

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

DOVILĖ MEŠKAUSKAITĖ

**DEFEKTŲ SPEKTROSKOPIJA PLAČIATARPIUOSE PUSLAIDININKIUOSE  
IR STIPRIAİ APŠVITINTAME Si**

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2018

Disertacija rengta 2014–2018 metais Vilniaus universitete.

**Mokslinis vadovas** – prof. habil. dr. Eugenijus Gaubas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

**Disertacija ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje:**

**Pirmininkas** – prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

**Nariai:**

Prof. habil. dr. Arturs Medvids (Rygos technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Doc. dr. Artūras Plukis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Doc. dr. Tomas Šalkus (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);

Doc. dr. Bonifacas Vengalis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2018 m. rugsėjo 21 d. 14 val. A101 auditorijoje Nacionaliniame fizinių ir technologijos mokslų centre, Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2018 m. rugpjūčio 17 d.

Su disertacija galima susipažinti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

DOVILĖ MEŠKAUSKAITĖ

**SPECTROSCOPY OF DEFECTS IN WIDE BAND-GAP SEMICONDUCTORS  
AND HEAVILY IRRADIATED Si**

Summary of doctoral dissertation

Physical Sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2018

Doctoral dissertation was prepared in 2014–2018 at Vilnius University Faculty of Physics.

**Supervisor** – Prof. Dr. Sc. Eugenijus Gaubas (Vilnius University, Physical science, Physics – 02P).

**Dissertation will be defended at the public meeting of the Defence Council:**

**Chairman** – Prof. Dr. Vincas Tamošiūnas (Vilnius University, Physical science, Physics – 02P).

**Members:**

Prof. Dr. Sc. Arturs Medvids (Ryga Technical University, Physical science, Physics – 02P);

Doc. Dr. Artūras Plukis (Center of Physical Science and Technology, Physical science, Physics – 02P);

Doc. Dr. Tomas Šalkus (Vilnius University, Science of technology, Material engineering – 08T);

Doc. Dr. Bonifacas Vengalis (Center of Physical Science and Technology, Physical science, Physics – 02P).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Defence Council on 21st of September in 2018, 2 PM in auditorium No. A101 in National Center of Physical Science and Technology, Saulėtekio av. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania.

Summary of dissertation sent on 17th of August in 2018.

The dissertation is available at Vilnius University, Center of Physical Science and Technology libraries and on internet: <https://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

## **Turinys**

Santrumpos .....	6
1. Įvadas .....	7
2. Matavimų metodai bei įranga .....	12
2.1 Medžiagų struktūrų charakteristikų įvertinimas .....	12
2.2 Elektrinių ir optinių savybių charakterizavimo metodai ir įranga.....	12
2.3 Spektriniai matavimo metodai.....	14
3. Eksperimentiniai rezultatai .....	15
3.1. Amonoterminiu būdu užaugintų GaN kristalų tyrimai.....	15
3.2. MOCVD GaN, užauginto ant Si padėklų, tyrimų rezultatai .....	19
3.3. Protonų pluošteliu sužadintos liuminescencijos ir BELIV charakteristikų <i>in situ</i> kitimai .....	22
3.4. HPHT ir CVD deimanto tyrimai .....	24
3.5. Dideliu hadronų įtėkiu apšvitinto Si spektroskopija .....	30
4. Išvados.....	32
5. Publikacijų sąrašas .....	33
6. Summary .....	35
7. Informacija apie autorių .....	36
8. Literatūros nuorodų sąrašas .....	37

## Santrumpos

BELIV – barjero įvertinimo tiesiškai didėjančia įtampa impulsinė metodika  
DLTS – giliųjų lygmenų kinetinė spektroskopija  
ESR – elektronų sukinių rezonansas  
FTIR – Furje transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopija  
MW-PC – mikrobangomis zondojuamo fotolaidumo metodas  
PI-L – protonais sužadinta liuminescencija  
PL – fotoluminescencija  
PPIS – impulsinės fotojonizacijos spektroskopija  
SS-PL – nuostovioji fotoluminescencija  
TCT – srovės kinetikų metodika  
TDTL – krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų spektroskopija  
TI-PL – laike integruota fotoluminescencija  
TR-PL – laikinės skyros fotoluminescencijos spektroskopijos metodas  
XRD – Rentgeno spindulių difrakcija

## 1. Įvadas

Plačiatarpiai puslaidininkiai pasižymi išskirtinėmis medžiagos savybėmis, lyginant su puslaidininkių pramonėje plačiai naudojamu siliciu (Si). Plačiatarpiai puslaidininkiai, pvz. deimantas ir galio nitridas (GaN), pasižymi didele pramušimo įtampa, dideliais krūvininkų judriais, dideliu šiluminiu laidumu [1]. Todėl GaN ir deimantas yra vis plačiau naudojami didelės galios, aukštadažnių prietaisų ir įvairių sensorių gamybai [2]. Lyginant su dalelių detektorių gamyboje plačiai naudojamu Si arba galio arsenidu, deimantas ir GaN pasižymi didesniu atsparumu radiacijai ir yra vienos perspektyviausių medžiagų dalelių radiacijai atspariems detektoriams ir aukštų energijų spinduliuočių dozimetrams formuoti [2,3]. Didelis atsparumas apšvitos poveikiui ypač svarbus detektoriams, kurie naudojami dalelių greitintuvuose, pvz, Europos branduolinių tyrimų centro (CERN) eksperimentuose [4]. Kadangi CERN eksperimentuose yra pasitelkiami didelio intensyvumo dalelių srautai, dalelių detektavimo sistemos, ypač arti sąveikos centro esantys trajektorijos (*tracking*) detektoriai, patiria dideles radiacines pažeidas. Puslaidininkinius prietaisus naudojant didelės apšvitos sąlygomis, spinduliuotė kuria nepageidaujamus radiacinius defektus, kurie blogina prietaisų funkcines savybes. Taip pat svarbu ir nuodugnai ištirti technologinius defektus, kurie neišvengiamai įvedami į medžiagą auginant kristalus ir formuojant prietaisus. Apšvitos metu sukurti defektai sudaro kompleksus su technologiniais defektais, todėl defektų tyrimai yra aktualūs, siekiant sukurti efektyvius ir radiacijai atsparius dalelių detektorius. Nors yra žinoma, kad GaN ir deimantas pasižymi atsparumu jonizuojančiai spinduliuotei, mokslinėje literatūroje nepakankamai išsamiai ištirti defektai ir jų įtaka optinėms ir elektrinėms šių medžiagų savybėms. Ypač nedaug tyrimų atlikta siekiant įvertinti didelio įtėkio apšvitos poveikį plačiatarpiais puslaidininkiams. Todėl yra itin aktuali plačiatarpių puslaidininkių spektroskopija, siekiant identifikuoti ir kontroliuoti defektų savybes. Tam yra ypač plačiai taikomi tokie defektų spektroskopijos metodai, kaip fotoluminescencija (*photoluminescence* – PL), nenuostovioji giliųjų lygmenų spektroskopija (*deep level transient spectroscopy* – DLTS), mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (*microwave-probed photoconductivity* – MW-PC) tyrimai. Šie metodai pasižymi dideliu jautriu įvertinant defektams priskirtinų lygmenų energetines padėtis draustinių energijų tarpe, defektų koncentracijas bei elektron-fotoninės ir elektron-fononinės sąveikų skerspjuvių charakteristikas. Šiame darbe

radiaciniai defektai buvo ištirti amonoterminiu būdu užaugintame GaN, apšvitintame neutronų įtėkiais siekiančiais  $\Phi=5\times 10^{15}\text{cm}^{-2}$  vertes. Tokie įtėkiai sukaupiami CERN detektoriuose per 10 metų veikimo laikotarpį. *In situ* matavimai apšvitos 1.6 MeV energijos protonų pluošteliu buvo atlikti registruojant protonų indukuotą liuminescenciją (*proton-induced luminescence* – PI-L) ir barjerinės talpos kinetikas veikiant tiesiškai kintančios įtampos impulsams (*barrier evaluation by linearly increasing voltage* – BELIV) komercinių šviestukų (*light-emitting diode* – LED) pagrindu pagamintuose GaN sensoriuose. Šių signalų kitimo evoliucija, didėjant apšvitos protonais ekspozicijos trukmei, leidžia nagrinėti *in situ* radiacinių defektų susidarymo spartą GaN sensoriuose, GaN elektrinių ir optinių parametrų kitimus.

Dėl mažos savitosios krūvininkų koncentracijos, tradiciniai metodai, tokie kaip krūvininkų tankio bei judrio matavimai puslaidininkinėje medžiagoje Holo metodu, yra neefektyvūs krūvininkų dreifo parametrų įvertinimui deimante. Todėl yra svarbu tiesiogiai matuoti krūvininkų dreifo parametrus kinetiniais (*transient current technique* – TCT) metodais. Šie metodai negausiai, bet dažniausiai, ir yra taikomi deimanto darinių tyrimams. Literatūroje aprašyti TCT matavimų metodiniai pagrindai tinka tik elementariausių eksperimentinių situacijų nagrinėjimui. Dėl sintetinio deimanto gamybos technologijos, užauginti medžiagų kristalai turi daug ir įvairių defektų, susidarantių dėl technologinių procesų, medžiagų modifikavimo (siekiant suformuoti pusiau-izoliuojančius darinius arba formuojant kontaktus) specifikos ar dėl radiacinės pažeidos. Rekombinacija, dėl didelių defektų koncentracijų, bei difuzija TCT matavimuose gali nepriimtinau iškreipti krūvininkų dreifo parametrų įvertinimą. Todėl būtina detalesnė srovės kinetikų matavimo režimų analizė ir eksperimentų geometrijos parinkimas. Tuo tikslu buvo surasti efektyvūs matavimų režimai kondensatorinio tipo dalelių detektorių funkciniam parametrui bei medžiagos homogeniškumui įvertinti. Šiuo metodu ištirti krūvininkų rekombinacijos ir transporto parametrai įvairios technologijos sintetinio deimanto (CVD ir HPHT) dariniuose. Siekiant giliau suvokti išilginės difuzijos įtaką (kai koncentracijos gradientų ir elektrinio lauko kryptys sutampa) buvo sukurtas injektuoto krūvio srovės kinetikų profiliavimo metodas keičiant pridėtą nuostovią įtampą (išilginio profiliavimo režime) arba varijuojant injektuotų krūvininkų lokalizaciją kondensatoriaus tarp-elektrodinėje srityje (statmenos geometrijos režime). Šie matavimo režimai leidžia



įvertinti elektrinio lauko pasiskirstymo, krūvininkų prilipimo, kaupimosi bei poliarizacijos reiškinių įtaką.

Nepaisant pažangos kuriant plačiatarpių puslaidininkių pagamintus detektorius, Si išlieka svarbiausia medžiaga dalelių detektorių gamyboje. Tokie detektoriai naudojami ir CERN'o eksperimentuose. Radiaciniai defektai ženkliai sutrumpina krūvininkų rekombinacijos trukmę, mažina legiravimo laipsnį. Iškaitinimai tam tikrais režimais yra plačiai taikomi siekiant atstatyti detektorių funkcines charakteristikas, nes defektų, kurie stabilūs kambario temperatūroje, tankius galima varijuoti terminiais poveikiais [5]. Tačiau identifikuoti defektus dideliais hadronų įtekiais apšvitintame Si yra sudėtinga, nes standartiniai metodai, tokie kaip DLTS ar termiškai stimuliuotų srovių (*thermal stimulated current* – TCS) matavimai, negali būti taikomi dėl mažos legirantų koncentracijos arba išaugusios nuotėkio srovės. Todėl defektų identifikacijai dideliu įtekiu apšvitintame Si buvo naudojami srovės DLTS (I-DLTS) ir krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų (*temperature dependent carrier trapping lifetime* – TDTL) spektroskopiniai metodai. I-DLTS spektroskopijoje yra registruojamos krūvininkų emisijos iš giliųjų lygmenų kinetikos, ir šis DLTS režimas yra tinkamas vyraujant sparčiai krūvininkų termoemisijai ir esant dideliems defektų tankiams, nes srovės kinetikų amplitudė priklauso nuo nuskurdintos srities pločio, krūvininkų emisijos trukmės ir defektų tankio  $N_t$ , o ne  $N_t/N_d$  santykio, kaip talpos DLTS (C-DLTS) atveju.

### **Tyrimų uždaviniai**

- Išplėtoti MW-PC kinetikų kinetinius modelius siekiant įvertinti krūvininkų rekombinacijos parametrus GaN ir deimanto medžiagose ir pritaikyti nesąlytinės spektroskopijos metodus;
- technologinių ir radiacinių defektų spektro įvertinimas amonoterminiu būdu užauginto GaN kristaluose ir jų įtaka elektrinėms ir optinėms medžiagos savybėms;
- krūvininkų rekombinacijos mechanizmų analizė MOCVD GaN epitaksiniuose sluoksniuose;
- BELIV ir PI-L charakteristikų *in situ* tyrimai GaN sensoriuose apšvitinant 1.6 MeV energijos protonų pluošteliais;
- technologinių defektų deimante, užaugintame skirtingais metodais, analizė;
- kondensatorinių deimanto detektorių operacinių charakteristikų tyrimai;

- hadronais sukurtų radiacinių defektų ir jų transformacijų po iškaitinimų tyrimas Si dariniuose.

