onufrijevs, G. Manolis, M. Karaliūnas, S. Nargelas, N. Jegenyés, J. Lorenzzi, G. Ferro, M. Beshkova, R. Vasiliauskas, M. Syväjärvi, R. Yakimova, M. Kato and K. Jarašiūnas, “On applicability of time-resolved optical techniques for characterization of differently grown 3C-SiC crystals and heterostructures“, *Mater. Sci. Forum* **711**, 159-163 (2012).
- P17.** K. Jarašiūnas, R. Aleksiejūnas, T. Malinauskas, S. Nargelas and P. Ščajev, “Nonlinear Optical Techniques for Characterization of Wide Band Gap Semiconductor Electronic Properties: III-Nitrides, SiC, and Diamonds“, *MRS Proceedings* **1396**, (2012), DOI: 10.1557/opl.2012.497.
- P18.** K. Jarašiūnas, P. Ščajev, S. Nargelas, R. Aleksiejūnas, J. Leach, T. Paskova, S. Okur, Ü. Özgür and H. Morkoç, “Recombination and diffusion processes in polar and nonpolar bulk GaN investigated by time-resolved photoluminescence and nonlinear optical techniques”, *Proc. of SPIE* **8262**, 82620G (2012).
- P19.** K. Jarašiūnas, P. Ščajev, T. Malinauskas, M. Kato, E. Ivakin, M. Nesládek, K. Haenen, Ü. Özgür and H. Morkoç, “Carrier Diffusivity in Highly Excited Bulk SiC, GaN, and Diamond Crystals by Optical Probes“, *Mater. Sci. Forum* **717-720**, 309-312 (2012).
- P20.** P. Ščajev, M. Karaliūnas, E. Kuokštis and K. Jarašiūnas, “Radiative and nonradiative recombination rates in cubic SiC“, *J. Lumin.* **134**, 588-593 (2013).
- P21.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, P. L. Abramov, S. P. Lebedev and A. A. Lebedev, “Optical characterization of compensating defects in cubic SiC“, *Mater. Sci. Forum* **740-742**, 401-404 (2013).
- P22.** P. Ščajev, L. Trinkler, B. Berzina, E. Ivakin and K. Jarašiūnas, “Influence of boron on donor–acceptor pair recombination in type IIa HPHT diamonds“, *Diamond Relat. Mater.* **36**, 35-43 (2013).
- P23.** R. Aleksiejūnas, P. Ščajev, S. Nargelas, T. Malinauskas, A. Kadys and K. Jarašiūnas, “Impact of Diffusivity to Carrier Recombination Rate in Nitride Semiconductors: from Bulk GaN to (In,Ga)N Quantum Wells”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JK01 (2013).
- P24.** P. Ščajev and K. Jarašiūnas, “Temperature- and excitation-dependent carrier diffusivity and recombination rate in 4H-SiC“, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 265304 (2013).
- P25.** P. Ščajev, S. Nargelas and K. Jarašiūnas, “Time-resolved free carrier lifetime microscopy in bulk GaN”, *Phys. Status Solidi RRL* **7**, 647-650 (2013).
- P26.** P. Ščajev, V. Gudelis, A. Tallaire, J. Barjon and K. Jarašiūnas, “Injection and temperature dependent carrier recombination rate and diffusion length in freestanding CVD diamond“, *Phys. Status Solidi A* (2013), DOI 10.1002/pssa.201300045.

- P27.** P. Ščajev, S. Nargelas, K. Jarašiūnas, I. Kisialiou, E. Ivakin, W. Deferme, J. D'Haen and K. Haenen, "Crystallite size dependent carrier recombination rate and thermal diffusivity in undoped and boron doped CVD diamond layers", *Phys. Status Solidi A* (2013), DOI 10.1002/pssa.201300046.

