

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Jevgenij Pavlov

**Detektorių dariniai didelio defektų tankio silicyje ir spartaus atsako
plačiatarpiuose puslaidininkiuose**

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

Vilnius 2016

Disertacija rengta 2012-2016 metais Vilniaus universiteto Fizikos fakultete ir Taikomųjų mokslų institute.

Mokslinis vadovas – habil. dr. Eugenijus Gaubas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08 T)

Disertacija ginama jungtinėje Vilniaus universiteto ir FTMC Medžiagų inžinerijos mokslo krypties taryboje:

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

Nariai:

Prof. habil. dr. Artūrs Medvids (Rygos technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);

Doc. dr. Artūras Plukis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika– 02P);

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

Doc. dr. Bonifacas Vengalis (Fizinių ir technologijų mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama 2016 m. rugsėjo 19 d. 14⁰⁰ val. B336 auditorijoje Nacionaliniame fizinių ir technologijų mokslų centre, Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2016 m. rugpjūčio 17 d.

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

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

Jevgenij Pavlov

**Detector structures on defect-rich silicon and fast-response wide-gap
semiconductor materials**

Summary of doctoral dissertation

Technological Science, Material Engineering (08 T)

Vilnius 2016

Doctoral dissertation was prepared during period of 2012-2016 years at Vilnius University Faculty of Physics and Institute of Applied Research

Supervisor – Prof. Dr. Sc. Eugenijus Gaubas (Vilnius University, Technological Sciences, Material Engineering – 08 T).

Thesis defended at the united Vilnius University and CPST Physics research council:

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

Members:

Prof. Dr. Sc Artūrs Medvids (Ryga Technical University, Science of technology, Material engineering – 08T);

Doc. Dr. Artūras Plukis (Vilnius University, Physical science, Physic – 02P);

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

Doc. Dr. Bonifacas Vengalis (Center of Physical Science and Technology, Science of technology, Material engineering – 08T).

The dissertation will be defended on 19th of September in 201, 2 PM in auditorium Nr. B336 in National Center of Physical Science and Technology, Saulėtekio av. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania.

Summary of dissertation sent on 17th of August in 2016.

The dissertation is available at Vilnius University, Center of Physical science and technology libraries and on internet: www.vu.lt/lt/naujienos/ivikiu-kalendorius

Trumpinių sąrašas.

- LHC – Large Hadron Collider (Didysis hadronų greitintuvas)
- MOCVD – metal organic chemical vapour deposition (metaloorganinis nusodinimas iš garų fazės)
- CERN – European Organization for Nuclear Research (Europos branduolinių mokslinių tyrimų organizacija)
- TSC – thermally stimulated current (šiluma skatinama srovė)
- DLTS – deep level transient spectroscopy (giliųjų lygmenų spektroskopija)
- MW – microwave (mikrobangos)
- TCT – transient current technique (srovės kinetikų metodika)
- HPHT – high pressure-high temperature (aukšto slėgio aukštos temperatūros)
- HTLP – high temperature-low pressure (aukšto slėgio žemos temperatūros)
- CVD – chemical vapour deposition (cheminis nusodinimas iš garų fazės)
- HVPE – hydride vapour phase epitaxy (epitaksija iš hidrido garų fazės)
- PPI – pulsed photo-ionization (impulsinė fotojonizacija)
- BELIV – barrier evaluation by linearly increasing voltage (impulsinis barjerinės talpos elektrinio srovių matavimo metodas pridėjus tiesiškai augančią įtampą)
- FTIR – Fourier transform infrared spectroscopy (Furjė infraraudonoji spektroskopija)
- SEM – scanning electron microscope (skenuojantis elektroninis mikroskopas)
- MW-PC – microwave probed photoconductivity (mikrobangomis zonduojamas fotolaidumas)
- TR-PL – time resolved photoluminescence (laike išskirta fotoluminescencija)
- C-DLTS – capacitance DLTS (talpos giliųjų lygmenų spektroskopija)
- I-DLTS – current DLTS (srovės giliųjų lygmenų spektroskopija)
- O-DLTS –optical current DLTS (optiškai žadinama giliųjų lygmenų spektroskopija)
- OPO – optical parametric oscillator (Optinis parametrinis osciliatorius)
- DFG – differential frequency generators (skirtuminių dažnių generatorius)
- XRD – X-ray diffraction (Rentgeno spindulių difrakcija)
- ESR – electron spin resonance (elektronų sukinių rezonansas)
- SER – stretched-exponential relaxation (išstętosios eksponentės relaksacija)
- ICDC – injected charge domain drift current (injektuoto krūvio domeno nulemta dreifo srovė)
- PCB – printed circuit board (spausdintinė montažinė plokštė)
- MCZ – magnetic Czochralski (magnetinio Čochralskio)
- S-R-H – Shockley-Read-Hall

Įvadas

Tyrimų aktualumas ir tikslas. Apšvitoms atsparių, sparčių, saulės šviesos “neakinamų” sensorių poreikis elektronikos grandynuose, taikomuose medicinoje, kosmoso tyrimuose ir gynybos pramonėje, skatina naujų medžiagų paiešką sensorių formavimui. Šioje kryptyje taip pat svarbi naujų medžiagų kokybės kontrolės metodų ir sensorių architektūros bei funkcionavimo režimų paieška. Naujai sintezuojamose medžiagose įprastai gausu technologinių defektų dėl naujų sintezės metodų netobulumo. Kosmoso, aukštųjų energijų fizikos priešakiniuose taikymuose, moderniosios medicinos diagnostikoje ir terapijoje, branduolinėse jėgainėse spinduliuočių sensorius veikia itin intensyvios ir medžiagą ardančios apšvitos. Tokių detektorių funkcionavimui ir formavimui yra bendras bruožas,- tai didelio defektų tankio dariniai. Tokiose struktūrose ir sensorių savybių evoliucijoje, jiems veikiant, tenka ieškoti savitų veikos režimų, defektų pasyvavimo būdų bei detektuojamų signalų sustiprinimo priemonių.

Silicyje, kaip tobuliausiai technologiškai išvystytoje medžiagoje, labiausiai pasireiškia radiaciniai defektai. Silicis turi ir kitų trūkumų: dėl gana mažo draustinių energijų tarpo Si sensoriuose yra ženkli nuotėkio srovė, ir tokie sensoriai tinka tik elektrinių signalų registravimui. Šie trūkumai yra ženkliai mažesni plačiatarpiuose puslaidininkiuose, tokiuose kaip sintetinis deimantas ir GaN. Tiesiatarpiuose binariniuose junginiuose yra efektyvi liuminescencija, todėl galimas tiek optinių, tiek elektrinių signalų detektavimas. Dėl neefektyvios tarpjuostinės šiluminės generacijos pastarųjų medžiagų sensoriuose yra žymiai mažesnės nuotėkio srovės. Dėl GaN ir deimanto medžiagų gardelės sanklodos, dėl mažų Fano faktoriaus verčių, šios medžiagos turėtų būti žymiai tolerantiškesnės, lyginant su Si, radiacinėms pažeidoms. Tai daro aktualiais šių plačiatarpių puslaidininkių medžiagotyrimus nagrinėjimus ir sensorių formavimo technologijos vystymus. Visgi sintetinio deimanto ir GaN medžiagų auginimo ir sensorių formavimo technologijos daugeliu aspektų netenkina reikalavimų, keliamų kokybiškų dalelių detektorių gamybai. Todėl iškyla visa seka iššūkių ir sprendinių uždavinių, siekiant sukurti spinduliuočių sensorius šių medžiagų pagrindu, kurie būtų spartaus atsako, radiacijai atsparūs, ilgaveikiai, mažų nuotėkio srovių, tinkami platesniems taikymams medicinoje, aukštųjų energijų fizikoje, kosminiuose tyrimuose. Sensorių projektavime ir formavime plačiatarpiuose dariniuose taip pat iškyla visa seka prieštaringų sprendinių iškilusiems iššūkiams išspręsti. Taip mažo skerspjūvio sąveikų signalams registruoti reikia gana didelio storio detektorių, tačiau tam būtinos homogeniškos medžiagos santykinai dideliame tūryje. Didelio technologinių defektų tankio medžiagose, defektų elektrinio aktyvumo suvaldymui tenka įterpti kompensuojančias priemaišas, kurios veikia kaip sparčios rekombinacijos centrai, ir elektrinis sensoriaus signalas nebeatspindi detektuojamų spinduliuočių sukurtų elektron-skylinių porų dreifo. Dideli radiacinių defektų tankiai, susidarantys detektorių veikimo metu, ženkliai sumažina efektines legirantų koncentracijas, ir nuskurdinimo srities (tuo pačiu