### **Aktualumas ir mokslinis naujumas**

Siekiant įvertinti GaN tinkamumą dalelių detektorių formavimui buvo detaliam iširti amonoterminiu būdu užauginti GaN (AT-GaN) kristalai legiruoti Mn bei Mg ir apšvitinti neutronais plačiame įtėkių intervale. Įvertinta, kaip legirantai keičia medžiagos parametrus. Įrodyta, kad AT-GaN yra tinkama medžiaga dvigubo, – elektrinio ir optinio, atsako sensorių formavimui.

Parodyta, kad MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksiniuose sluoksniuose krūvininkų rekombinacija yra būdinga netvarkioms struktūroms, kai pasireiškia atsitiktinis krūvininkų klaidžiojimas dislokaciniuose tinkluose. Netvarkumą nusakančių parametru įvertinimui buvo atlikti Rentgeno spinduliuotės difrakcijos (XRD), mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (MW-PC) ir fotoluminescencijos (PL) spektroskopiniai matavimai. Nustatyta išėstosios eksponentės rodiklio  $\beta_{SER}$ , sietino su medžiagos netvarkumo parametrais, koreliacija su dislokacijų tankiu.

Parodyta, kad GaN sensoriai, pagaminti komercinio MOCVD GaN šviestuko pagrindu, yra tinkami sinchroniniam optinio ir elektrinio atsako registravimui hadronų apšvitos metu.

Išvystytas dinaminis modelis, pagrįstas Shockley-Ramo teorema, skirtas srovių kinetikų nagrinėjimui kondensatorinio tipo detektoriuose. Šis modelis buvo pritaikytas eksperimentiškai išmatuotų srovės kinetikų analizei. Tai leido įvertinti krūvininkų dreifo parametrus deimanto medžiagose, defektų pasiskirstymą ir medžiagos homogeniškumo parametrus. Defektų deimante identifikavimui buvo pasitelkti tokie spektriniai metodai, – elektronų sukinio rezonanso (ESR) spektroskopija, Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopija (FTIR), impulsinė fotojonizacijos spektroskopija (PPIS).

Krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų (TDTL) metodika buvo pritaikyta defektų identifikavimui dideliais hadronų įtėkiais apšvitintame Si, kai standartiniai defektų spektroskopijos metodai, tokie kaip DLTS, netinka dėl didelių radiacinių defektų tankių.

## **Ginamieji teiginiai**

1. Mg legiruotas AT-GaN pasižymi ilga krūvininkų gyvavimo trukme ir dideliu atsparumu radiacijai, todėl yra tinkama medžiaga detektorių, registruojančių spinduliuotę su mažu sąveikos skerspjūviu, formavimui. Mn legiruotas AT-GaN, dėl trumpos krūvininkų gyvavimo trukmės, yra tinkama medžiaga spartaus atsako detektorių formavimui.

2. MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksiniuose sluoksniuose išstętosios eksponentės rodiklis  $\beta_{SER}$ , įvertintas iš MW-PC kinetikų kitimo asimptotinių amplitudžių srityje, nusako medžiagos netvarkumą, nulemtą dislokacijų tankio.

3. MOCVD GaN šviestuko pagrindu pagamintas sensorius yra tinkamas elektrinio ir optinio signalo registravimui protonų apšvitos metu.

4. Kombinuojant injektuoto krūvio domenų sukurtas srovių kinetikų profiliavimo metodikas galima patikimai įvertinti krūvininkų rekombinacijos, difuzijos ir dreifo parametrus.

5. Nesąlytinė krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų matavimo metodika (TDTL) dideliais hadronų įtekiais apšvitintuose Si bandiniuose leidžia identifikuoti radiacinius defektus ir jų transformacijas po iškaitinimų.

## 2. Matavimų metodai bei įranga

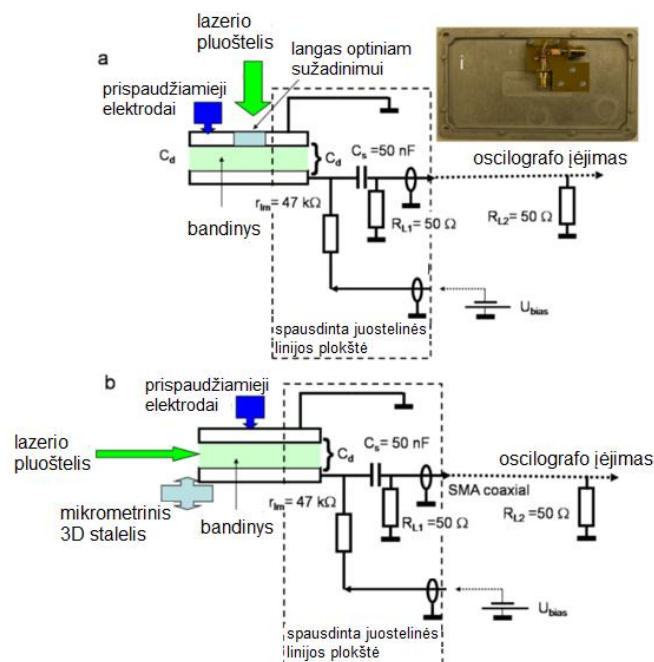
### 2.1 Medžiagų struktūrų charakteristikų įvertinimas

Siekiant įvertinti kristalų struktūros charakteristikas buvo atlikti Rentgeno spinduliuotės difrakcijos (XRD) spektrų matavimai. Šiais tyrimais, atliktais GaN epitaksiniuose dariniuose užaugintuose ant silicio (Si), buvo įvertinti skiriamųjų AlN ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  suderinimo sluoksnių bei funkcinių GaN sluoksnių parametrai. Dėl GaN ir Si gardelės nesutapimo (apie 17 %) ir skirtingų šiluminio plėtimosi koeficientų susidaro vidiniai įtempimai ir dislokacijos. Dislokacijų tipo ir tankio įvertinimui buvo išmatuoti (0002) ir (30-32) XRD refleksų puspločiai. Dislokacijų tankis (TDD), laikant, kad dislokacijų pasiskirstymas yra atsitiktinis, buvo įvertintas tokia išraiška:  $TDD = \beta^2/9b^2$ , kur  $\beta$  yra difrakcinės smailės plotis pusės smailės aukštyje ir  $b$  – Biurgers vektorius.

### 2.2 Elektrinių ir optinių savybių charakterizavimo metodai ir įranga

#### Srovės kinetikų metodas ir įranga

Krūvininkų dreifo kinetikų profiliavimui ultravioletinės (354 nm) arba žalios (531 nm) šviesos mikrolustinio STA-1-3H lazerio pluoštelio ir 100 Hz sekos 400 ps impulsais buvo apšviečiama diafragma, suformuota viršutiniame detektoriaus elektrode. Srovių profiliavimo schemas yra pateiktos 1 pav.



1 pav. Srovių profiliavimo įtampa (a) ir skenuojant krūvininkų domeno injekcijos poziciją (b) schemas.

Siekiant išvengti išilginės difuzijos, srovės kinetikų skenavimas keičiant injekcijos lokalizaciją buvo vykdomas lazerio pluoštelį fokusuojant juostele į poliruotą bandinio briauną, statmenai pridėtam laukui (1b pav.). Šiuo atveju detektorius su visa elektrinių prijungimų platforma, realizuota juostelinės linijos spausdintinėje plokštėje, buvo tvirtinamas ant mikrometrinio 3D stalelio.

### **BELIV metodas**

Barjerinės talpos įvertinimas tiesiškai augančios įtampos (BELIV) impulsine metodika yra pagrįstas p-n sandūrinės struktūros talpos kitimų analize [6]. Krūvio  $q(t)=C_b U$  kitimas laike užtvarine kryptimi įjungtoje sandūroje nulemia srovę išorinėje grandinėje, aprašomą formule:

$$i_c(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} (C_b + U \frac{\partial C_b}{\partial U}) = AC_{b0} \frac{1 + \frac{At}{2U_{bi}}}{(1 + \frac{At}{U_{bi}})^{3/2}} \quad (1)$$

Čia  $A=U_P/\tau_{PL}$  yra tiesiškai didėjančios įtampos augimo greitis, kur  $U_P$  ir  $\tau_{PL}$  yra tiesiškai augančios įtampos impulso amplitudė ir trukmė, atitinkamai. Pradinėje kinetikos dalyje yra stebimas barjero įelektrinimo procesas. Tiesiškai didėjant įtampai nuskurdinimo sritis toliau plečiasi ir srovė tekanti grandine mažėja, t.y. pasireiškia krūvio ekstrakcija. Užregistravus BELIV kinetikas galima įvertinti sandūros barjerinę talpą  $C_{b0}$ , legirantų koncentraciją  $N_D$  bei krūvininkų generacijos iš bazės srityje esančių lokalizuotų lygmenų trukmę  $\tau_g$ . Pastaruoju atveju pasireiškia generacinės srovės sandas:

$$i_g = \frac{en_i w}{\tau_g} \quad (2)$$

Čia  $n_i$  yra savųjų krūvininkų koncentracija,  $w$  yra sandūros nuskurdintosios srities plotis.

### **MW-PC metodas**

Mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (MW-PC) metodas remiasi medžiagos ir elektromagnetinės spinduliuotės sąveika [7]. Krūvininkai, sužadinti trumpu lazerio impulsu, keičia sugeriamos medžiagoje mikrobangų spinduliuotės galią. Mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo atsakas išreiškiamas taip:

$$U = k[I_p \cdot \Delta K - I_n] \quad (3)$$

Čia  $k$  yra detektoriaus perdavimo funkcija,  $I_p$  – krintančios mikrobangų spinduliuotės intensyvumas,  $\Delta K$  – fotolaidumo sąlygoto mikrobangų sugerties pokyčio funkcionalas,  $I_n$  – mikrobangų antenoje indukuotų triukšmų intensyvumas. Mažo sužadavimo atveju krūvininkų judrio kitimų galima nepaisyti, todėl fotoatsako amplitudė  $U$  yra nusakoma nepusiausvyrų krūvininkų koncentracijos kitimais  $\Delta n$ , – t.y.  $U \sim \Delta n$ . Mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo metodas yra taikytinas mažo sužadavimo, tiesinio mikrobangų atsako režime.

### 2.3 Spektriniai matavimo metodai

Šiame darbe buvo kombinuojami įvairūs spektroskopijos metodai, leidžiantys identifikuoti defektus ir nustatyti jų optinius bei elektrinius parametrus. Defektų identifikavimas yra svarbus tobulinant medžiagų auginimo procesus ir kuriant puslaidininkinių prietaisų veikimo principus bei plečiant jų taikymo galimybes.

C-DLTS (Capacitance – DLTS) yra nenuostoviosios giliųjų lygmenų talpinės spektroskopijos metodas, pagrįstas talpos relaksacijos, sukeltos krūvininkų emisijos procesu, parametrų matavimais [8]. Iš talpos temperatūrinių kitimų spektrų galima įvertinti tokius giliųjų lygmenų parametrus, kaip terminė aktyvacijos energija, krūvininkų pagavimo skerspjūvis bei defektų koncentracija  $N_t$ . I-DLTS spektroskopijoje yra registruojamos krūvininkų emisijos iš giliųjų lygmenų srovės kinetikos, kurių amplitudė priklauso nuo nuskurdintos srities pločio, krūvininkų emisijos trukmės ir defektų tankio  $N_t$ . Čia nėra svarbi sąlyga  $N_t/N_d < 1$ , kaip C-DLTS atveju [9]. Todėl I-DLTS metodas yra tinkamesnis vyraujant sparčiai krūvininkų termoemisijai ir esant dideliems defektų tankiams. I-DLTS metodo didžiausias trūkumas yra tai, jog registruojant srovės kinetikas negalima atskirti šalutinių ir pagrindinių krūvininkų indėlio. Srovės kinetikų poliarumas yra neigiamas nepriklausomai nuo gaudyklės tipo, todėl sudėtinga korektiškai įvertinti pagavimo skerspjūvį ir kitus parametrus. Krūvininkų prilipimo temperatūrinių kitimų (TDTL) metodika gali būti taikoma, kai yra aptinkamos dvikomponentės MW-PC kinetikos [10]. Šis nesąlytinis metodas leidžia įvertinti prilipimo lygmenų terminės aktyvacijos energijas ir koncentracijas net ir esant didelėms taškinių bei išplitusių defektų koncentracijoms, kai standartiniai metodai (DLTS ar termostimuliuotų srovių tyrimai (TSC)) nepritaikytini. Optinių parametrų įvertinimui buvo atlikta fotoluminescencijos (PL) ir impulsinės fotojonizacijos (PPIS) spektroskopija. Fotoluminescencijos tyrimai

suteikia daug informacijos apie krūvininkų spindulinės rekombinacijos mechanizmus. Šiame darbe buvo atliekami nuostoviosios (SS-PL), laike integruotos (TI-PL) ir laikinės skyros (TR-PL) fotoluminescencijos spektriniai tyrimai. Impulsinės fotojonizacijos spektroskopiniams (PPIS) tyrimams krūvininkai buvo sužadinami naudojant derinamo bangos ilgio lazerinę sistemą, o fotoatsakas matuojamas mikrobangų plyšine antena. PPIS matavimai leidžia įvertinti slenkstines defektų fotojonizacijos energijas. Spin-aktyvių defektų identifikavimas atliktas elektronų sukinių rezonanso (ESR) spektroskopiniu būdu. Patalpinus bandinį, turintį nesuporuotų elektronų, į išorinį magnetinį lauką magnetiniai momentai orientuojasi magnetinio lauko arba priešinga magnetiniam laukui kryptimi ir sudaro skirtingos energijos lygmenis, kurių energija priklauso nuo Boro magnetono, magnetinio lauko ir elektrono magnetinių kvantinių skaičių bei  $g$  faktoriaus [11]. Iš ESR spektro struktūros galima identifikuoti defektus, o spektro smailių intensyvumas yra proporcingas defektų koncentracijai. Taip pat atlikti Ramano ir IR spektriniai matavimai. Ramano spektruose yra registruojama netampri žadinančios monochromatinės spinduliuotės sklaida medžiagoje, kuri atsiranda dėl kintančio molekulių poliarizuojamumo [12]. FTIR metodika pagrįsta infraraudonosios (IR) spinduliuotės sąveika su molekulinėmis sistemomis. Molekulėms virpant, jos sugeria fiksuoto spektrinio ruožo IR spinduliuotę. Skirtingos molekulės turi unikalų molekulinių grupių virpėjimo dažnį, o tuo pačiu ir unikalų IR spinduliuotės sugerties spektrą.