Pranešimai konferencijose

- K1.** K. Jarašiūnas, T. Malinauskas, R. Aleksiejūnas, S. Nargelas, P. Ščajev, G. Manolis, V. Gudelis, "Optical characterization of wide bandgap semiconductors at excitation conditions approaching a power device operation", Workshop on Advanced Semiconductor Materials and devices for Power Electronics applications (WASMPE 2009), gegužės 6-8, Katanija, Italija, 2009.
- K2.** P. Ščajev, V. Gudelis, K. Jarašiūnas, and P. B. Klein, "Nonequilibrium carrier recombination peculiarities in highly excited bulk SiC crystals", 38th Lithuanian National Physics Conference (LNFK-38), birželio 8-10, Vilnius, Lietuva, 2009.
- K3.** A. Kadys, G. Manolis, P. Ščajev, V. Gudelis, K. Jarašiūnas, P. Abramov, S. Lebedev, and A. Lebedev, "On correlation of the structural perfection and nonequilibrium carrier parameters in 3C SiC heterostructures", 13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2009), spalio 11-16, Niurnbergas, Vokietija, 2009.
- K4.** K. Jarašiūnas, P. Ščajev, V. Gudelis, P. B. Klein, M. Kato, "Nonequilibrium carrier recombination in highly excited bulk SiC crystals", 13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2009), spalio 11-16, Niurnbergas, Vokietija, 2009.
- K5.** M. Karaliūnas, P. Ščajev and K. Jarašiūnas, "Room temperature photoluminescence spectra in bulk 3C-SiC crystals", The 11th International Conference-School Advanced Materials and Technologies, rugpjūčio 27-31, Palanga, Lietuva, 2009.
- K6.** P. Ščajev and M. Kato, "Monitoring of fast and slow carrier recombination transients in 3C-SiC by time-resolved FCA techniques", Winter School "SiC epitaxial growth: from thin layers to bulk material", sausio 25-29, Linčiopingas, Švedija, 2010.
- K7.** P. Ščajev, K. Jarašiūnas, A. Kadys, J. Storasta, P. L. Abramov, S. P. Lebedev, and A. A. Lebedev, "Role of twin defects to carrier mobility and lifetime in sublimation grown 3C heterostructures", E-MRS 2010 F: Wide bandgap cubic semiconductors: from growth to devices, Spring Meeting, birželio 7-11, Strasbūras, Prancūzija, 2010.
- K8.** J. Hassan, P. Ščajev, K. Jarašiūnas, M. Kato, A. Henry, P. Bergman, "Comparative Studies of Carrier Dynamics in 3C-SiC Layers Grown on Si and 4H-SiC Substrates", Electronic Materials Conference 2010, birželio 23-25, Notre Dame, JAV, 2010.
- K9.** P. Ščajev, A. Mekys, P. Malinovskis, J. Storasta, M. Kato, and K. Jarašiūnas, "Electrical parameters of bulk 3C crystals determined by Hall effect, magnetoresistivity, and contactless time-resolved optical techniques", The 8th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM), rugpjūčio 29 - rugsėjo 2, Oslas, Norvegija, 2010.

- K10.** J. Hassan, **P. Ščajev**, J. P. Bergman and K. Jarašiūnas, “Optically detected temperature and injection dependent carrier lifetime and diffusion in SiC”, ECSCRM, rugpjūčio 29 - rugsėjo 2, Oslas, Norvegija, 2010.
- K11.** P. Onufrijevs, **P. Ščajev**, M. Kato, G. Manolis, M. Karaliūnas, S. Miasojedovas, and K. Jarašiūnas, “Study of optical and photoelectrical properties of 3C-SiC single crystals and heterostructures”, VIII International Science and Technology Conference “Quantum electronics”, lapkričio 22-25, Minskas, Baltarusija, 2010.
- K12.** **P. Ščajev**, V. Gudelis, E. Ivakin, K. Jarašiūnas, “Investigation of carrier recombination rate in high-pressure high-temperature diamond by time-resolved free carrier absorption”, Hasselt Diamond Workshop 2011 (SBDD XVI), vasario 21-23, Haseltas, Belgija, 2011.
- K13.** **P. Ščajev**, V. Gudelis, E. Ivakin, and K. Jarašiūnas, “Development and implementation of time-resolved nonlinear optical techniques for monitoring of carrier dynamics in SiC and diamond crystals”, XIX Belarussian – Lithuanian seminar “Lasers and optical nonlinearity”, gegužės 16-18, Minskas, Gudija, 2011.
- K14.** **P. Ščajev**, P. Onufrijevs, G. Manolis, M. Karaliūnas, N. Jegenyas, J. Lorenzzi, M. Beshkova, R. Vasiliauskas, M. Kato and K. Jarašiūnas, “Metrological potential of time-resolved optical techniques for characterization of differently grown 3C-SiC crystals and heterostructures”, HeteroSiC-WASMPE 2011, liepos 27-30, Tūras, Prancūzija, 2011.
- K15.** **P. Ščajev**, K. Jarašiūnas, U. Ozgur, H. Morkoc, “Nonequilibrium carrier dynamics in bulk GaN under two photon carrier excitation”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), liepos 10-15, Glazgas, Didžioji Britanija, 2011.
- K16.** K. Jarašiūnas, **P. Ščajev**, T. Malinauskas, M. Kato, M. Nesladek, K. Haenen, Ü. Özgür, and H. Morkoç, “Optical Study of Carrier Diffusivity in Highly Excited Bulk SiC, GaN, and Diamond Crystals”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM 2011), rugsėjo 11-16, Klivlendas, JAV, 2011.
- K17.** **P. Ščajev**, V. Gudelis, S. Nargelas, Z. Vaitonis, M. Kato, E. Ivakin, Ü. Özgür, H. Morkoç, and K. Jarašiūnas, “Implementation of time-resolved nonlinear optical techniques for carrier diffusivity and lifetime investigation in SiC, GaN, and diamond crystals“, 39th Lithuanian National Physics Conference (LNFK-39), spalio 6-8, Vilnius, Lietuva, 2011.
- K18.** K. Jarašiūnas, R. Aleksiejūnas, T. Malinauskas, S. Nargelas and **P. Ščajev**, “Nonlinear Optical Techniques for Characterization of Wide Band Gap Semiconductor Electronic Properties: III-Nitrides, SiC, and Diamonds”, 2011 MRS Fall Meeting & Exhibit, lapkričio 28 - gruodžio 2, Bostonas, JAV, 2011 (kviestinis pranešimas).
- K19.** K. Jarašiūnas, **P. Ščajev**, S. Nargelas, R. Aleksiejūnas, J. Leach, T. Paskova, S. Okur, Ü. Özgür, H. Morkoç, “Recombination and diffusion processes in polar and nonpolar bulk GaN investigated by time-resolved photoluminescence and nonlinear optical techniques”, OPTO SPIE Photonics West, sausio 21-26, 2012, San Franciskas, JAV, 2012.
- K20.** **P. Ščajev**, V. Gudelis, K. Jarašiūnas, I. Kisialiou, E. Ivakin, M. Nesládek, K. Haenen, “Carrier recombination and diffusivity in microcrystalline CVD-grown