sandūrinio prietaiso) valdymas išorine įtampa tampa komplikuoatas, - dažnai tai pasireiškia kaip prietaiso tipo pokytis, ir diodas virsta prastu kondensatoriumi arba kvazi-tiristoriumi. Plačiatarpėse medžiagose dėl mažos savitosios krūvininkų koncentracijaos bei kristalo sandaros pasireiškia poliarizacijos efektai, kurie mažina sensorių signalus. Todėl, siekiant surasti kompromisinius sprendimus modernių ir specifinių savybių sensorių sukūrimui, būtina surasti naujus technologinius, metodinius, defektų inžinerijos ir sensorių konstravimo būdus.

Uždaviniai. Šis darbas buvo nukreiptas efektyvių spinduliuočių sensorių veikos režimų, detektorių formavimo technologijos ir tinkamiausių medžiagų paieškai siekiant sukurti greitaveikius, radiacijai atsparius ir dvigubo (optinio ir elektrinio) atsako sensorius aukštųjų energijų spinduliuočių registravimui.

Šio tikslo įgyvendinimui buvo koncentruotasi spręsti tokiems uždaviniams:

- technologinių ir radiacinių defektų spektroskopijai, kombinuojant keletą metodų, įvairiapusiškam ir patikimam įvairios technologijos (HPHT, CVD) sintetinio deimanto bei (MOCVD, HVPE) GaN išeties medžiagų charakterizavimui plačiame defektų ir efektinio legiravimo koncentracijų diapazone;
- technologinių procedūrų (sudarant sandūras, pasyvuojančius sluoksnius ir elektrodus) įtakos funkcinėms sensorių charakteristikoms įvertinimui, nagrinėjant Si darinius kaip modelines sensorių struktūras;
- radiacinių defektų formavimosi evoliucijos įvairios technologijos Si dozimetriniuose sensoriuose tyrimams apšvitų reaktoriaus neutronais, protonais ir pionais poveikyje plačiame įtėkių intervale (nuo 10^{11} iki 10^{16} cm^{-2}), ieškant efektyvių radiacinių defektų iškaitinimo režimų;
- elektrinių ir liuminescencijos charakteristikų evoliucijos GaN bei CdS medžiagose studijai apšvitos aukštųjų energijų protonais metu;
- analitinių modelių ir modeliavimo algoritmų sukūrimui, siekiant adekvačiai aprašyti impulsinio elektrinio lauko persiskirstymo ir srovės sandų susidarymo dinamiką impulsinių detektorių signalų formavime dėl spinduliuotėmis sukurtų antrinių krūvininkų porų dreifo, difuzijos bei rekombinacijos;
- impulsinių sensorių signalų profiliavimo metodikų sukūrimui, skenuojant krūvininkų injekcijos pozicijas bei išorinio šaltinio įtampos vertes, siekiant įvertinti krūvininkų rekombinacijos, terminės emisijos, difuzijos bei dreifo procesų dominavimo režimus bei išmatuoti krūvininkų transporto parametrus, o taip pat išanalizuoti poliarizacinių efektų dinamiką plačiatarpėse medžiagose;
- bandomųjų technologijų sandūrinių ir kondensatorinio tipo sensorių sukūrimui įvairios technologijos GaN ir sintetinio deimanto medžiagose.

Mokslinis naujumas. Nepaisant silicio darinių technologijos ištobulinimo, didelių įtėkių aukštųjų energijų spinduliuočių detektorių, gaminamų Si pagrindu, funkcionalumo trukmės padidinimui tenka nagrinėti radiacinių

defektų pasyvavimo, defektų sąveikos ir jų poveikio sensorių funkciniams parametrams problemas. Siekiant atpiginti dozimetrijos sensorių Si pagrindu gamybą ir išplėsti jų taikymų galimybes, ieškoma naujų defektų inžinerijos būdų detektorių ilgaamžiškumui padidinti arba pasitelkti pigesnės technologijos medžiagas reikiamų detektavimo funkcijų realizavimui. Tam būtina sukurti būdus radiacinių defektų formavimosi apšvitos metu evoliucijai tirti, išnagrinėti radiacinių defektų iškaitinimo galimybes ir jų realizavimo režimus. Iš kitos pusės, silicis ir jo pagrindu suformuoti spinduliuočių sensoriai išlieka modeline medžiaga nagrinėjant signalų detektavimo ypatumus didelio savitųjų ir radiacinių defektų tankio detektoriuose. Šiame darbe atlikta visa seka tyrimų, pasitelkiant silicio darinius kaip modelinę medžiagą detektorių signalų profiliavimui, aprobeuojant dinaminis modelius srovės sandų aprašymui, vyraujančių radiacinių defektų identifikavimui įvairiuose apšvitos įtėkių diapazonuose ir jų in situ kaitos atskleidimui, įvairių spinduliuočių detektavimo galimybes. Parodyta, kad CERN standarto Si medžiagos yra tinkamos trumpai gyvuojančių elementarių dalelių, tokių kaip pionai, apšvitos įtėkių matavimams.

Impulsinių detektorių signalų interpretavimui ir sensorių jautrio padidinimo galimybės nagrinėti šiame darbe buvo sukurti ir aprobeuoti dinaminiai analitiniai modeliai srovės sandų aprašymui ir vidinio signalų stiprinimo smūginės jonizacijos ir lavininių procesų režimų realizavimui. Čia išnagrinėti impulsinių signalų formavimosi sandūrinėse ir kondensatorinėse sensorių struktūrose ypatumai. Šių modelių pagrindu sukurtos metodikos sensorių signalų profiliavimui plačiatarpių puslaidininkių dariniuose. Parodyta, kad spinduliuotėmis injektuotų krūvininkų dreifo ir rekombinacijos sandai skirtingai pasireiškia detektoriaus signalų formavimesi skirtingo defektų tankio dariniuose. Tai gali būti pasitelkta sensorių medžiagų ir detektorių veikos režimų pasirinkimui ir pagrindimui. Iš kitos pusės, nagrinėjant sensorių signalų sandus galima įvertinti ir krūvininkų transporto sensorių medžiagose parametrus, poliarizacijos efektų charakteristikas plačiatarpių puslaidininkių dariniuose.

Šiame darbe buvo sukurta ir realizuota defektų spektroskopijos metodologija didelio defektų tankio naujų technologijų dariniuose kombinuojant impulsinės ir nuostoviosios spektroskopijos technikas tiek kontaktiniais, tiek nesąlytinais būdais. Pasiūlyta metodika ir jos realizavimo instrumentai spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos parametrų sinchroninei spektroskopijai, kuri yra itin efektyvi radiacinių defektų evoliucijos in situ tyrimams bei netvarkių, planariškai nevienalyčių medžiagų charakterizavimui. Parodyta, kaip kombinuojant šias vienalaikio skenavimo metodikas galima pasitelkti sensorių signalų (antrinių krūvininkų porų skaičiaus detektoriaus storio vienetui) parametrams ir detektorių radiacinės degradacijos (defektų susidarymo spartos) charakteristikoms įvertinti. Atskleista, kad tokia matavimų technologija gali būti taikoma ir efektyvi plačiatarpėse medžiagose (palyginant įvairių technologijų GaN ir CdS

medžiagų charakteristikas). Pasitelkiant šias metodikas buvo identifikuotas vyraujančių defektų spektras sintetinio deimanto ir GaN įvairios technologijos dariniuose.