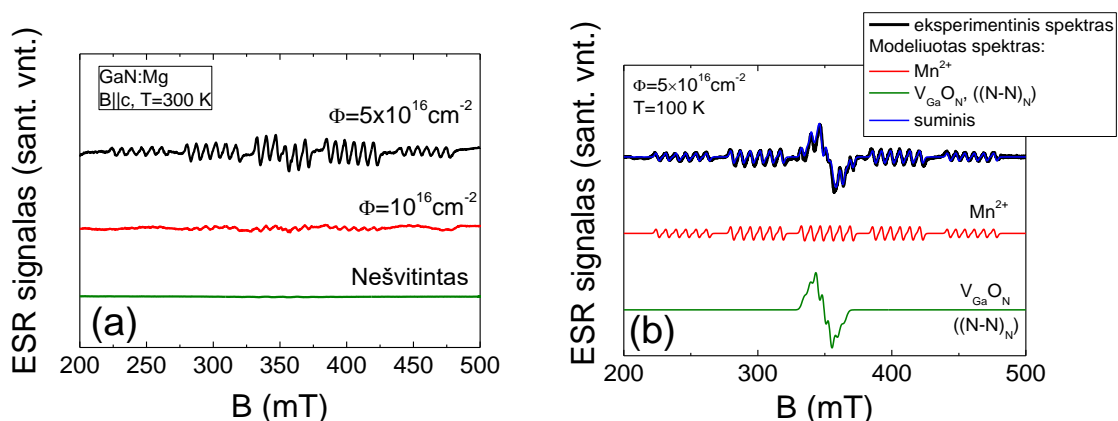
### **3. Eksperimentiniai rezultatai**

#### **3.1. Amonoterminiu būdu užaugintų GaN kristalų tyrimai**

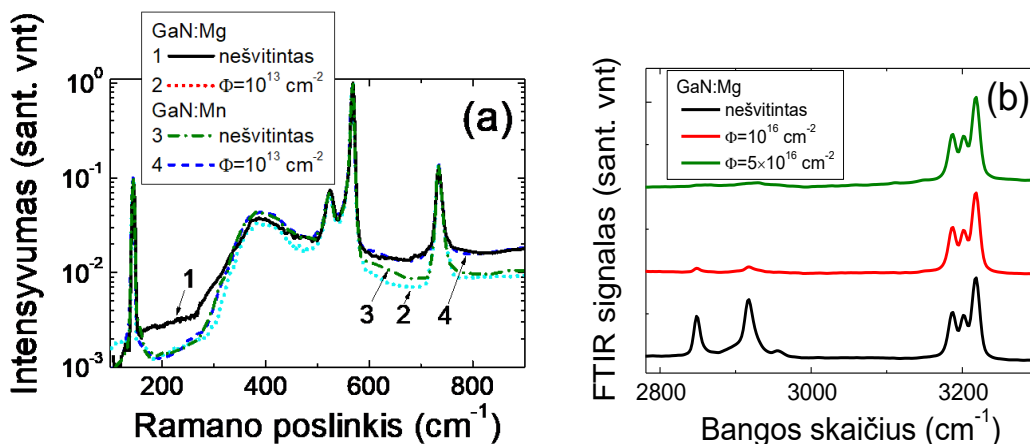
Siekiant amonoterminiu (AT) būdu užauginti pusiau-izoliuojančias GaN medžiagas, tinkamas dalelių detektorių formavimui, buvo pasitelkti Mn (GaN:Mn) arba Mg (GaN:Mg) legirantai. Suformuoti detektoriai buvo apšvitinti reaktoriaus neutronais  $10^{12}$ - $5 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  įteklių srityje. Šių medžiagų ESR spektruose, išmatuotuose kambario temperatūroje, aptikta, kad AT-GaN bandiniuose, apšvitintuose  $\Phi \geq 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  neutronų įtekium, ESR linijos sietinos su  $\text{Mn}^{2+}$  priemaišomis (2 pav.). Išmatavus bandinių, apšvitintų įtekium  $\Phi = 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$ , ESR spektrus žemoje temperatūroje ( $T = 100$  K), esant pakankamai didelei mikrobangų galiai (kad būtų įsotintas  $\text{Mn}^{2+}$  nulemtas spektras), iš hipersmulkiosios ESR spektro struktūros linijų, buvo identifikuota

galio vakansijos ir priemaišinio deguonies atomo kompleksas  $V_{Ga}O_N$  tiek GaN:Mg, tiek GaN:Mn bandinių spektruose [13].

Ramano sklaidos spektruose (3 pav.) nebuvo pastebėta spektrinių linijų pokyčių keičiant apšvitos įtėkį, ir tai rodo, kad net ir po apšvitos dideliais neutronų įtėkiais nėra struktūrinių GaN gardelės pažeidimų. Tiek Mn, tiek Mg legiruotuose bandiniuose identifikuotos tik fononų modos. FTIR spektruose 3150-3250  $cm^{-1}$  srityje (3 pav.) buvo aptiktos smailės priskirtinos Ga vakansijos ir vandenilio defektų kompleksams [14]. Šių modų intensyvumas beveik nepriklauso nuo apšvitos įtėkio. FTIR spektruose 2850-2975  $cm^{-1}$  srityje užregistruotų smailių amplitudė yra žymiai didesnė Mg legiruoto GaN bandinyje ir spektrinių smailių intensyvumas sparčiai mažėja didėjant įtėkiui. Spektrinės linijos šioje srityje sietinos su CH vibracinėmis modomis [15]. Jų pasireiškimas FTIR spektre patvirtina, kad vandenilio atomai yra susieti su anglies atomais.



2 pav. ESR spektrai išmatuoti GaN bandiniuose legiruotuose Mg (a) ir Mn (b).

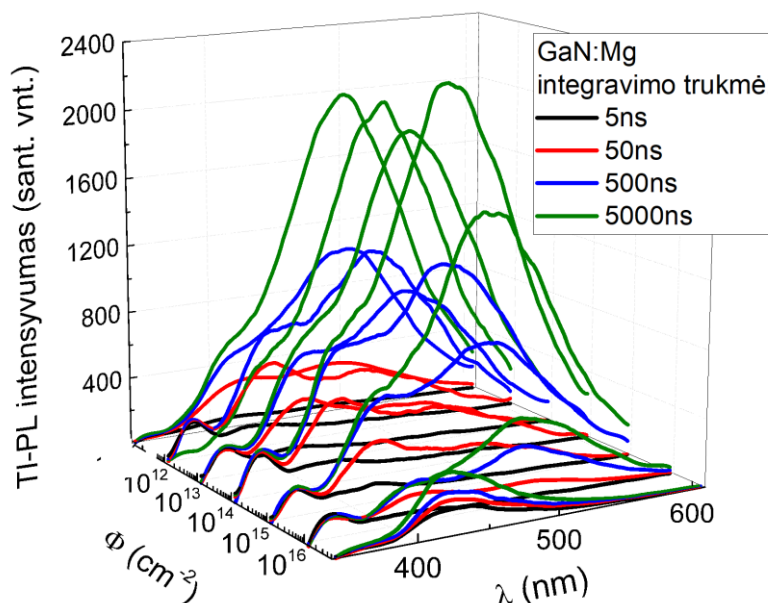


3 pav. Ramano sklaidos (a) ir FTIR (b) spektrai išmatuoti Mg legiruotuose GaN bandiniuose.



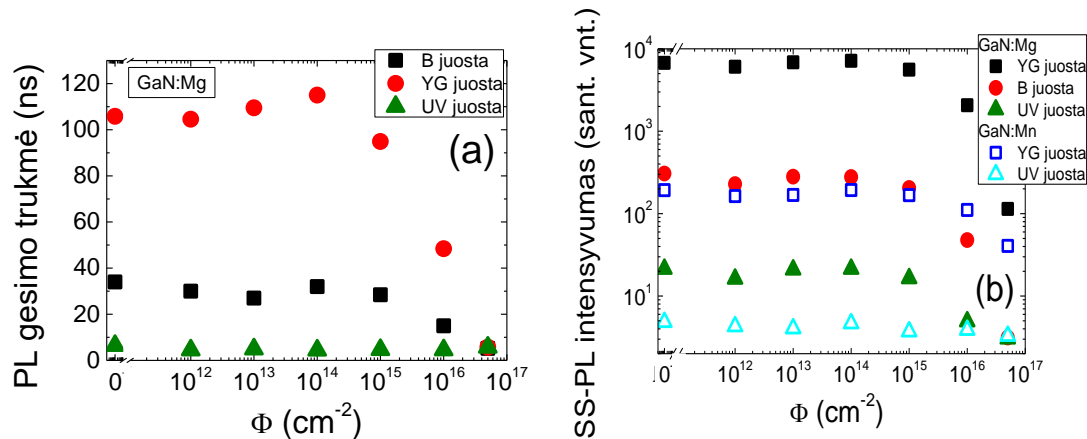
Iš laike integruotos TI-PL spektrų, esant skirtingoms integravimo trukmėms (4 pav.), aptikta, kad fotoluminescencija ultravioletinėje spektro srityje (UV-PL) gęsta sparčiausiai. UV-PL dominuoja spektruose užregistruotuose pasitelkiant trumpiausią integravimo trukmę. PL intensyvumas tiek geltonai-žaliojoje (YG), tiek mėlynojoje (B) GaN PL spektro juostose mažėja, didėjant įtėkiui. YG PL dominuoja spektruose gautuose pasitelkiant ilgą integravimo trukmę. Tai rodo, kad krūvininkų rekombinacija YG PL kanalu yra lėčiausias spindulinės rekombinacijos procesas. PL geltonai-žaliojoje ir mėlynojoje srityse yra sietina su krūvininkų rekombinacija per donor-akeptorinius lygmenis. Manoma, kad galio vakansijos ir deguonies ( $V_{Ga}O_N$ ) kompleksai bei galio vakansijos ir vandenilio defektų ( $V_{Ga}H_N$ ) kompleksai lemia mėlynosios fotoluminescencijos juostą B-PL [16]. YG-PL yra susijusi su anglies defektų ( $C_N$ ) ir anglies-deguonies defektų kompleksais ( $C_NO_N$ ) [17].

Iš laike išskirtos PL kinetikų buvo įvertinta PL gesimo trukmė (trukmės, per kurią intensyvumas sumažėja  $e$  kartų pradinio laiko momento atžvilgiu). Skirtingose spektro srityse šių trukmių kitimai priklauso nuo apšvitos įtėkio (5a pav.). Pastebėta, kad gesimo trukmės pradeda sparčiai mažėti tik esant didesniems nei  $10^{15}$  įtėkiams. Tokie PL atsako kitimai gali būti pasitelkti dozimetrijai plačiame įtėkių intervale.

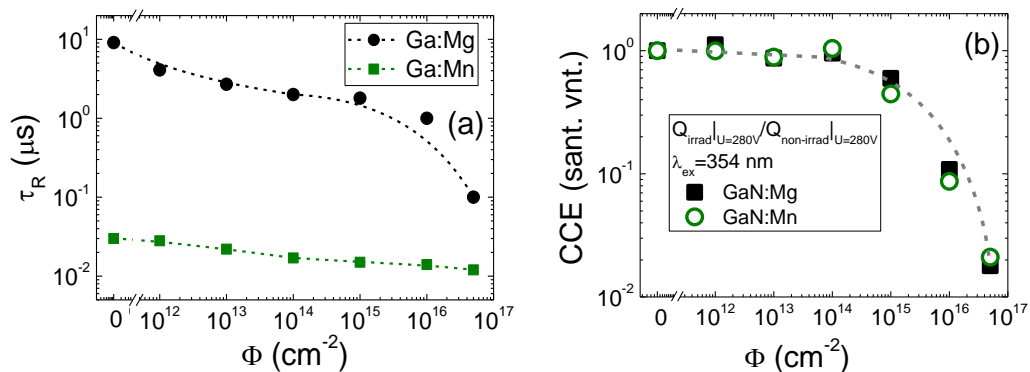


4 pav. TI-PL spektrų evoliucija esant skirtingai TR-PL signalo integravimo trukmei.