- and single crystalline HPHT diamonds”, Hasselt Diamond Workshop 2012 (SBDD XVII), kovo 14-16, Haseltas, Belgija, 2012.
- K21.** K. Jarašiūnas, **P. Ščajev**, S. Nargelas, A. Kadys, P. L. Abramov, S. P. Lebedev, A. A. Lebedev, “Optical characterization of compensation in cubic SiC”, European Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2012 (ECSCRM 2012), rugsėjo 2-6, Sankt-Peterburgas, Rusija, 2012.
- K22.** R. Aleksiejūnas, **P. Ščajev**, S. Nargelas, T. Malinauskas, A. Kadys, and K. Jarašiūnas, “Impact of diffusivity to carrier recombination rate in nitride semiconductors: from bulk GaN to (In,Ga)N quantum wells“, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), spalio 14-19, Saporas, Japonija, 2012.
- K23.** **P. Ščajev**, S. Nargelas, K. Jarašiūnas, I. Kisialiou, E. Ivakin, W. Deferme, and K. Haenen, “Crystallite size dependent carrier recombination rate and thermal diffusivity in undoped and boron doped CVD diamonds”, Hasselt Diamond Workshop 2013 (SBDD XVIII), vasario 27 - kovo 1, Haseltas, Belgija, 2013.
- K24.** **P. Ščajev**, V. Gudelis, A. Tallaire, J. Barjon, and K. Jarašiūnas, “Injection and temperature dependent carrier recombination rate and diffusion length in freestanding CVD diamond“, Hasselt Diamond Workshop 2013 (SBDD XVIII), vasario 27 - kovo 1, Haseltas, Belgija, 2013.
- K25.** K. Jarašiūnas, **P. Ščajev**, R. Aleksiejūnas, S. Nargelas, V. Gudelis, T. Malinauskas, A. Kadys, M. Vengris, K. Gelžinyte, K. Nomeika, “Nitridinių junginių *ex-situ* optinė diagnostika su laikine, erdvine ir spektrine skyra”, 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-40), birželio 10-12, Vilnius, Lietuva, 2013.
- K26.** K. Jarašiūnas, **P. Ščajev**, “Carrier diffusivity and scattering mechanisms in highly-excited diamonds investigated by light-induced transient grating technique“, International Conference on Diamond and Carbon Materials, rugsėjo 2-5, Riva del Garda, Italija, 2013 (kvietinis pranešimas).
- K27.** **P. Ščajev**, M. Karaliūnas, E. Kuokštis, V. Grivickas, and K. Jarašiūnas, “Radiative and nonradiative recombination in 3C-SiC“, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013 (ICSCRM 2013), rugsėjo 29 - spalio 4, Mijazakis, Japonija, 2013.
- K28.** **P. Ščajev**, K. Jarašiūnas, and P. B. Klein, “Injection and temperature dependent diffusivity and Auger recombination in 4H-SiC“, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM 2011), rugsėjo 29 - spalio 4, Mijazakis, Japonija, 2013.

Informacija apie autorių

Vardas, Pavardė

Patrik Ščajev

Gimimo data ir vieta

1984 m. gegužės 29 d., Vilnius, Lietuva

Elektroninis paštas

patrik.scajev@ff.vu.lt

Išsilavinimas

1991-2003 Vilniaus Jono Pauliaus II gimnazija
įgytas vidurinis išsilavinimas

2003-2007 VU, Fizikos fakultetas, bakalauro studijos
įgytas fizikos bakalauro kvalifikacinis laipsnis

2007-2009 VU, Fizikos fakultetas, magistro studijos
įgytas medžiagų mokslo magistro kvalifikacinis laipsnis

2009-2013 VU, Fizikos fakultetas, doktrantūros studijos

Darbo patirtis

2007-2010 jaunesnysis inžinierius, VU Taikomųjų mokslų
institutas

2010-2012 inžinierius, VU Taikomųjų mokslų institutas

2012-2013 jaunesnysis mokslo darbuotojas, VU Taikomųjų
mokslų institutas

Specializacija

Optinis puslaidininkių charakterizavimas dinaminių gardelių, diferencinio pralaidumo, diferencinio atspindžio ir fotoluminescencijos metodais bei krūvininkų dinamikos skaitmeninis modeliavimas.

Publikacijos

32 straipsniai (20 žurnaluose, turinčiuose ISI citavimo indeksą),
35 pranešimai konferencijose.