Sukurta metodika ir įranga nuostoviosios ir dinaminės poliarizacijos sandams plačiatarpių darinių sensoriuose atskirti ir būdingų poliarizacijos relaksacijos trukmių matavimams.

Pasiūlytos ir realizuotos bandomosios technologijos sensoriams formuoti GaN dariniuose, pasitelkiant plazminio ir selektyvaus lazerinio (laser ablation) ėsdinimo būdus terasinių (meza) struktūrų sudarymui bei elektrodų nusodinimo meza struktūrose technologinius žingsnius. Buvo suformuotos Schottky sandūrų ir kondensatoriniai sensoriai, tinkami įvairios trukmės ir spinduliuotės spektro signalams registruoti. Atskleista poliarizacinių efektų įtaka tokių sensorių veikimui, kai poliarizacijos laukas gali ekranuoti išorinio šaltinio elektrinį lauką ir blokuoti antrinių elektron-skylinių porų dreifo signalus. Siekiant eliminuoti šių nepageidautinų poliarizacinių efektų pasireiškimą, būtina pasitelkti specifinius detektorių veikos režimus. Šiame darbe ir surasti efektyvaus GaN sensorių veikos režimai.

Praktinė svarba. Praktinių taikymų aspektu yra svarbios šiame darbe sukurtos metodikos sensorių signalų profiliavimui, relaksacijos parametrų matavimui. Taip pat yra svarbi sudėtingų medžiagų, kuriose yra dideli savitųjų ir apšvitomis sukurtų defektų tankiai, charakterizavimo metodologija kombinuojant įvairias spektrines ir relaksacijos parametrų įvertinimo metodikas. Dalis šių metodikų yra originalios arba savitai pritaikytos medžiagotyrimams uždaviniams šiame darbe spręsti.

Identifikuotų technologinių defektų spektras ir jų parametrų (spektrinių žymių, aktyvacijos energijų ir kt.) vertės gali būti pasitelktos analizuojant naujai sintezuojamas medžiagas.

Sukurta sinchroninės spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos centrų spektroskopijos metodika gali būti plačiau taikoma detektorių jautrumo, reikiamo storio ir radiacinės degradacijos parametrams įvertinti.

Sukurtos bandomosios technologijos kondensatoriniams ir sandūriniams sensoriams formuoti plačiatarpėse medžiagose yra naudingos tolesniems technologijos vystymams, formuojant specifinės paskirties, padidinto radiacinio atsparumo, dvigubo (optinio ir elektrinio) atsako detektorius plačiatarpių puslaidininkių dariniuose.

Ginamieji teiginiai:

1. Sukurti dinaminiai modeliai sensorių srovės sandų aprašymui leidžia adekvačiai emuliuoti elektrinio lauko detektoriaus aktyvioje srityje formavimosi bei persiskirstymo ir krūvininkų transporto bei rekombinacijos procesų dinamikai atskleisti. Krūvininkų porų smūginio dauginimo procesų modeliai yra tinkami projektuojant detektorių vidinio stiprinimo režimus.

2. Detektorių atsako impulsinių srovių profiliavimo metodika, skenuojant išorinio šaltinio įtampos vertes bei krūvininkų injekcijos spinduliuotėmis lokalizaciją, yra tinkama įvairiapusiam sensorių funkcinių savybių charakterizavimui silicio ir plačiatarpių puslaidininkų dariniuose.
3. Krūvininkų rekombinacijos trukmės Si plokštelių fragmentuose verčių, priklausančių nuo apšvitos pionais įtėkio, matavimo būdas tinka nesąlytinei pionų apšvitų in situ ir ex situ dozimetrijai plačiame įtėkių diapazone, pasitelkiant kalibracines hadronų įtėkio charakteristikas.
4. Greitaveikiai ir padidintos tolerancijos radiacinėms pažeidoms spinduliuočių detektoriai, generuojantys elektrinius ir optinius atsako signalus, patikimai suformuojami MOCVD GaN epitaksiniuose sluoksniuose, pasitelkiant plazminio bei lokalaus lazerinio ėsdinimo ir elektrodų užnešimo technologines procedūras.

Disertacijoje pateiktų rezultatų publikavimas. Disertacijoje pateikti rezultatai yra publikuoti kartu su bendraautoriais 15-oje mokslinių straipsnių, – po du straipsnius išspausdinta žurnaluose „Journal of Instrumentation“, „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B“, „Lithuanian Journals Physics“, po 1 straipsnį išspausdinta žurnaluose „Journal of Applied Physics“, „Diamond & Related Materials“, „Materials“ „Materials Science – Medžiagotyra“, „Sensors“, „Applied Physics Letters“ bei du straipsniai išspausdinti konferencijų darbuose. Tyrimų rezultatai taip pat buvo pristatyti tarptautinėse (IWORID14, IWORID‘15, “Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2014”, IBMM2014, CERN RD50) ir nacionalinėse (LNFK40) konferencijose. Disertacijos autoriaus publikacijų sąrašas yra pateikiamas šio autoreferato pabaigoje.

Disertacijos struktūra. Disertacija yra sudaryta iš įvado ir penkių skyrių. Įvade aptartas tyrimų aktualumas, uždaviniai, mokslinis naujumas ir praktinė svarba, ginamieji teiginiai, bei autoriaus indėlis. Antrame skyriuje apžvelgiami tiriamų medžiagų spektroskopijos ir medžiagotyros metodai, sensorių veikos ir detektuojamų signalų aprašymo būdai, radiacinių defektų formavimosi ir pasireiškimo charakteristikos pagrindžiant disertacijoje aprašytų tyrimų reikmę. Trečiame skyriuje aptariamos naudotos medžiagos ir bandiniai bei pasitelkti tyrimų metodai, aprašytos sintetinio deimanto ir įvairios technologijos GaN darinių iširtos charakteristikos. Pateiktos ir aptartos krūvininkų rekombinacijos trukmės ir liuminescencijos spektrinių charakteristikų sinchroniniai kitimai GaN dariniuose, priklausomi nuo apšvitos protonais įtėkio. Taip pat čia aptariama antrinių krūvininkų porų generacijos protonais ir radiacinių defektų sukūrimo GaN sluoksniuose sparta bei šių parametrų įvertinimo metodai. Ketvirtame skyriuje pateikti sensorių signalų dinamikos aprašymo modeliai, Shockley-Ramo‘ teoremos artinyje. Taip pat pateiktas krūvininkų porų dauginimo spartos koeficiento įvertinimo dinaminis modelis. Aptartų modelių pagrindu buvo sukurti sensorių

charakteristikų modeliavimo algoritmai ir šiame skyrelyje iliustruojamos modelinės charakteristikos. Sukurti modeliai buvo apriboti profiliuojant sensorių signalus. Ketvirtame skyriuje pateikiamos profiliavimo eksperimentinės metodikos ir tyrimų rezultatai. Aptartas sensorių srovių kinetika ir jų darna su modelinėmis charakteristikomis. Penktame skyriuje pateiktos ir aptartos sensorių formavimo GaN dainiuose sukurtos technologijos. Pateiktos ir aptartos sensorių signalų profiliavimo charakteristikos ir iš jų įvertinti medžiagų bei detektorių parametrai. Šeštame skyriuje aptarti Si plokštelių fragmentų dozimetriniai sensoriai pionų apšvitų parametrų matavimui. Disertacijos pabaigoje yra apibendrinti esminiai rezultatai, suformuluotos išvados ir pateiktas cituotos literatūros sąrašas.

DISERTACIJOS TURINYS

Įvade yra trumpai apžvelgiama tyrimų būklė disertacijos tema. Suformuluoti darbo uždaviniai, aptariamas darbo aktualumas, mokslinis naujumas ir tyrimų praktinė reikšmė. Įvade yra suformuluoti ginamieji teiginiai, atskleistas autoriaus indėlis į vykdytus tyrimus ir pateikti autoriaus, kartu su bendraautoriais, mokslinių straipsnių bei pranešimų konferencijose sąrašai.