SS-PL spektruose didžiausias PL intensyvumas YG srityje, tiek Mn, tiek Mg bandiniuose (5 pav. b). Mažiau intensyvi PL raudonojoje srityje (R-PL). Ši PL spektrinė juosta sietina su Mn legirantais, kurie formuoja akceptorinį (1.8 eV) lygmenį [16]. Iš SS-PL juostų intensyvumo priklausomybės nuo įtėkio, aptikta, kad PL intensyvumas, didėjant įtėkiui, greičiau gęsta Mg legiruotame bandinyje. Tai galima sieti su didesne radiacinių defektų koncentracija, kurie veikia kaip nespindulinės rekombinacijos centrai.



5 pav. PL gesimo trukmių, įvertintų iš TR-PL kinetikų (a), ir PL intensyvumo kitimai (b), priklausantys nuo apšvitos įtėkio.



6 pav. Krūvininkų rekombinacijos trukmės (a) ir krūvio surinkimo efektyvumo (b) kitimai, priklausantys nuo apšvitos įtėkio.

Iš MW-PC kinetikų buvo įvertinti krūvininkų rekombinacijos trukmių kitimai, priklausantys nuo apšvitos įtėkio (6a pav.). Pastebėta, kad Mn priemaišos veikia kaip krūvininkų rekombinacijos centrai, nulemdami trumpą krūvininkų gyvavimo trukmę Mn legiruotuose bandiniuose. Įvertinta, kad Mg legiruotuose bandiniuose  $\tau_R$  sumažėja dviem dydžio eilėmis, o Mn legiruotuose tik tris kartus. Tuo būdu, kaip ir nagrinėjant SS-PL intensyvumo kitimus, galima reziumuoti, kad Mg legiruotame GaN apšvitos metu

sukuriami didesni defektų tankiai. Krūvininkų gyvavimo trukmės kitimai apšvitos metu dažnai būna susiję ir su krūvio surinkimo efektyvumo (CCE) mažėjimu. CCE buvo įvertintas integruojant srovės impulsus kondensatorinio tipo sensoriuose. 6b pav. yra pateiktos CCE vertės normuotos į CCE apskaičiuotą nešvitintam bandiniui, atitinkamai Mn ir Mg legiruotuose bandiniuose. Galima pastebėti, kad CCE mažai kinta po apšvitos vidutiniais įtėkiais. Po apšvitos didžiausiu neutronų įtėkiu CCE sumažėja iki 2% Mg legiruotuose bandiniuose ir iki 7.5% Mn legiruotame GaN.

AT-GaN medžiagos savybės mažai kinta nuo apšvitos didelių neutronų įtėkių ( $\Phi < 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) srityje. Dėl ilgos krūvininkų gyvavimo trukmės, GaN:Mg būtų tinkama medžiaga detektorių, skirtų mažo sąveikos skerspjūvio spinduliuotės registravimui, formavimui. GaN:Mn medžiaga, pasižyminti trumpa krūvininkų gyvavimo trukme, yra tinkama spartaus atsako detektorių formavimui.

### **3.2. MOCVD GaN, užauginto ant Si padėklų, tyrimų rezultatai**

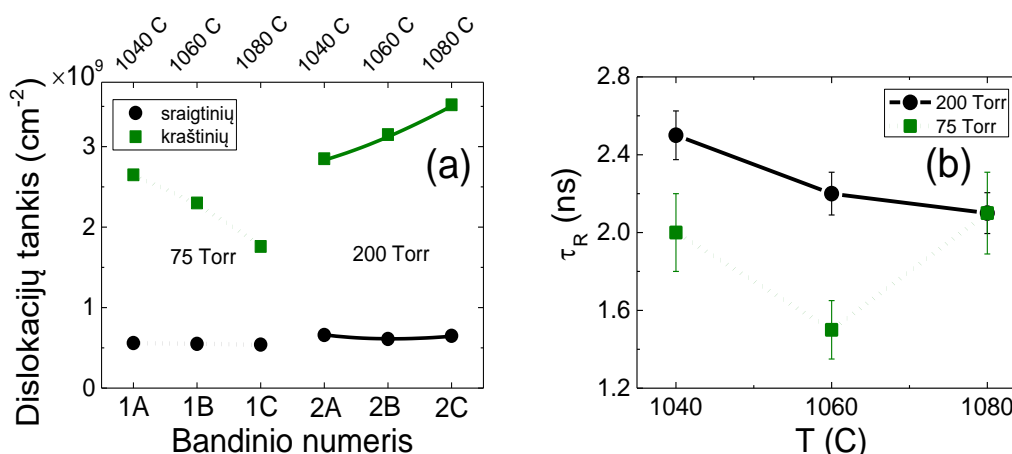
MOCVD būdu auginant GaN epitaksinius sluoksnius ant Si ar safyro padėklų susidaro dideli dislokacijų tankiai ( $10^8$ - $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ). Didelis dislokacijų tankis ir įvairūs taškiniai defektai neužtikrina vienalyčio GaN medžiagos tvarkumo, atitinkančio elektronikos prietaisų gamybai keliamų kokybės standartų. Tačiau epitaksiniai GaN sluoksniai yra perspektyvūs didelio elektronų judrio tranzistorių (HEMT) gamybai. MOCVD struktūros taip pat gali būti pritaikytos plonasluoksnių jonizuojančių spinduliuočių detektorių gamybai.

Šiame darbe ištirti 1  $\mu\text{m}$  storio GaN epitaksiniai sluoksniai užauginti MOCVD būdu ant Si padėklų. Bandiniai buvo užauginti skirtingais režimais IMEC kompanijoje (Lentelė 1). Sluoksnių sandaros ir struktūros įvertinimui buvo atlikti Rentgeno spinduliuotės difrakcijos (XRD) matavimai. Iš difrakcijos refleksų puspločio vertės buvo įvertinti dislokacijų tankiai. Aptikta, kad sraigtinių dislokacijų tankis mažai kinta varijuojant epitaksinio sluoksnio auginimo temperatūrą ir yra nežymiai didesnis sluoksniuose, užaugintuose 200 torų slėgyje, lyginant su 75 torų auginimo režimu (7 pav.). Sluoksniuose, užaugintuose esant 75 torų slėgiui, kraštinių dislokacijų tankis mažėja didinant auginimo temperatūrą. Sluoksniuose užaugintuose esant 200 torų slėgiui aptikta priešinga dislokacijų tankio kitimo tendencija, ir kraštinių dislokacijų tankis didėja keliant

auginimo temperatūrą. Kraštinių dislokacijų tankio mažėjimas, esant 75 torų slėgiui ir didinant temperatūrą, gali būti nulemtas lėtesnio sluoksnio augimo greičio. Esant didesniam slėgiui, kraštinių dislokacijų tankis didėja, keliant temperatūrą, dėl parazitinių nešančiųjų dujų reakcijų [18], kurios nulemia didesnę GaN defektiškumą. Iš MW-PC kinetikų buvo gauta, kad labai trumpos krūvininkų gyvavimo trukmės yra nulemtos krūvininkų rekombinacijos kristalinėse GaN srityse.

Lentelė 1. GaN auginimo temperatūra ir slėgis.

Temperatūra Slėgis	1040 °C	1060 °C	1080 °C
75 Torr	Bandinys 1A	Bandinys 1B	Bandinys 1C
200 Torr	Bandinys 2A	Bandinys 2B	Bandinys 2C



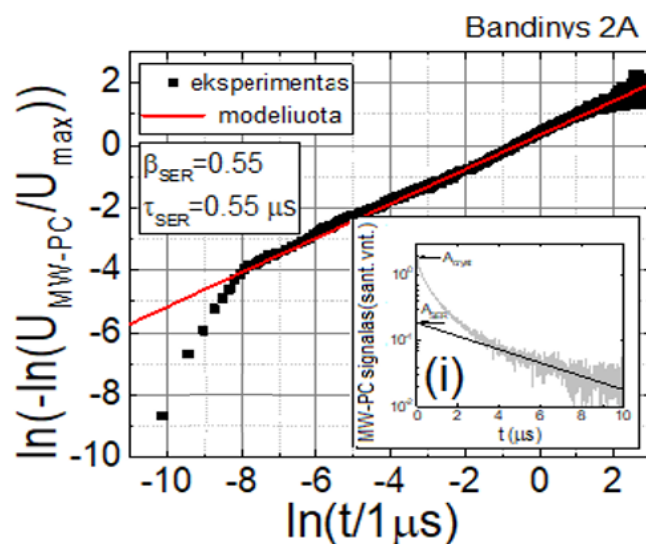
7 pav. Dislokacijų tankio (a) ir krūvininkų rekombinacijos trukmių (b) kitimai varijuojant auginimo režimus.

Krūvininkų relaksacijos MW-PC kinetikos yra dvi-komponentės (8 pav.) šiuose MOCVD GaN:Si bandiniuose. Lėtasis MW-PC kinetikos sandas yra sąlygotas krūvininkų rekombinacijos netvarkioje, tarpkristalitinėje GaN srityje, kur yra išplitęs dislokacijų tinklas. Tokios kinetikos aprašomos tiesinės rekombinacijos ir ištęstosios eksponentės rekombinacijos modeliu, kristalituose ir dislokaciniuose tinkluose, atitinkamai:

$$n(t) \cong n_0 \left\{ \frac{A_{cryst}}{A_{exc spot}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) + \frac{A_{TD}}{A_{exc spot}} \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_{SER}}\right)^{\beta_{SER}}\right) \right\}, \quad (4)$$

Čia eksponentės rodiklis  $\beta_{SER}$  yra sietinas su fraktaliniu indeksu, nusakančiu medžiagos netvarkumo pobūdį. Rekombinacijos ir sričių tūrių gaudyklių parametrai buvo įvertinti iš kinetikos pradinio sando ir asimptotinės dalies amplitudės bei atsižvelgiant į vidutinį atstumą tarp dislokacijų, t.y. kristalinių sričių diametrą (~200nm). Dvigubo logaritmo

MW-PC signalą atvaizdavus  $\ln(t/1\mu\text{s})$  mastelyje, tiesės polinkis nurodo  $\beta_{SER}$  (8 pav.). Tokia relaksacija yra sietina su atsitiktinių klaidžiojimų procesu, būdingu netvarkioms struktūroms, kai krūvininkų rekombinacija yra ribota krūvininkų pagava chaotiškai pasiskirsčiusiose gaudyklėse.

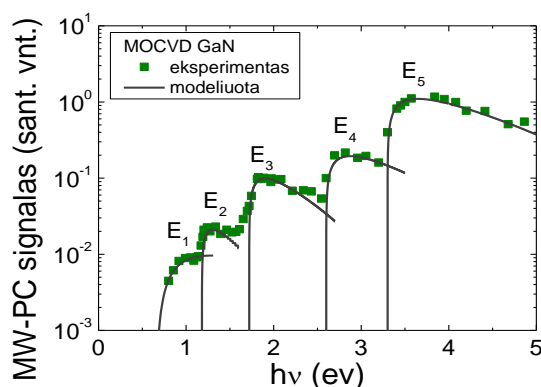


8 pav. Eksperimentinė MW-PC kinetika (juodi taškai) ir asimptotinis kinetikos sandas sumodeliuotas remiantis iššęstosios eksponentės modeliu (raudona linija).

MOCVD GaN:Si dariniuose netvarkią medžiagos struktūrą sudaro tarpkristaliniai didelio tankio ( $>10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) dislokacijų tinklai. Asimptotinės relaksacijos trukmės  $\tau_{SER}$  buvo įvertintos iš modeliųjų kreivių susikirtimo taško (Lentelė 2). Asimptotinės relaksacijos trukmės ir  $\beta_{SER}$  vertė priklauso nuo bandinių auginimo režimų ir, tuo pačiu, nuo dislokacijų tankio. Kuo artimesnė vienetui  $\beta_{SER}$  rodiklio vertė, tuo mažesnis kristalo defektiškumas. Taigi šis  $\beta_{SER}$  rodiklis mažėja didėjant dislokacijų tankiui. Taip pat iššęstosios eksponentės dėsnio vykstančios relaksacijos trukmė  $\tau_{SER}$  mažėja didėjant dislokacijų tankiui.

Lentelė 2. Iššęstosios eksponentės rodiklis ir asimptotinio gesimo trukmė skirtingiems bandiniams.

Bandinio nr.	Slėgis/ temperatūra	$A_{cryst}/A_{exc spot}$	$A_{TD}/A_{exc spot}$	$\tau_{SER}$ ( $\mu\text{s}$ )	$\beta_{SER}$
2A	200 Torr/1040 °C	0.91	0.09	0.55	0.55
2B	200 Torr/1060 °C	0.89	0.11	0.50	0.49
2C	200 Torr/1080 °C	0.91	0.09	0.40	0.45
1A	75 Torr/1040 °C	0.89	0.11	0.20	0.47
1B	75 Torr/1060 °C	0.92	0.08	0.30	0.50
1C	75 Torr/1080 °C	0.89	0.11	0.60	0.64



9 pav. Eksperimentiškai išmatuotas (taškai) ir sumodeliuotas (pilkos linijos) PPIS spektras.