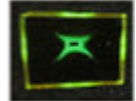
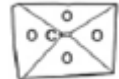
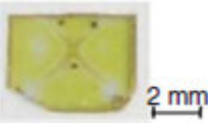
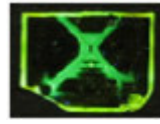

II-ame skyriuje pateikta savitųjų (technologinių) defektų parametrų ir jų įvertinimo sintetinio deimanto, GaN ir silicio medžiagose trumpa apžvalga, motyvuojant tolesnių tyrimų aktualumą. Taip pat šiame skyrelyje apžvelgti radiaciniai defektai šiose medžiagose, sudaryti įvairiomis aukštųjų energijų spinduliuotėmis ir jų spektroskopijos problemos. II-ame skyriuje taip pat apžvelgti mokslinėje literatūroje publikuoti sensorių signalų aprašymo modeliai, pasitelkiant statinius ir dinامينius artinius, bei išskylančios problemos, interpretuojant impulsinių signalų sandus. Ši trumpa problemų apžvalga orientuota pagrįsti šiame darbe vykdytų tyrimų reikmę.

III-ame skyriuje pateikta išėties medžiagų, naudotų sensorių formavimui, tyrimų metodikos ir esminės spektrinės charakteristikos.

Sintetinio deimanto charakteristikos buvo ištirtos dviejų technologijų medžiagose, suformuotose aukšto slėgio-aukštos temperatūros (HPHT) būdu ir išaugintas cheminio garų nusodinimo (CVD) metodu. Pastaroji medžiaga buvo legiruota geležies priemaišomis, siekiant kompensuoti augimo defektus.

HPHT deimanto medžiagai yra būdingas ženklus defektų pasiskirstymo nevienalytiškumas. Aptikti tiek taškiniai defektai, sietini su azoto ir metalinėmis priemaišomis, tiek kristalo morfologijos defektai, kurie išryškėja netgi baltoje arba ultravioletinėje šviesoje (3.1 pav.). Išplitę skirtingos kristalo orientacijos sąaugos sritys yra taškinių defektų (azoto priemaišų) sankaupos centrai. Todėl bandiniuose, kur ryškūs kristalo morfologijos (kubinės ir

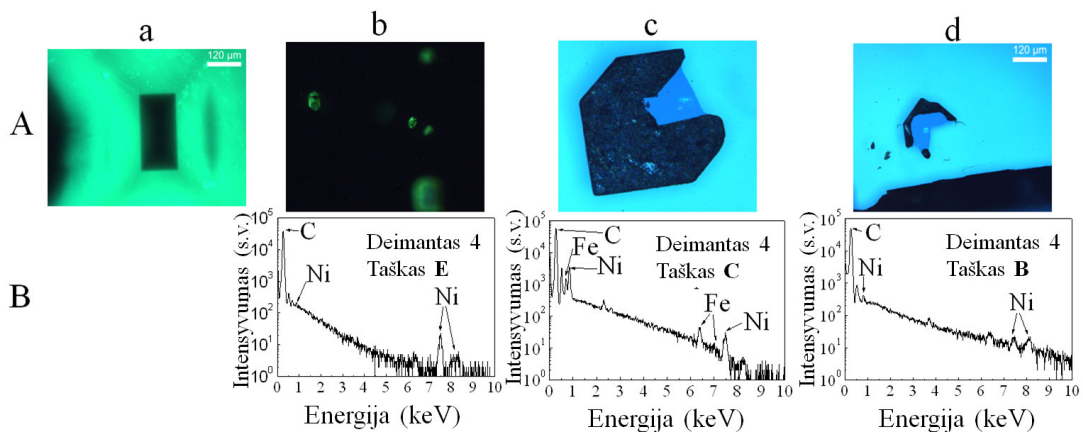
oktaedrinės orientacijos sąaugos) defektai, azoto sankaupos sukuria X formos liuminescencijos arba sugerties spektro pokytį.

Bandinio Nr.	Storis (μm)	Bandinio nuotrauka baltoje šviesoje	Fluorescencijos topograma sužadinant ultravioletine šviesa	Morfologijos sektorių schemas
		a	b	c
9	280			
7	250			
4	245			

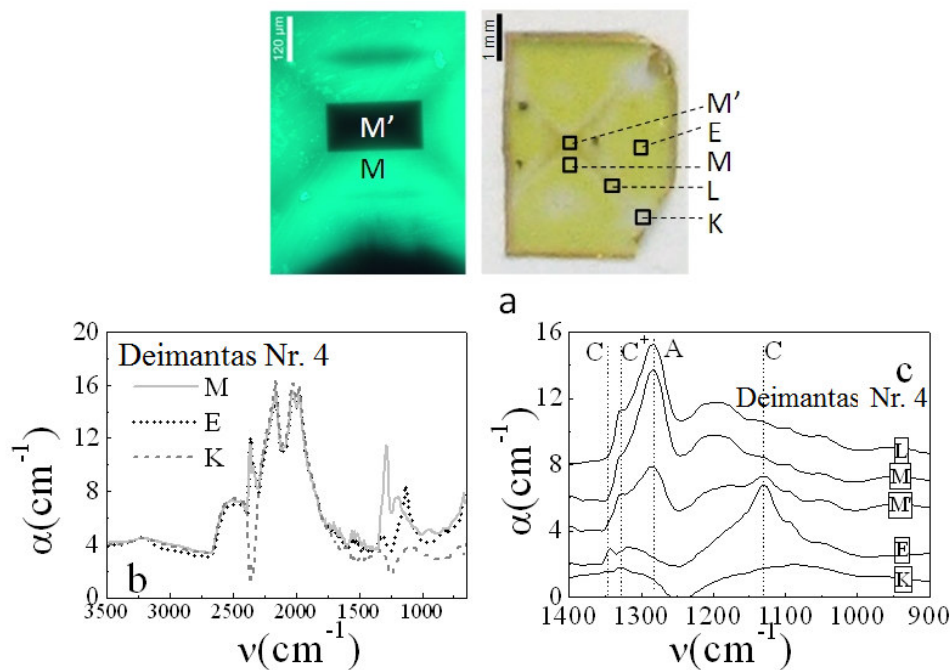
3.1 pav. HPHT sintetinio deimanto bandinių geometriniai parametrai ir jų vaizdai baltoje šviesoje (a) ir fluorescencijos topogramos sužadinant ultravioletine šviesa (b). (c) kristalo augimo morfologijos sektorių schemas, kur “C” žymi kubines simetrijos sektorius, “O” – oktaedrinis sektorius.

Šiuose HPHT sintetinio deimanto dariniuose buvo aptikti grafito bei metalinių (Fe-Ni) priemaišų precipitatai nagrinėjant mikroskopijos vaizdus (3.2 pav.), o šių makroskopinių precipitatu prigimtis buvo identifikuota nagrinėjant EXDS spektrus precipitatu ir kristalo morfologinių defektų lokalizacijose SEM lauke. Aptikti defektai yra nulemti deimanto sintetinimo technologijos, kur azotas atsiranda iš grafito prekursoriaus, o metalinės priemaišos yra neišvengiamos dėl būtinybės naudoti metalų katalizatorius.

Azoto priemaišų koncentracija buvo įvertinta nagrinėjant HPHT deimanto sugerties spektrus (3.3 pav.), užregistruotus Furje transformuotosios infraraudonosios spektroskopijos (FTIR) būdu. Sugerties spektruose aptiktos smailės buvo susietos su įvairiais azoto kompleksais, spektrinėje literatūroje skiriamais kaip A-, C- ir C⁺-defektai. Elementiniu aspektu, C⁺ defektas siejamas su jonizuotu (įelektrintu) pakaitiniu/intarpiniu azoto atomu deimanto gardelėje, C defektas ir FTIR spektro smailė atitinka neutralaus pakaitinio/intarpinio azoto atomo deimanto gardelėje vibracinę modą, o A defektas priskiriamas dviejų artimiausių gardelėje, įterptinių azoto atomų agregatui. Planarinio FTIR spektrų skenavimo būdu aptikta, kad A-, C- ir C⁺-defektų koncentracijos ženkliai kinta, priklausomai nuo kristalo morfologijos sektoriaus (lyginant šių defektų tankį kubinėje (M – lokalizacija) bei oktaedrinėje (E – lokalizacija) arba jų sąlyčio srities (L – lokalizacija) aplinkose), kaip iliustruojama 3.3 pav.

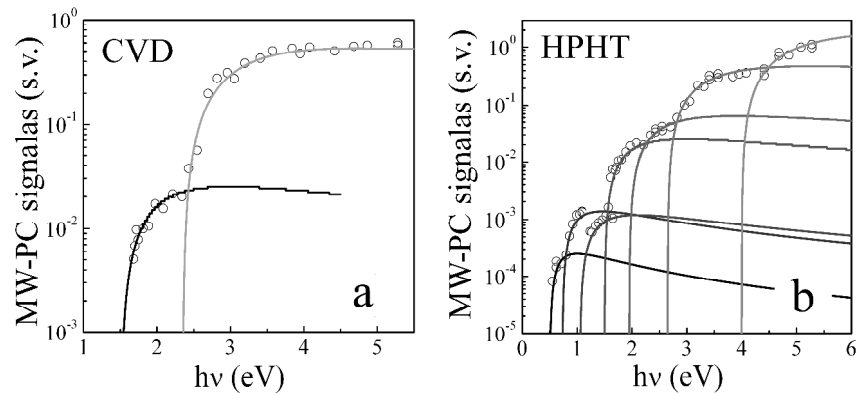


3.2 pav. Mikroskopijos ir Rentgeno fotoelektronų spektrų HPHT deimanto bandinių įvairiuose sektoriuose sugretinimas. A – Optinės mikroskopijos vaizdai B – Rentgeno fotoelektronų spektrai (SEM lauke) atitinkantys mikroskopijos vaizde lokalizuotas sritis. a – centrinis kubinio kristalo sektorius bandinyje Nr. 4, b – precipitātų vaizdai, c – geležies-nikelio inkluzai, d – nikelio precipitatai [A8].



3.3 pav. FTIR spektrų kaita skenuojant bandinio pralaidumą įvairiose kristalo srityse, bandinyje Nr. 4. a – Įvairių skenavimo lokalizacijos sričių priskyrimo schema. b – FTIR spektrai $400 - 3500 \text{ cm}^{-1}$ banginių skaičių ruože užregistruoti priskirtuose lokalizacijos taškuose c – FTIR spektrų struktūros palyginimas skenavimo lokalizacijos taškuose M (kubinės ir dalinai oktaedrinės orientacijos kristalo srityse) ir M' ($\{001\}$ kubinės simetrijos sektoriuje); K – kubines $\{100\}$ orientacijos sektoriuje bandinio kampe; L – dviejų oktaedrinų sektorių sankirtos su kubiniu $\{100\}$ sektoriumi srityje, E – oktaedriniam $\{111\}$ sektoriuje [A8].

Defektų spektriniai tyrimai buvo išplėsti nagrinėjant ir fotojonizacijos spektrus. Šie spektrai buvo registruojami kambario temperatūroje impulsinės fotojonizacijos būdu, kai foton-elektroninės sąveikos vyksmai buvo sužadinti femtosekundiniais perderinamo bangos ilgio lazerio impulsais, siekiant išvengti sudėtingesnių fononinės įtakos procesų. Fotojonizacijos spektrai CVD ir HPHT sintetiniame deimante iliustruojami 3.4 pav. CVD deimanto spektre aptikti du fotojonizacijos laipteliai, kai HPHT deimante fotojonizacijos laiptelių spektras žymiai turtingesnis. Modeliuojant spektrinius laiptelius Lukovsky δ -formos potencinio barjero artinyje, buvo įvertintos defektų fotojonizacijos slenkstinės energijos. Derinant šias fotojonizacijos energijos vertes su literatūriniais duomenimis buvo identifikuoti fotoaktyvūs defektai. CVD deimante aptikti defektų lygmenys sietini su amorfine anglimi ir įterptiniu azotu.



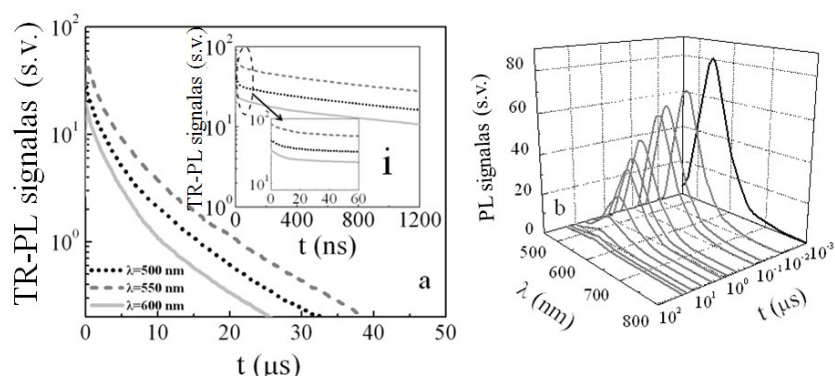
3.4 pav. Impulsinės fotojonizacijos spektrai CVD (a) ir HPHT (b) deimanto bandiniuose. Išsines kreivės žymi sumodeliuotus spektro laiptelius Lucovsky artinyje.

HPHT deimanto fotojonizacijos spektre identifikuota keletas lygmenų, priskirtinų amorfinės anglies defektams, ir keletas lygmenų, sietinų su azoto-vakansijos ir azoto-nikelio-vakansijos sudėtingesniems kompleksams. Defektų fotojonizaciniai parametrai ir prieskyros yra pateikti 3.1 lentelėje.

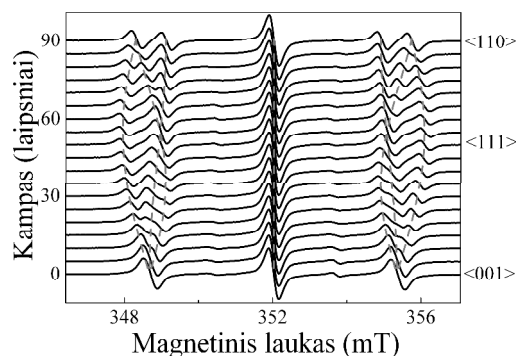
Lentelė 3.1. Slenkstinės defektų fotojonizacijos energijos sintetinio deimanto medžiagose, įvertintos Lucovsky artinyje iš spektro laiptelių, ir defektų identifikacija, derinant su literatūros duomenimis.

	Fotoaktivacijos energija (eV)	Defekto tipas
HPHT deimantas	0.52 ± 0.05	a-C
	0.74 ± 0.06	a-C
	1.1 ± 0.1	a-C
	1.5 ± 0.1	a-C
	2.0 ± 0.1	N-V
	2.7 ± 0.1	N-VN _i V-N
	4.0 ± 0.1	N _i , N ₂ -VN _i -N ₂
CVD deimantas	1.5 ± 0.1	a-C
	2.4 ± 0.1	N subst.

Spindulinės rekombinacijos spektriniamis parametrams įvertinti buvo nagrinėjami fotoluminescencijos spektrai ir spektrinių smailių intensyvumo relaksacijos kinetikos. HPHT deimanto fotoluminescencijos spektre (3.5a pav.) aptikta plati liuminescencijos juosta su smaile ties 550 ± 10 nm bangos ilgiu. Užregistruota liuminescencija, gretinant su literatūros duomenimis, buvo priskirta spinduliniams šuoliams tarp lygmenų siejamų su nikelio-azoto-vakansijos kompleksais ir divakansija. Nagrinėjant fotoluminescencijos intensyvumo relaksacijos kinetikas (3.5b pav.) spektrinės juostos smailės ir šlaitų aplinkoje, aptikti spartusis (su būdingosiomis trukmėmis ≤ 10 ns) ir lėtasis (~ 10 μ s) sandai. Pradinis spartusis rekombinacijos sandas susietas su spindulinės rekombinacijos centrų užpildymo krūvininkais dinamika. Čia apsisireiškia konkurencija tarp krūvininkų pagavimo į spindulinės rekombinacijos centrus ir nespindulinės rekombinacijos gaudykles. Asimptotinis liuminescencijos kinetikų sandas atspindi retus spindulinius šuolius tarp lygmenų priskirtinų gana išplitusiems kompleksams, kai tik menka dalis fotogeneruotų krūvininkų išnyksta spindulinės rekombinacijos kanalu.