Lentelė 3. PPIS spektre identifikuotų lygmenų fotojonizacijos energijos vertės ir priskirtų defektų tipai.

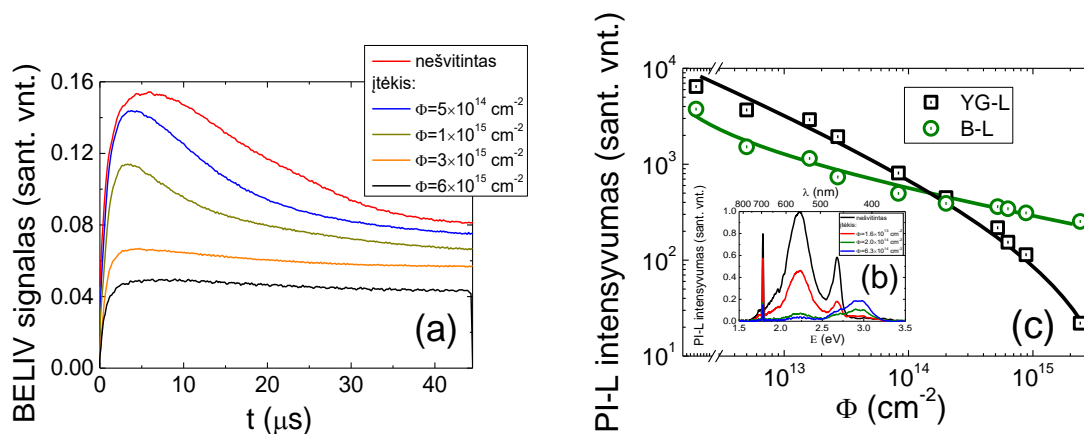
MOCVD GaN		
	Fotojonizacijos energija (eV)	Defekto tipas
E <sub>1</sub>	0.7	V <sub>Ga</sub> <sup>-</sup>
E <sub>2</sub>	1.2	N <sub>Ga</sub>
E <sub>3</sub>	1.7	V <sub>Ga</sub> O <sub>N</sub>
E <sub>4</sub>	2.6	C <sub>N</sub>
E <sub>5</sub>	3.3	C <sub>N</sub> O <sub>N</sub>

Taškiniai defektai, nulemiantys trypas krūvininkų gyvavimo trukmes, buvo identifikuoti modeliuojant PPIS spektrą (9 pav.) ir pasitelkiant literatūrinės išmatuotų PPIS parametrų verčių atitiktis. Taškiniai defektai, sietini su PPIS laipteliais, buvo priskirti vakansijų, azoto ir anglies defektams bei jų kompleksams su deguonimi (Lentelė 3) [17,19].

### 3.3. Protonų pluoštelio sužadintos liuminescencijos ir BELIV charakteristikų *in situ* kitimai

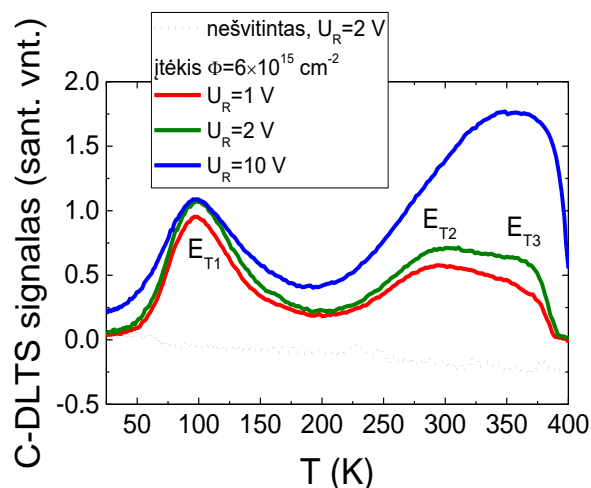
Detektorių charakteristikų evoliucija buvo iširta registruojant charakteristikų kitimus apšvitės metu (*in situ*). *In situ* matavimai buvo atlikti komercinių šviestukų pagrindu pagamintuose MOCVD GaN detektoriuose, apšvitinant 1.6 MeV energijos protonų pluoštelio. MOCVD GaN šviestukai yra GaN meza struktūros su kvantinių duobių sluoksniu. Spinduliuočių detektoriai iš komercinių GaN šviestukų buvo suformuoti pašalinant šviesos ištrūkų elementus ir atjungiant Zenerio diodus. Tokia šviestuko struktūra, pridėjus užtvarinę įtampą, veikia kaip dalelių sensorius.

Apšvitos metu buvo registruojamas protonų indukuotas liuminescencijos (PI-L) spektras ir talpos kitimų kinetika, veikiant tiesiškai kintančios įtampos impulsams (BELIV). PI-L spektras buvo pasitelktas MOCVD GaN radiaciniam atsparumui įvertinti. Trumpo jungimo srovės *in situ* kitimai leido įvertinti protonų srautą. BELIV charakteristikų kitimai leido stebėti generacinės srovės (dėl krūvininkų emisijos iš radiacinių defektų) *in situ* augimą proporcingą protonų įtėkiui. Iš BELIV matavimų (10a pav.) taip pat buvo įvertintas barjerinės talpos mažėjimas didėjant įtėkiui, kai radiacijos sukuriama defektai mažina efektyviąją legirantų koncentraciją, dėl sukuriamų kompensacinių centrų. Protonais indukuotos liuminescencijos spektre (10b pav.) aptiktos dvi spektrinės juostos, būdingos GaN B ir YG liuminescencijai, sietinai su krūvininkų rekombinacija per donorų ir akceptorinių poras ir anglies defektų lygmenis [17]. Šiuose spektruose (10b pav.) galima pastebėti, kad didėjant protonų įtėkiui, liuminescencijos intensyvumas mažėja. Didėjant įtėkiui, stebimas PI-L intensyvumo didėjimas violetinės liuminescencijos spektro ruože. Liuminescencija šioje srityje sietina su spinduliuotės sukuriamų vakansijų koncentracijos didėjimu [20]. Spektre taip pat matoma dar viena siaura smailė raudonojoje spektro srityje, kuri priskiriama protonais sukeltai liuminescencijai safyro padėkle.



10 pav. BELIV kinetika (a) ir PI-L spektrai (b) išmatuoti *in situ* protonų apšvitos metu. (c) – YG ir B liuminescencijos intensyvumo kitimai didėjant apšvitos įtėkiui.

*Ex situ* tyrimuose buvo atlikti DLTS spektrų (11 pav.) matavimai, iš kurių įvertinti seklių radiacinių defektų energijų lygmenys draustinių energijų tarpe,  $N_{tr}$  ir krūvininkų pagavimo šiais centrai skerspjūviai  $\sigma$  (Lentelė 4).



11 pav. DLTS spektrai.

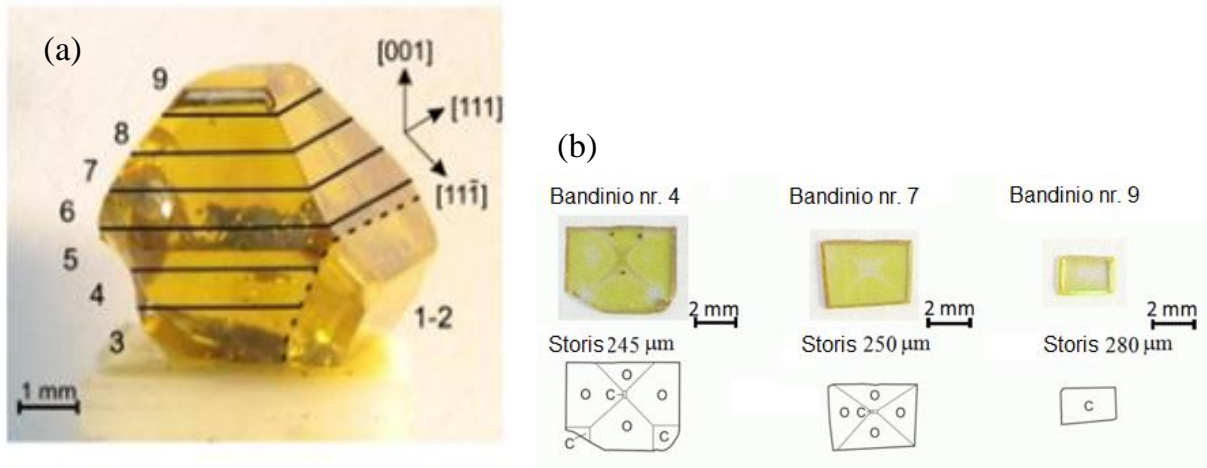
Lentelė 4. Defektų, identifikuotų DLTS spektruose, parametrai:  $E_C-E_T$  – energija draustinių juostų tarpe atskaitoma nuo laidumo juostos dugno,  $N_T$  – defektų koncentracija,  $\sigma$  – pagavimo skerspjūvis.

Lygmuo	$E_C-E_T$ (eV)	$N_T$ (cm <sup>-3</sup> )	$\sigma$ (cm <sup>2</sup> )
E <sub>T1</sub>	0.08	$2.6 \times 10^{15}$	$2 \times 10^{-18}$
E <sub>T2</sub>	0.45	$2 \times 10^{15}$	$6 \times 10^{-16}$
E <sub>T3</sub>	0.62	$1.8 \times 10^{15}$	$2 \times 10^{-13}$

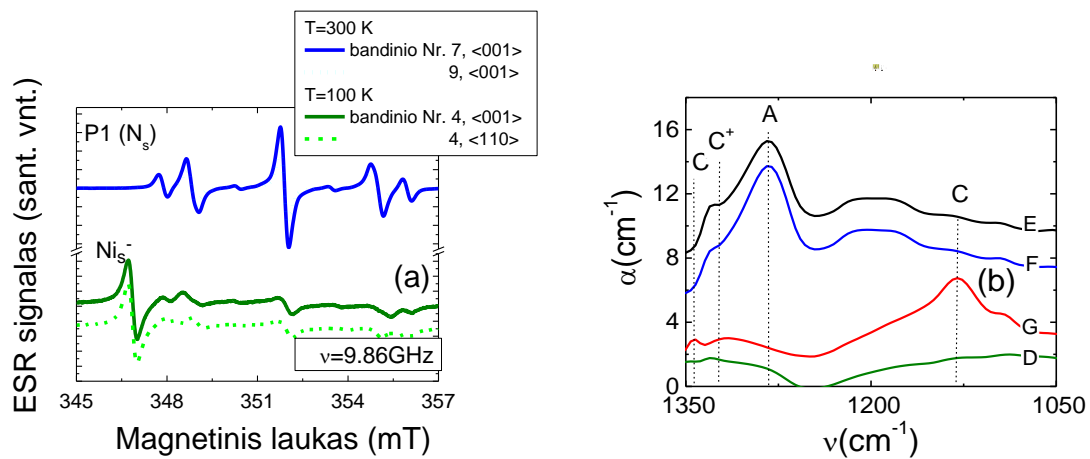
### 3.4. HPHT ir CVD deimanto tyrimai

Deimantas pasižymi dar geresniais medžiagos parametrais nei GaN, ir yra perspektyvi medžiaga dalelių detektoriams, galios prietaisams bei įvairiems jutikliams. Defektų deimante tyrimai yra aktualūs ir kvantinės kompiuterijos taikymams, pavyzdžiui, azoto ir vakansijos kompleksas (NV centras) gali būti panaudotas ateities kvantinių kompiuterių kubitu, – pagrindiniu kvantinio skaičiavimo vienetu. Dalis tiriamų deimanto bandinių buvo susintetinti didelio slėgio ir aukštos temperatūros (HPHT) technologija, kitas bandinių rinkinys buvo suformuotas cheminio garų nusodinimo (CVD) technologija. HPHT deimantas buvo susintetintas 4.5-5.0 GPa slėgio ir 1350-1450 °C temperatūros režime naudojant Ni-Fe katalizatorius. Metalinių katalizatorių naudojimas, auginant HPHT metodu, lemia dideles metalinių priemaišų koncentracijas HPHT deimante. Iš užauginto HPHT deimanto kristalo (12a pav.) buvo paruošti 9 bandiniai, ir dalies jų parametrai yra pateikti 12b pav. Taip pat buvo ištirtos pramoniniu būdu CVD metodu užauginto deimanto 3×3 mm<sup>2</sup> ploto ir 500 μm storio plokštelės.





12 pav. HPHT deimanto kristalas ir bandinių supjaustymo schema (a) bei išpjautų bandinių parametrai (b).