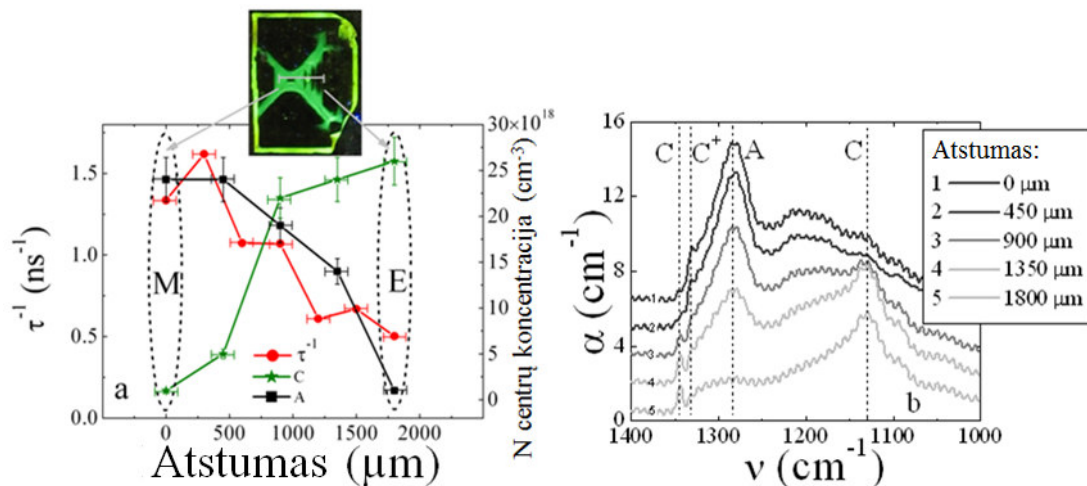
3.5 pav. a – Fotoluminescencijos spektrų HPHT deimante evoliucija. b – Žaliai-geltonosios fotoluminescencijos intensyvumo relaksacijos kinetikos. Intarpe (i) iliustruojamas pradinis relaksacijos sandas, išskleistas pusiau-logaritminėje skalėje [A8].



3.6 pav. ESR spektrų kaita keičiant kampą tarp kristalografinės krypties ir magnetinio lauko orientacijos. Pilkos punktyrinės kreivės iliustruoja modelines kampines ESR kitimų priklausomybes, suskaičiuotas pasitelkiant EasySpin programinę platformą.

3.2 lentelė. Priemaišų HPHT deimante koncentracijos, įvertintos kombinuojant FTIR ir ESR spektroskopiją.

Defektasd	Metodas	Bandinys Nr.4			Bandinys Nr.7	Bandinys Nr.9
		Defektų koncentracija $\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$				
$PI(N)$	ESR	24±3			22±3	12±2
P_{Ni}	ESR	0.19±0.05			0.14±0.03	0.054±0.004
Vieta bandinyje		D	F	G	Centrinė sritis	Centrinė sritis
C	FTIR	nr	nr	22±2	3.6±1	9.1±2
A	FTIR	nr	23±2	nr	37±3	11±2
C^+	FTIR	nr	3±1	1±1	1.4±1	nr



3.7 pav. a – Krūvininkų tankio kitimo kinetikos, užregistruotos įvairiuose HPHT deimanto bandiniuose mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (MW-PC) metodu. b – Krūvininkų rekombinacijos trukmės (įvertintos MW-PC būdu) ir azoto priemaišų koncentracijos (iš FTIR spektrų) kitimų palyginimas HPHT deimanto bandinyje Nr. 4, skenuojant sritį tarp taškų M ir E, parodytą 3.3 pav. FTIR spektrai skenuoti 450 μm žingsniu, MW-PC žvalgos profilyje (užregistruotame 5 μm žingsniu) pavaizduoti tik taškai, suderinti su FTIR registravimo lokalizacijos taškais [A8].

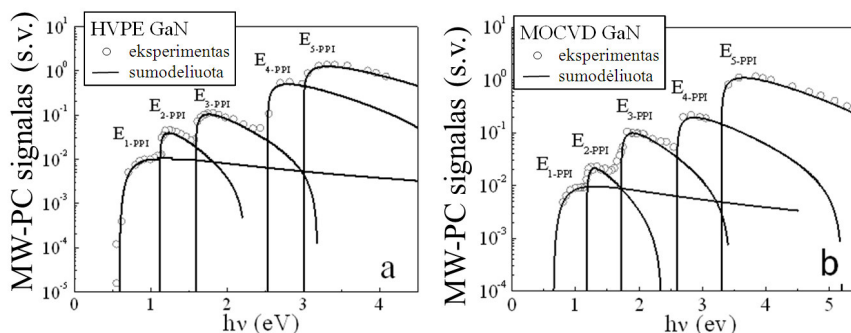
Elektronų sukinio rezonanso (ESR) spektrai buvo ištirti siekiant įvertinti foto- ir spin-aktyvių centrų koncentracijas. Nagrinėjant spektrų kaitos priklausomybes nuo kampo tarp kristalinių krypčių ir magnetinio lauko (3.6 pav.) bei temperatūrinę ESR spektrų kaitą, buvo identifikuoti spin-aktyvūs centrai sietini su azoto (HPHT deimante) ir nikelio priemaišomis. Normuojant ESR spektrus tiriamo bandinio tūriui buvo įvertintos šių priemaišų koncentracijos. Azoto ir nikelio priemaišų koncentracijų vertės (surastos ESR spektroskopijos būdu bei suskaičiuotos iš FTIR spektro smailių amplitudžių), priskirtos įvairiems kristalo morfologijos sektoriams bei bandinio taškams, yra pateiktos 3.2 lentelėje. Gautos gana didelės ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) elektriškai-optiškai

aktyvių azoto centrų koncentracijos. Dviem eilėmis mažesnės ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) gautos Ni priemaišoms priskirtinų defektų koncentracijos. Svarbu pastebėti, kad FTIR ir ESR būdais įvertintos azotui priskirtinų defektų koncentracijų vertės gana gerai dera, kai Ni priemaišos nepasireiškia FTIR spektre.

Nespinulinės rekombinacijos procesų sparta ir nespinulinės rekombinacijos centrų planarinis paskirstymas buvo ištirtas mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų metodu. Gautas skirtingo nevienalytiškumo tokių defektų planarinis pasiskirstymas, priklausantis nuo HPHT deimanto nuo vyraujančių kristalo morfologijos sektorių bandinyje. Nespinulinės rekombinacijos centrai nulemia gana trumpą (1-5 ns) krūvininkų gyvavimo trukmę (3.7a pav.). Šios trukmės planariniai kitimai gerai dera su azoto priemaišų koncentracijos kitimais (3.7b pav.), būdingais įvairios morfologijos sektoriams.

Iš aptartų sintetinio deimanto tyrimų, buvo surandami tinkamiausi bandiniai sensorių formavimui. Sintetinio HPHT deimanto pagrindu buvo suformuoti tik kondensatorinio tipo sensoriai. Pastaruosiuose sensoriuose signalai yra nulemti rekombinacijos trukmės. Tokie sensoriai mažų įtampų srityje galėtų veikti tik kaip elementarių dalelių poveikio skaitikliai. Todėl toliau sintetinio deimanto sensoriai šiame darbe neaptariami.

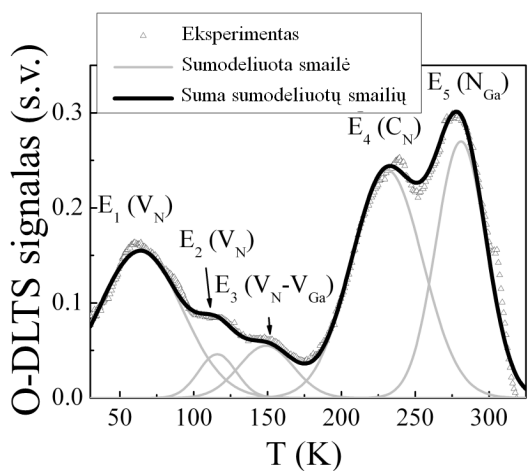
GaN medžiagų charakteristikos yra pateiktos ir aptartos antrame šio skyriaus paragrafe. Fotoaktyvių defektų spektrai buvo registruojami impulsinės fotojonizacijos (PPIS) metodu, nesąlytiniu būdu. Būdingi PPI spektrai užregistruoti HVPE ir MOCVD GaN medžiagų bandiniuose yra iliustruojami 3.8 pav. GaN fotojonizacijos spektruose aptikta keletas laiptelių struktūra. Iš slenkstinių aktyvacijos energijų, derinant su literatūros duomenimis, buvo identifikuoti defektai, sietini su kristalo netobulumais (galio vakansijomis, azoto atomais galio mazge) ir priemaišomis (anglies, deguonies) ir šių defektų kompleksais tiek HVPE, tiek MOCVD technologijos GaN. HVPE GaN medžiaga, pardavėjų nominuojama kaip pusiau-izoliuojančio (SI) GaN kristalai, PPIS spektruose aptikta geležies (Fe) priemaišų. Fe priemaišos buvo įvestos kristalų augintojų, siekiant sukompensuoti augimo defektų sukurtus įelektrintus centrus. Slenkstinių aktyvacijos energijų vertės ir identifikuoti defektai yra sugrupuoti 3.3 lentelėje.



3. 8 pav. Fotojonizacijos spektrai HVPE (a) ir MOCVD (b) GaN [A2].

3.3 lentelė. Slenkstinės defektų fotojonizacijos energijos HVPE ir MOCVD GaN medžiagose, įvertintos iš spektro laiptelių, ir defektų identifikacija, atlikta derinant su literatūros duomenimis.

Medžiaga	HVPE GaN		MOCVD GaN	
Spektro laiptelis	Foto-aktyvacijos energija (eV)	Defektas	Foto-aktyvacijos energija (eV)	Defektas
E _{1-PP1}	0.6±0.1	V _{Ga} ⁻	0.7±0.1	V _{Ga} ⁻
E _{2-PP1}	1.1±0.1	N _{Ga}	1.2±0.1	N _{Ga}
E _{3-PP1}	1.6±0.1	Fe ³⁺	1.7±0.2	V _{Ga} O _N
E _{4-PP1}	2.5±0.2	C _N	2.6±0.2	C _N
E _{5-PP1}	3.0±0.2	Fe ²⁺	3.3±0.2	C _N O _N

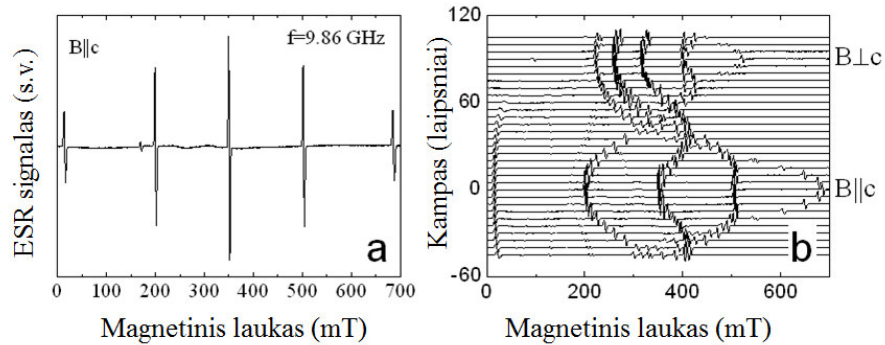


3. 9 pav. O-DLTS spektras, užregistruotas MOCVD GaN Šotkio diode [A2].

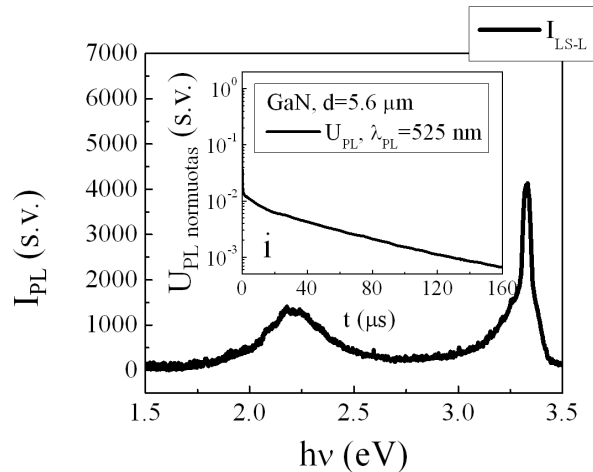
Suformuotose GaN sandūrinėse struktūrose, elektriškai aktyvių defektų spektras buvo ištirtas standartiniu nenuostoviosios giliųjų lygmenų spektroskopijos (DLTS) metodu ir komerciniais DLTS spektrometrais. Tipiškas GaN lygmenų spektras, gautas Šotkio diode, matuojant O-DLTS režime, yra iliustruojamas 3.9 pav. Gautas O-DLTS spektras yra sudarytas iš keletos persiklojančių spektrinių smailių. 3.9 pav. smailės yra susietos su identifikuotais krūvininkų termo-emisijos centrais. Čia matosi, kad, vėlgi, žematemperatūriniame O-DLTS spektro sparne vyrauja Ga vakansijoms ir jų kompleksams priskirtini defektai. Gilesnes krūvininkų gaudykles formuoja neišvengiamos anglies (C_N) priemaišos ir kristalo sanklodos netobulumai.

Siekiant įvertinti PPIS spektre aptiktų kompensuojančių Fe priemaišų koncentraciją HVPE GaN bandiniuose, buvo ištirti ESR spektrų kitimai. Būdingas HVPE GaN bandiniams ESR spektras ir jo kampinės charakteristikos yra iliustruojamos 3.10 pav. ESR spektro struktūra ir jos kitimai, keičiant kristalo orientaciją magnetinio lauko atžvilgiu, yra būdingi Fe paramagnetiniams centrams. Identifikavus ESR aktyvią priemaišą, standartinėmis ESR procedūromis, minėtomis aukščiau, buvo įvertinta Fe priemaišų koncentracija. Šių Fe priemaišų koncentracija siekė $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,

kuri buvo padidintos HVPE GaN bandinių varžos faktoriumi. Tačiau tokios kompensuojančios priemaišos nulemia gana sparčią krūvininkų rekombinaciją.

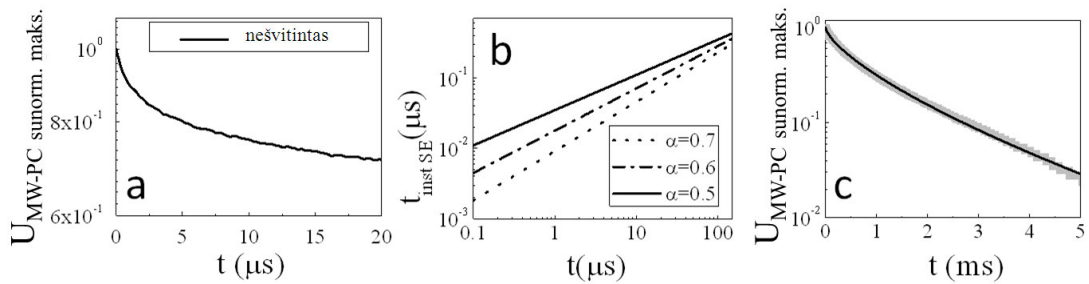


3.10 pav. Būdingas ESR spektras (a) ir šio spektro kitimų kampinė priklausomybė (b), keičiant kampą tarp kristalo c-ašies ir magnetinio lauko krypties HVPE GaN kristale [A2].