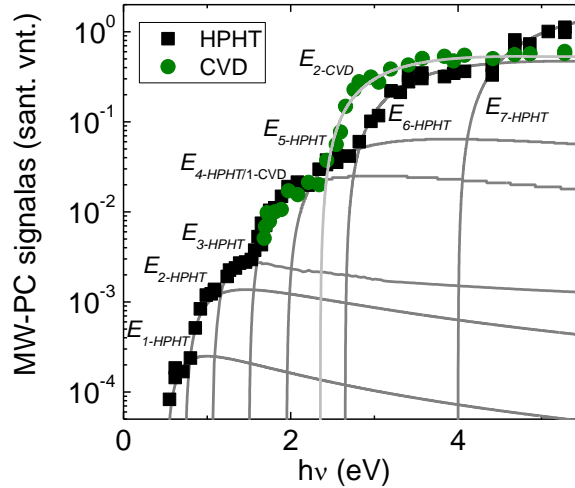


13 pav. ESR (a) ir FTIR (b) spektrai išmatuoti HPHT bandiniuose.

Iš ESR spektrų (13a pav.) buvo įvertintos nikelio (Ni) ir azoto (N) priemaišų koncentracijos HPHT deimanto bandiniuose [13]. FTIR spektrų smailės (13b pav.) yra priskirtinos azoto defektams, kurių koncentracija buvo įvertinta skirtingos morfologijos srityse (Lentelė 5).

Lentelė 5. Defektų koncentracijos, įvertintos iš ESR ir FTIR spektrų, HPHT deimanto bandiniuose.

Defekto tipas	Matavimo metodas	Bandinio nr.4	Bandinio nr.7	Bandinio nr.9		
		Defektų koncentracija $\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$				
$P1(N)$	ESR	24	22	12		
$P_{Ni}$	ESR	0.19	0.14	0.054		
Vieta bandinyje						
		D	F	G	Centrinė sritis	Centrinė sritis
C	FTIR	-	-	22	3.6	9.1
A	FTIR	-	23	-	37.0	11.0
$C^+$	FTIR	-	3	1	1.4	-



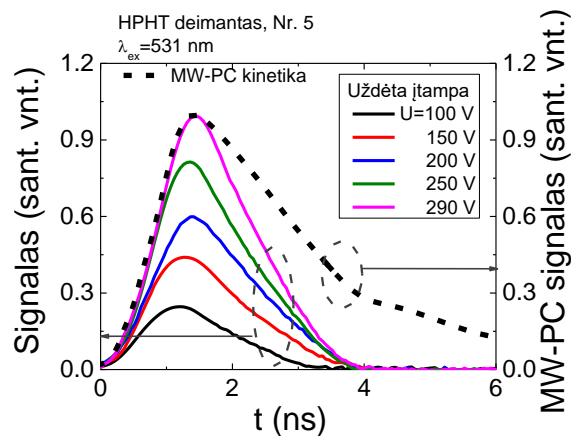
14 pav. Eksperimentiškai išmatuoti (taškai) ir sumodeliuoti (pilkos linijos) PPIS spektrai HPHT ir CVD deimante

Lentelė 6. PPIS spektrų laipteliai ir jiems priskiriami defektai HPHT ir CVD deimante.

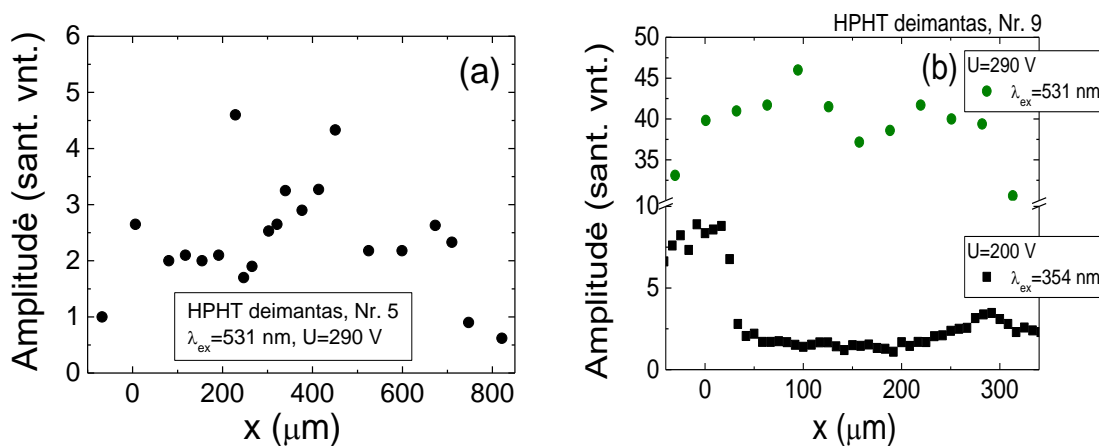
Fotojonizacijos energija (eV)	Defekto tipas
$E_{1-HPHT}=0.52$	a-C
$E_{2-HPHT}=0.74$	a-C
$E_{3-HPHT}=1.1$	a-C
$E_{4-HPHT}=1.5$	a-C
$E_{5-HPHT}=1.97$	N-V
$E_{6-HPHT}=2.67$	N-VNiV-N
$E_{7-HPHT}=4.00$	Ni, N <sub>2</sub> -VNi-N <sub>2</sub>
$E_{1-CVD}=1.5$	a-C
$E_{2-CVD}=2.37$	N subst.

CVD deimanto bandiniuose defektų koncentracijos yra mažesnės už ESR ir FTIR metodais įvertinamą slenkstinę defektų detektavimo ribą. Tačiau, iš impulsinės fotojonizacijos (PPIS) spektrų (14 pav.), pavyko įvertinti fotoaktyvacijos energijas ir, remiantis literatūros duomenimis, buvo identifikuoti defektai ir HPHT ir CVD deimante (Lentelė 6) [13,21].

Srovių kinetikų tyrimams, plokštelių formos deimanto bandiniai buvo metalizuojami bei lengvai suspaudžiami tarp elektrodinių aikštelių, suformuotų juostelinės linijos schemoje, pagamintoje elektrocheminio spausdinimo būdu. Taip buvo suformuoti kondensatorinio tipo detektoriai.



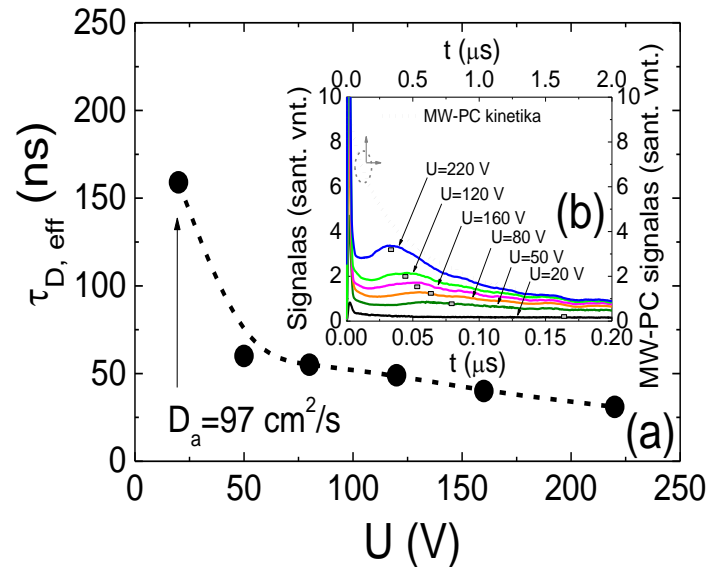
15 pav. Srovės kinetikų kitimai varijuojant pridėtą įtampą.



16 pav. Srovės smailės amplitudės, įvertintos iš srovės kinetikų išmatuotų skenuojant HPHT deimanto bandinio briauną oktaedrinės (a) ir kubinės (b) morfologijos kristaluose Nr. 5 ir Nr. 9, atitinkamai..

HPHT deimanto bandinyje Nr. 5., B implantacijos būdu buvo suformuotos kontaktų salelės, kurių plotas  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ . 15 pav. iliustruojamos srovės kinetikos išmatuotos HPHT deimanto bandinyje Nr. 5. Pradinis sandas yra priskirtinas bipoliam dreifui, o impulso pabaigoje pasireiškia gana trumpas difuzijos sandas, persiklojantis su bipolio dreifo srovės sandu. Siekiant sumažinti difuzijos įtaką, srovės kinetikos buvo matuojamos keičiant sužadinimo lokalizaciją tarp-elektrodinėje srityje, t.y. fokusuotu juostele pluošteliu skenuojant bandinio briauną. Srovės smailės amplitudžių kitimas, įvertintas srovių kinetikas skenuojant HPHT deimanto Nr. 5 briaunoje, yra nemonotoniškas (16 pav.). Amplitudžių profiliai atspindi defektų pasiskirstymą bandinio gylyje, – šis bandinys pasižymi didelėmis defektų koncentracijomis. Palyginti, HPHT deimanto bandinio Nr. 9., kuriame defektų koncentracijos yra gana mažos, srovės verčių pasiskirstymas yra homogeniškesnis nei bandinio Nr. 5. Didelės defektų koncentracijos

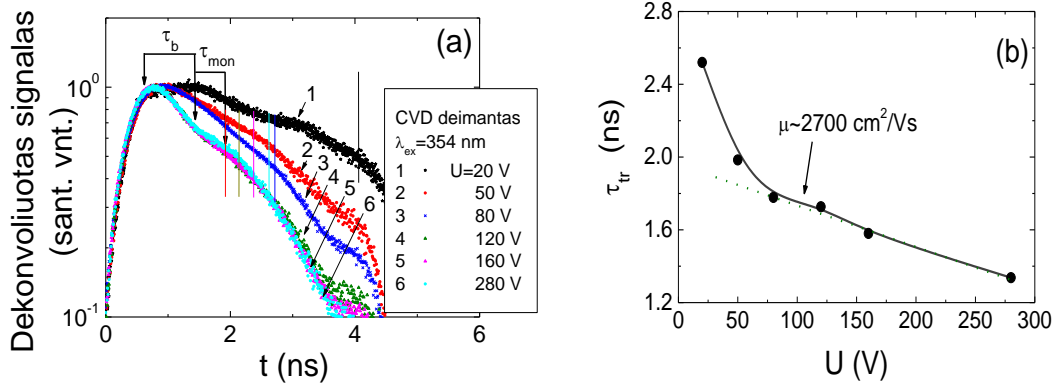
taip pat nulemia trumpą krūvininkų gyvavimo trukmę. Todėl, dėl mažesnės rekombinacinių centrų koncentracijos, dreifo-difuzijos srovių amplitudžių vertės yra didesnės bandinyje Nr. 9.



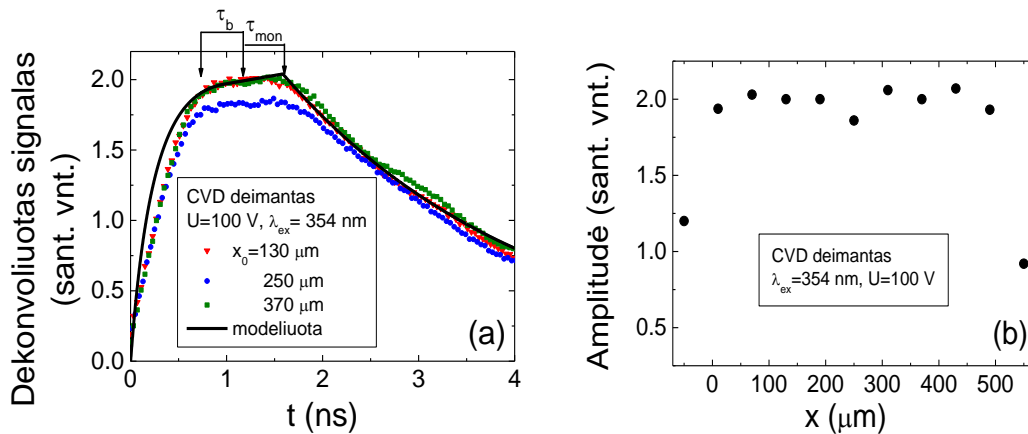
17 pav. Efektyvių tranzito trukmių kitimas nuo pridėtos įtampos (a) ir dekonvoliutos srovių kinetikos (b).

Srovės kinetikų profiliavimo metodika gali būti pritaikyta krūvininkų transporto parametrų įvertinti tik kai krūvininkų rekombinacijos procesai yra nereikšmingi. Kadangi HPHT deimante krūvininkų gyvavimo trukmė yra labai trumpa (2-4 ns), transporto parametrų įvertinimas tampa negalimas. CVD deimante krūvininkų rekombinacijos trukmė ( $>100 \text{ ns}$ ) yra žymiai ilgesnė už dreifo ir difuzijos trukmes. Kinetikose, išmatuotose keičiant pridėtą įtampą (18a pav.), matomi dreifo ir difuzijos srovės sandai. Iš dreifo ir difuzijos sandų kitimų, varijuojant pridėtą įtampą, buvo įvertinta efektyvi difuzijos sando trukmė  $\tau_{D, eff}$  ir gauta difuzijos koeficiento vertė yra  $97 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Srovės kinetikų profiliavimas, varijuojant įtampą, leidžia įvertinti krūvininkų judrį. Srovių kinetikos buvo dekonvoliuojamos siekiant eliminuoti elektrinės grandinės vėlinimų įtaką. Dekonvoliutuose srovės kinetikose (18a pav.) buvo įvertintos bipolio dreifo pereinančio į monopolį dreifą trukmės. Tokia impulsų analizė galima, kol nepasireiškia difuzijos sandas (kai  $U < 50 \text{ V}$ ). Iš tranzito trukmių priklausomybės nuo įtampos buvo įvertintas krūvininkų judris, ir tokiu būdu gautos krūvininkų judrių vertės yra  $\mu_e \approx \mu_h \approx 2470 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (18b pav.).



18 pav. Dekonvoliutos srovių kinetikos (a) ir efektyvių tranzito trukmių kitimas, varijuojant pridėtą įtampą (b).



19 pav. Dekonvoliutos srovės kinetikos išmatuotos esant skirtingai sužadavimo lokalizacijai tarp-elektrodinėje srityje (a) ir smailinės srovės verčių pasiskirstymas gautas iš srovės kinetikų išmatuotų skenuojant CVD deimanto bandinio briauną (b).

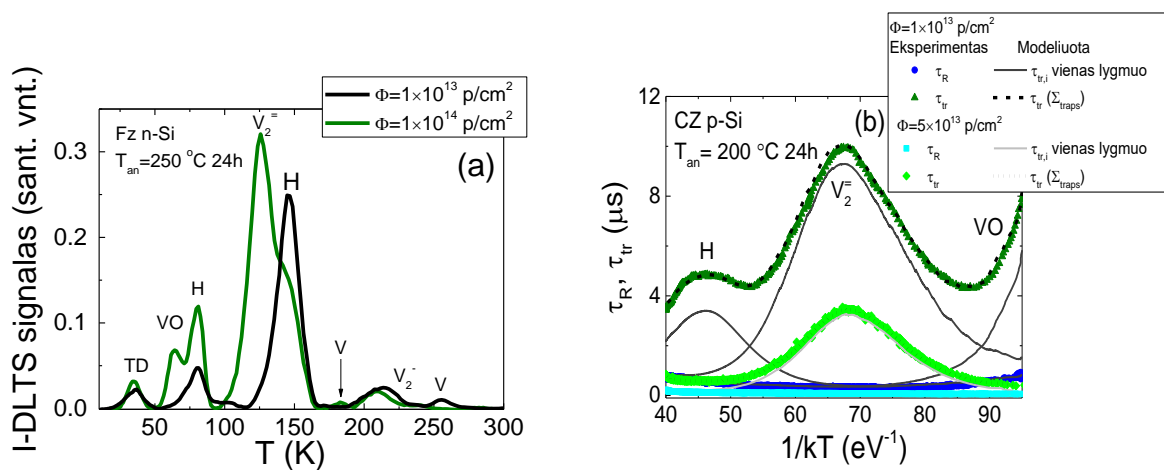
Skenuojant srovės impulsų kitimus CVD deimante, keičiant sužadavimo pluoštelio lokalizaciją, buvo gautas profilis su gana plokščia viršūne (19. pav.). Dekonvoliutu srovės kinetikų forma taip pat yra artima stačiakampiui impulsui ir tai parodo, kad difuzijos įtakos galima nepaisyti. Įvertinta dreifo trukmė yra artima tranzito trukmei, įvertintai iš srovės kinetikų, išmatuotų varijuojant pridėtą įtampą. Tai patvirtina, kad skenavimo režime vyrauja bipolinis dreifas, o judrio vertės yra artimos gautoms profiliuojant srovės kinetikas keičiama įtampa. Srovių amplitudžių vertės skenuojant sužadavimo lokalizacija tarp-elektrodinėje srityje beveik nekinta, tai patvirtina, kad CVD deimanto bandinys yra homogeniškas.

### 3.5. Dideliu hadronų įtėkiu apšvitinto Si spektroskopija

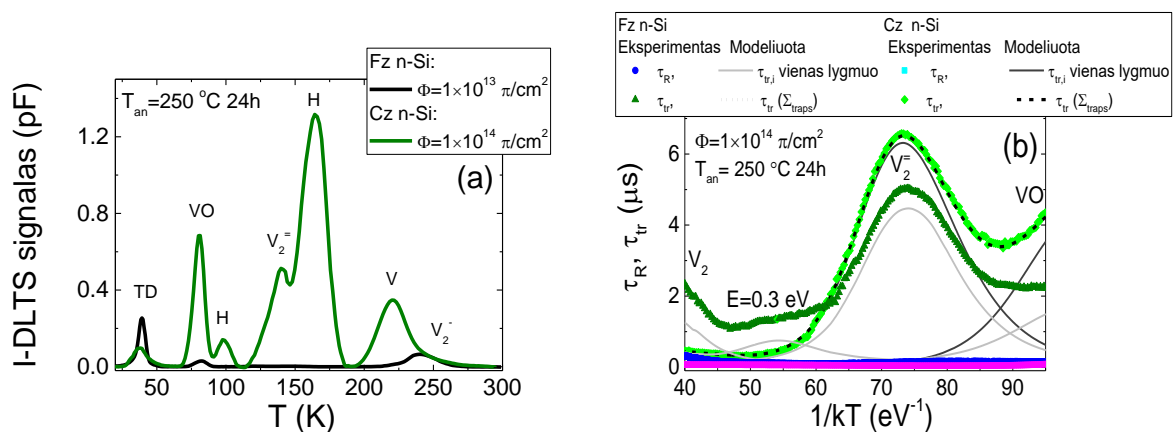
Si bandiniai, užauginti Czochralski (CZ) ir zoninio lydimo (Float zone, FZ) metodu buvo apšvitinti protonais ir pionais įtėkiais, siekiančiais vertes iki  $\Phi=3\times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  ir  $\Phi=3\times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , atitinkamai (Lentelė 7). Bandiniai buvo izochoriškai (24 val.) iškaitinti iki 300 °C temperatūros.

Lentelė 7. Si bandinių bei apšvitos protonais ir pionais parametrai.

Apšvitos tipas	Protonai (p)		Pionai ( $\pi^+$ )	
Energija	24 GeV/c		300 MeV/c	
Įtėkiai	$10^{12}$ - $3\times 10^{16} \text{ p/cm}^2$		$10^{11}$ - $3\times 10^{15} \pi^+/\text{cm}^2$	
Si medžiaga	FZ n-Si	CZ p-Si	CZ n-Si	FZ n-Si
Legirantų koncentracija	$10^{12} \text{ cm}^{-3}$	$10^{12} \text{ cm}^{-3}$	$10^{12} \text{ cm}^{-3}$	$10^{12} \text{ cm}^{-3}$



20 pav. I-DLTS (a) ir TDTL (b) spektrai išmatuoti protonais apšvitintuose ir iškaitintuose Si bandiniuose.



21 pav. I-DLTS (a) ir TDTL (b) spektrai išmatuoti pionais apšvitintuose ir iškaitintuose Si bandiniuose.

Lentelė 8. Defektų aktyvacijos energijos ir priskirti defektai, bei defektų koncentracijų kitimas, varijuojant iškaitinimo temperatūrą, pionais apšvitintuose ir iškaitintuose Si bandiniuose.

Aktyvacijos energija (eV)	Defekto identifikacija	Iškaitinimo temperatūra	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
			$\Phi=3 \times 10^{13} \pi^+/\text{cm}^2$			
		Bandinys	Prilipimo centrų koncentracija ( $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )			
0.36±0.02	V <sub>2</sub> <sup>0</sup>	CZ n-Si	8	13	25	5
		FZ n-Si	2	6	12	20
0.25±0.01	V <sub>2</sub> <sup>=</sup>	CZ n-Si	7	15	20	20
		FZ n-Si	2	7	14	18
0.18±0.01	VO	CZ n-Si	0.2	0.2	0.2	0.6
		FZ n-Si	0.4	0.7	0.8	1

Nedideliais protonų įtėkiais apšvitintuose *n*-laidumo tipo Si bandiniuose buvo išmatuoti I-DLTS spektrai, kurie leido įvertinti radiacinių defektų parametrus (20a pav.) [22,23]. Tačiau dideliu įtėkiu apšvitintuose *p*-laidumo tipo bandiniuose defektų identifikavimas DLTS metodika tampa negalimas dėl itin didelių defektų koncentracijų, todėl buvo pritaikytas krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų (TDTL) metodas. Pastarieji tyrimai leido nustatyti defektų termoaktyvacijos energijas ir defektų koncentracijas (21b pav.).

I-DLTS ir TDTL tyrimai buvo atlikti ir pionais apšvitintuose Si bandiniuose (21 pav.). Iš I-DLTS spektrų, išmatuotų pionais apšvitintuose bandiniuose, pastebėta, kad vyrauja tokie pat defektai, kaip ir apšvitintuose protonais.

Radiacinių defektų koncentracija, varijuojant iškaitinimo temperatūrą, kinta nemonotoniškai (Lentelė 8). Apibendrinta šių kitimų tendencija rodo taškinių defektų koncentracijos didėjimą keliant iškaitinimo temperatūrai, – tai galima sieti su defektų klasterių išsikaitinimu.

#### 4. Išvados

1. Amonoterminiu būdu užauginto GaN elektrinės ir optinės charakteristikos mažai kinta didinant apšvitos neutronais įtekį iki  $\Phi=10^{15}$  cm<sup>-2</sup> verčių. Vakansijų ir jų kompleksai yra vyraujantys defektai dideliu neutronų įtekiu apšvitintuose AT-GaN kristaluose.
2. Iš MW-PC kinetikų įvertintas išėstosios eksponentės rodiklis  $\beta_{SER}$  yra sietinas su MOCVD GaN medžiagos tvarkumo kitimais. Didėjant dislokacijų tankiui  $\beta_{SER}$  rodiklio vertė mažėja. Tai rodo medžiagos tvarkumo mažėjimą. Asimptotinės relaksacijos trukmių mažėjimas, didėjant dislokacijų tankiui, yra sietinas su vyraujančia krūvininkų rekombinacija per dislokacijų kamieno lygmenis.
3. Krūvininkų rekombinacijos trukmės, nulemtos procesų kristalitinėse GaN srityse, yra artimos išmatuotoms PL asimptotinio gesimo trukmėms. Iš PPIS spektrų įvertinta, kad dominuojantys defektai MOCVD GaN epitaksiniuose sluoksniuose yra vakansijos, azoto Ga mazge ir anglies defektai.
4. Aptikti BELIV kinetikų ir protonų indukuotos liuminescencijos *in situ* kitimai rodo, kad komercinio šviestuko pagrindu pagamintas meza MOCVD GaN sensorius yra tinkamas detektuoti elektrinius ir optinius apšvitos indukuotus signalus.
5. Berjerinės talpos ir protonais indukuotos liuminescencijos mažėjimas yra proporcingas radiacinių defektų koncentracijai. Ši priklausomybė gali būti pasitelkta didelių įteklių dozimetrijai.
6. Išvystytas dinaminis modelis srovių impulsų kitimų nagrinėjimui sroves profiliuojant išorinio šaltinio įtampa arba keičiant krūvio injekcijos lokalizaciją tarp elektrodinėje kondensatorinių sensorių. Šis modelis leidžia vienareikšmiškai išskirti injektuoto krūvio domenų rekombinacijos, difuzijos ir dreifo srovių sandus.
7. Suformuojant kondensatorinio tipo sensorius iš plačiatarpių puslaidininkinių bandinių, ir registruojant indukuoto krūvio srovės impulsines charakteristikas buvo įvertinti krūvininkų judrio bei difuzijos parametrus.
8. Krūvininkų prilipimo trukmių temperatūrinių kitimų (TDTL) ir I-DLTS metodai leidžia identifikuoti radiacinių defektų parametrus ir klasterių išsikaitinimo efektus net ir dideliu hadronų įtekiu apšvitintuose Si bandiniuose.



## 5. Publikacijų sąrašas

### **Straipsniai žurnaluose įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) sąrašą:**

- [A1] E. Gaubas, T. Ceponis, D. Meskauskaite and N. Kazuchits, Profiling of current transients in capacitor type diamond sensors, *Sensors* 15, (2015) 13424.
- [A2] E. Gaubas, T. Ceponis, D. Meskauskaite, R. Grigonis and V. Sirutkaitis, Spectroscopy of defects in HPHT and CVD diamond by ESR and pulsed photo-ionization measurements, *J. Instrum.* 11, (2016) C01017.
- [A3] E. Gaubas, T. Ceponis, D. Meskauskaite and E. Simoen, Comparative study of current transients in HPHT and CVD diamond capacitor-sensors, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5, (2016) P3101.
- [A4] E. Gaubas, T. Ceponis, L. Deveikis, D. Meskauskaite, S. Miasojedovas, J. Mickevicius, J. Pavlov, K. Pukas, J. Vaitkus, M. Velicka, M. Zajac and R. Kucharski, Study of neutron irradiated structures of ammonothermal GaN, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 50, (2017) 135102.
- [A5] E. Gaubas, T. Ceponis, D. Dobrovolskas, T. Malinauskas, D. Meskauskaite, S. Miasojedovas, J. Mickevicius, J. Pavlov, V. Rumbauskas, E. Simoen and M. Zhao, Study of recombination characteristics in MOCVD grown GaN epi-layers on Si, *Semicond. Sci. Technol.* 32, (2017) 125014.
- [A6] E. Gaubas, T. Ceponis, L. Deveikis, D. Meskauskaite, J. Pavlov, V. Rumbauskas, J. Vaitkus, M. Moll and F. Ravotti, Anneal induced transformations of defects in hadron irradiated Si wafers and Schottky diodes, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 75, (2018) 157.

### **Straipsniai periodiniuose recenzuojamuose mokslo žurnaluose:**

- [A7] D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, J. Pavlov and V. Rumbauskas, Characteristics of 1.6 MeV proton-irradiated GaN-based sensors, *RAD Assoc. J.* 2, (2017) 118.

### **Pranešimai konferencijose:**

- P1. D. Meskauskaite, T. Ceponis, E. Gaubas, J. Vaitkus, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, Spectroscopy of defects in HPHT and CVD diamond by EPR and pulsed photo-ionization measurements. 17th International Workshop on Radiation Imaging Detectors; Hamburg, 2015.
- P2. T. Ceponis, E. Gaubas, D. Meskauskaite, Comparative study of current transients in HPHT and CVD diamond capacitor type sensors. 17th International Workshop on Radiation Imaging Detectors; Hamburg, 2015.
- P3. J. Pavlov, T. Ceponis, E. Gaubas, D. Meskauskaite, I. Reklaitis, J. Vaitkus, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, Comparative study of deep levels in HVPE and MOCVD GaN by combining O-DLTS and pulsed photo-ionization spectroscopy. 17th International Workshop on Radiation Imaging Detectors; Hamburg, 2015.
- P4. D. Meskauskaite, T. Ceponis, E. Gaubas, Srovės kinetikų profiliavimas deimanto kondensatorinio tipo dalelių detektoriuose. 6th Conference of Young Scientists

- “Interdisciplinary investigations in Physical and Technological Science”; Vilnius, 2016.
- P5. V. Rumbauskas, D. Meskauskaite, T. Ceponis, E. Gaubas, Elektronais apšvitintų n- ir p- tipo Si bandinių mikrobangomis zondojuojamo fotolaidumo temperatūrinių kitimų ir DLTS tyrimai. 6th Conference of Young Scientists “Interdisciplinary investigations in Physical and Technological Science”; Vilnius, 2016.
- P6. D. Meskauskaite, T. Ceponis, E. Gaubas, Study of GaN material and radiation sensor structures. 18th International Workshop on Radiation Imaging Detectors; Barcelona, 2016.
- P7. V. Rumbauskas, D. Meskauskaite, T. Ceponis, E. Gaubas, Anneal induced transforms of radiation defects in heavily electron irradiated silicon. 18th International Workshops on Radiation Imaging Detectors; Barcelona, 2016.
- P8. D. Meskauskaitė, E. Gaubas, T. Ceponis, L. Deveikis, S. Miasojedovas, J. Mickevičius, J. Pavlov, K. Pūkas, J. Vaitkus, M. Zajac, R. Kucharski, Amonoterminiu būdu užauginto GaN tyrimai. 7th Conference of Young Scientists “Interdisciplinary investigations in Physical and Technological Science”; Vilnius, 2017.
- P9. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, V. Rumbauskas, J. Vaitkus, Anneal induced transforms of radiation defects in heavily irradiated Si detectors. German Physical Society Spring Meeting; Dresden, 2017.
- P10. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, J. Pavlov, V. Rumbauskas, J. Vaitkus, M. Moll, F. Ravotti, C. Gallrapp, L. Makarenko, Anneal induced transforms of radiation defects in hadron and electron irradiated Si. RD50-30th Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders; Krakow, 2017.
- P11. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, L. Deveikis, J. Pavlov, K. Pukas, Evolution of GaN-based sensor characteristics during proton irradiation. 5th International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research; Budva, 2017.
- P12. L. Deveikis, T. Ceponis, E. Gaubas, D. Meškauskaitė, J. Pavlov, V. Rumbauskas, Iškaitinimų nulemtos radiacinių defektų transformacijos elektronais, protonais ir pionais apšvitintuose Si dariniuose. 42th Lithuanian National Physics Conference; Vilnius, 2017.
- P13. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, J. Pavlov, V. Rumbauskas, Radiacinių defektų įtakos GaN spinduliuočių jutiklių charakteristikų kaitai tyrimai. 42th Lithuanian National Physics Conference; Vilnius, 2017.
- P14. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, J. Pavlov, V. Rumbauskas, J. Vaitkus, M. Moll, F. Ravotti, Si and GaN for large fluence irradiation monitoring. AIDA-2020 WP15 satellite meeting during 6th BTTB Workshop; Zurich, 2018.
- P15. D. Meskauskaite, E. Gaubas, T. Ceponis, J. Pavlov, V. Rumbauskas, S. M. Otajonov, N. E. Alimov, Comparative analysis of GaN and CdTe thin films for radiation detectors. 6th International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research; Ohrid, 2018.

## 6. Summary

GaN and diamond materials are two of the most promising WBG semiconductors for fabrication of radiation tolerant particle detectors. Therefore, characterization of defects is of paramount importance in evaluation of the material suitability for production of particle detectors. Experimental results presented in this thesis have been obtained by using PL, DLTS, MW-PC and other methods. In order to analyse radiation-induced defects, GaN samples were irradiated by neutrons with fluences up to  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . *In situ* measurements during proton irradiation were performed by combining the optical (PI-L) and electrical (BELIV) methods in order to analyse the performance of thin MOCVD epilayer GaN-based sensors during irradiation by 1.6 MeV protons. The transient current technique (TCT) measurements allow a direct evaluation of the most important parameters. In this work, the depth-distribution of native defects in diamond wafers has been identified within the profiles of current transients measured by scanning location of a focused injection beam. Despite significant progress in development of WBG semiconductors based detectors, Si is the most used semiconductor for tracking detectors at CERN. In this work, the annealing-induced transformations of defects in heavily irradiated Si have been studied by combining the current-mode deep-level transient spectroscopy and the temperature dependent carrier trapping lifetime techniques.

## 7. Informacija apie autorių

<b>Vardas ir pavardė</b>	Dovilė Meškauskaitė	
<b>Išsilavinimas</b>	1996 – 2008 m.	Vidurinis išsilavinimas, Panevėžio „Ąžuolo“ vidurinė mokykla
	2008 – 2012 m.	Fizikos bakalauras, Taikomoji fizika, Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas
	2012 – 2014 m.	Fizikos magistras, Medžiagotyra ir puslaidininkių fizika, Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas. Magna Cum Laude diplomas.
	2014 – 2018 m.	Doktorantūros studijos, Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas
<b>Darbo patirtis</b>	2012 – 2014 m.	Praktikantė Taikomųjų mokslų institute
	2014 – 2015 m.	Inžinierė Taikomųjų mokslų institute
	Nuo 2015 m.	Jaunesnioji mokslo darbuotoja Taikomųjų mokslų institute (Pavadinimas nuo 2017 rugsėjo: Fotonikos ir nanotechnologijų institutas)
<b>Stažuotės</b>	2013-07-01 – 2013-09-30	Nacionalinis medžiagotyros institutas, Bukareštas, Rumunija
	2014-11-23 – 2014-11-29	Branduolinių tyrimų centras (CERN), Ženeva, Šveicarija
	2015-08-24 – 2015-08-27	Helsinkio universiteto greitintuvų laboratorija, Helsinkis, Suomija.
<b>Apdovanojimai</b>	2017-02-09	Lietuvos mokslų akademijos ir INFOBALT asociacijos apdovanojimas už geriausią konferencijos „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose“ pranešimą „Amonoterminiu būdu užauginto GaN tyrimai“
	2017-07-17	Apdovanojimas už geriausią konferencijos „Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2017)“ pranešimų pagrindu parengtą publikaciją „Evolution of GaN-based sensor characteristics during proton irradiation“.
<b>Publikacijos</b>	15 straipsnių, įtrauktų į ISI duomenų bazę, 22 pranešimų konferencijose	

## 8. Literatūros nuorodų sąrašas

- [1] K. Takahashi, A.A. Yoshikawa, A. Sandhu, Wide bandgap semiconductors: fundamental properties and modern photonic and electronic devices, Springer, 2007.
- [2] S. Fujita, Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54 (2015) 30101. doi:10.7567/JJAP.54.030101.
- [3] P.J. Sellin, J. Vaitkus, New materials for radiation hard semiconductor detectors, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 557 (2006) 479–489. doi:10.1016/j.nima.2005.10.128.
- [4] M. Moll, Radiation tolerant semiconductor sensors for tracking detectors, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 565 (2006) 202–211. doi:10.1016/j.nima.2006.05.001.
- [5] Z. Li, E. Verbitskaya, V. Eremin, A. Ivanov, J. Harkonen, E. Tuovinen, P. Luukka, Detector recovery/improvement via elevated-temperature-annealing (DRIVE): a new approach for Si detector applications in high radiation environment in SLHC, in: *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. 2005*, IEEE, n.d.: pp. 1106–1111. doi:10.1109/NSSMIC.2005.1596445.
- [6] E. Gaubas, T. Čeponis, J. Kusakovskij, Profiling of barrier capacitance and spreading resistance using a transient linearly increasing voltage technique, *Rev. Sci. Instrum.* 82 (2011) 83304. doi:10.1063/1.3626796.
- [7] E. Gaubas, A. Kaniava, Determination of recombination parameters in silicon wafers by transient microwave absorption, *Rev. Sci. Instrum.* 67 (1998) 2339. doi:10.1063/1.1146943.
- [8] D. V. Lang, Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *J. Appl. Phys.* 45 (1974) 3023–3032.
- [9] Z. Li, Systematic modelling and comparisons of capacitance and current-based microscopic defect analysis techniques for measurements of high-resistivity silicon detectors after irradiation, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 403 (1998) 399–416. doi:10.1016/S0168-9002(97)01099-1.
- [10] E. Gaubas, E. Simoen, J. Vanhellefont, Review—Carrier lifetime spectroscopy for defect characterization in semiconductor materials and devices, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5 (2016) P3108–P3137. doi:10.1149/2.0201604jss.
- [11] K.M. Salikhov, N.E. Zavoiskaya, Zavoisky and the discovery of EPR, *Resonance.* 20 (2015) 963–968. doi:10.1007/s12045-015-0264-6.
- [12] D.J. Gardiner, P.R. Graves, *Practical Raman Spectroscopy*, Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- [13] A. Yelisseyev, Y. Babich, V. Nadolinny, D. Fisher, B. Feigelson, Spectroscopic study of HPHT synthetic diamonds, as grown at 1500°C, *Diam. Relat. Mater.* 11 (2002) 22–37. doi:10.1016/S0925-9635(01)00526-X.
- [14] S. Suihkonen, S. Pimputkar, J.S. Speck, S. Nakamura, Infrared absorption of

- hydrogen-related defects in ammonothermal GaN, *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) 202105. doi:10.1063/1.4952388.
- [15] M.O. Manasreh, J.M. Baranowski, K. Pakula, H.X. Jiang, J. Lin, Localized vibrational modes of carbon-hydrogen complexes in GaN, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 659. doi:10.1063/1.124473.
- [16] M.A. Reshchikov, H. Morkoç, Luminescence properties of defects in GaN, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 61301. doi:10.1063/1.1868059.
- [17] M.A. Reshchikov, D.O. Demchenko, A. Usikov, H. Helava, Y. Makarov, Carbon defects as sources of the green and yellow luminescence bands in undoped GaN, *Phys. Rev. B.* 90 (2014) 235203. doi:10.1103/PhysRevB.90.235203.
- [18] J.R. Creighton, W.G. Breiland, M.E. Coltrin, R.P. Pawlowski, Gas-phase nanoparticle formation during AlGaIn metalorganic vapor phase epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 2626–2628. doi:10.1063/1.1510580.
- [19] H. Tang, Z.Q. Fang, S. Rolfe, J.A. Bardwell, S. Raymond, Growth kinetics and electronic properties of unintentionally doped semi-insulating GaN on SiC and high-resistivity GaN on sapphire grown by ammonia molecular-beam epitaxy, *J. Appl. Phys.* 107 (2010) 103701. doi:10.1063/1.3415527.
- [20] N. Nepal, M.L. Nakarmi, J.Y. Lin, H.X. Jiang, Photoluminescence studies of impurity transitions in AlGaIn alloys, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 92107. doi:10.1063/1.2337856.
- [21] K. Iakubovskii, G.J. Adriaenssens, Optical detection of defect centers in CVD diamond, *Diam. Relat. Mater.* 9 (2000) 1349–1356. doi:10.1016/S0925-9635(00)00248-X.
- [22] I. Pintlilie, G. Lindstroem, A. Junkes, E. Fretwurst, Radiation-induced point- and cluster-related defects with strong impact on damage properties of silicon detectors, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 611 (2009) 52–68. doi:10.1016/j.nima.2009.09.065.
- [23] L. Fedina, A. Gutakovskii, A. Aseev, J. Van Landuyt, J. Vanhellefont, Extended Defects Formation in Si Crystals by Clustering of Intrinsic Point Defects Studied by in-situ Electron Irradiation in an HREM, *Phys. Status Solidi.* 171 (1999) 147–158. doi:10.1002/(SICI)1521-396X(199901)171:1<147::AID-PSSA147>3.0.CO;2-U.