3.11 pav. GaN fotoluminescencijos spektras užregistruotas sužadinant 354 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotės 400 ps impulsais. Intarpe iliustruojamos fotoluminescencijos intensyvumo ir MW-PC signalo relaksacijos kinetikos MOCVD GaN medžiagoje.

Tiek spindulinės, tiek nespindulinės rekombinacijos spektrai ir sparta buvo ištirti kombinuojant ir sinchroniškai matuojant MW-PC ir fotoluminescencijos charakteristikas. Būdingas fotoluminescencijos spektras ir liuminescencijos bei MW-PC kinetikos yra iliustruojami 3.11 pav. MOCVD GaN medžiagoje buvo stebimos dvi-sandės kinetikos, kur asimptotinis krūvininkų tankio relaksacijos sandas gerai aproksimuojamas iššęstosios eksponentės (SER) modeliu ir priskirtinas netvarkioms epi-GaN sritims. Spartaus pradinio MW-PC relaksacijos sando trukmės gerai dera su fotoluminescencijos intensyvumo relaksacijos trukmių vertėmis. Tai paaiškinta sparčia krūvininkų rekombinacija GaN kristalituose tiek MOCVD GaN, tiek Fe legiruotoje HVPE GaN medžiagoje.



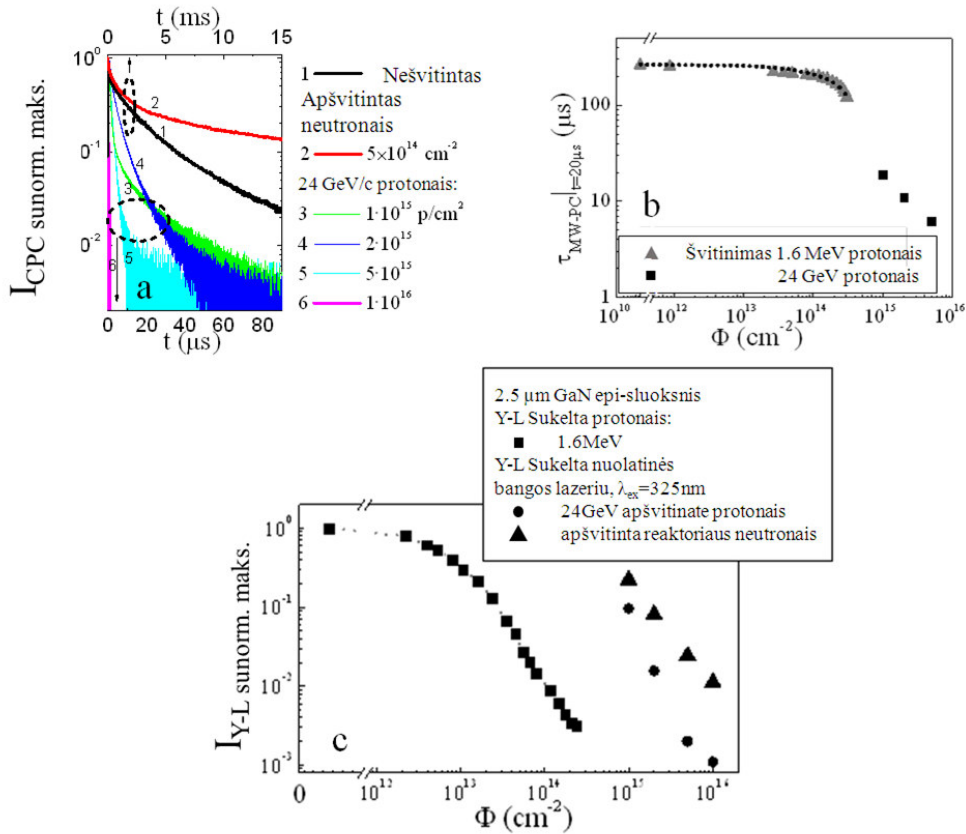
3.12 pav. a – normuotos į pradinę atsako amplitudę MW-PC kinetikos MOCVD GaN epitaksiniuose sluoksniuose. b – iliustruojamos modelinės relaksacijos kinetikos aproksimuojant SER artiniu, keičiant SER laipsnio rodiklio vertes. c – iliustruojamos dvi-komponentės kinetikos, užregistruotos plačioje skleistinių skalėje.

Šie išėities medžiagų parametrai buvo pasitelkiami analizuojant radiacinių defektų įtaką medžiagos charakteristikų kitimams bei formuojant dalelių detektorius bei analizuojant jų operacines charakteristikas.

Radiacinių defektų indukuoti GaN medžiagos charakteristikų in situ kitimai apšvitos 1.6 MeV protonais metu aptarti šio skyriaus trečiame paragrafe. Apšvitos metu buvo sinchroniškai registruojamos MW-PC kinetikos, zonduojamos adatine mikrobangų antena, įvesta į apšvitų vakumuotą kamerą, ir protonais indukuota fotoluminescencija, kai šviesa buvo surenkama daugiaskaiduliniu zondų, įmontuotu apšvitų kameroje. Mikrobangų ir liuminescencijos signalai buvo šviesolaidžiais ir bangolaidžiais buvo perduodami iš apšvitos zonos į kompaktišką spektrografą ir mikrobangų detektavimo sistemą. Didžiausi kitimai aptikti MW-PC kinetikų asimptotiniame sande ir geltonai-žaliosios liuminescencijos intensyvume, didinant apšvitos įtekį. MW-PC kinetikų ir akimirksninės relaksacijos trukmės kitimai apšvitos 1.6 MeV protonais yra iliustruojami 3.12a pav. Normuotas geltonai-žaliosios liuminescencijos intensyvumo dozinis kitimas yra pateikiamas 3.12b pav. Čia taip pat pateikiami ex situ matavimų rezultatai, gauti po apšvitų 24 GeV/c energijos protonais ir reaktoriaus neutronais MOCVD GaN. 3.12 pav. matosi tiek asimptotinio rekombinacijos sando trukmių, tiek liuminescencijos intensyvumo mažėjimas didėjant apšvitų įtekiui, indikuojantys GaN medžiagos radiacinę pažeidą. Iš rekombinacijos trukmės trumpėjimo bei liuminescencijos intensyvumo mažėjimo buvo įvertinta radiacinių defektų GaN medžiagoje sudarymo hadronais sparta. Šio parametro vertė gauta tokia: $K_p \approx 0.6 \text{ cm}^{-1}$.

Derinant protonais indukuotos ir lazeriu sužadinto fotoluminescencijos (PL) bei MW-PC metodu registruojamos parametrus, buvo įvertintas kitas detektorių konstravimui svarbus parametras, – antrinių elektron-skylinių porų generavimo hadronais efektyvumas detektoriaus aktyviosios srities pločio vienetui. Čia detaliau aptarta antrinių elektron-skylinių porų generavimo efektyvumo įvertinimo metodologija, kombinuojant sinchroninius MW-PC ir

PL matavimus. GaN šis parametras buvo įvertintas toks: $\kappa_p A_{pr} = 40 \mu\text{m}^{-1} \text{p}^{-1}$. Ši vertė artima kitų plačiatarpių medžiagų efektyvumui, formuojant elektrinius detektorių signalus. Tai patvirtina GaN perspektyvumą radiacijos sensorių formavimui, kai reikiamo dydžio signalai gali būti gauti esant didesniai GaN radiaciniam atsparumui.



3.12 pav. a – iliustruojamos MW-PC kinetikos GaN medžiagoje, apšvitinus įvairios energijos hadronais. b – akimirksninės SER relaksacijos trukmės kitimai GaN nuo apšvitos 1.6 MeV/c (trikampiais, išmatuotos *in situ*) ir 24 GeV/c (keturkampiais, išmatuotos po apšvitų) protonais. c – geltonai-žaliosios GaN fotoluminescencijos intensyvumo kitimai, priklausantys nuo apšvitos ištėkio, bandiniuose apšvitintuose 1.6 MeV bei 24 GeV/c protonais ir reaktoriaus neutronais. Liuminiscencijos spektro smailės intensyvumas apšvitinamoje medžiagoje yra normuotas į šios smailės intensyvumą neapšvitintoje medžiagoje [P4, A15].

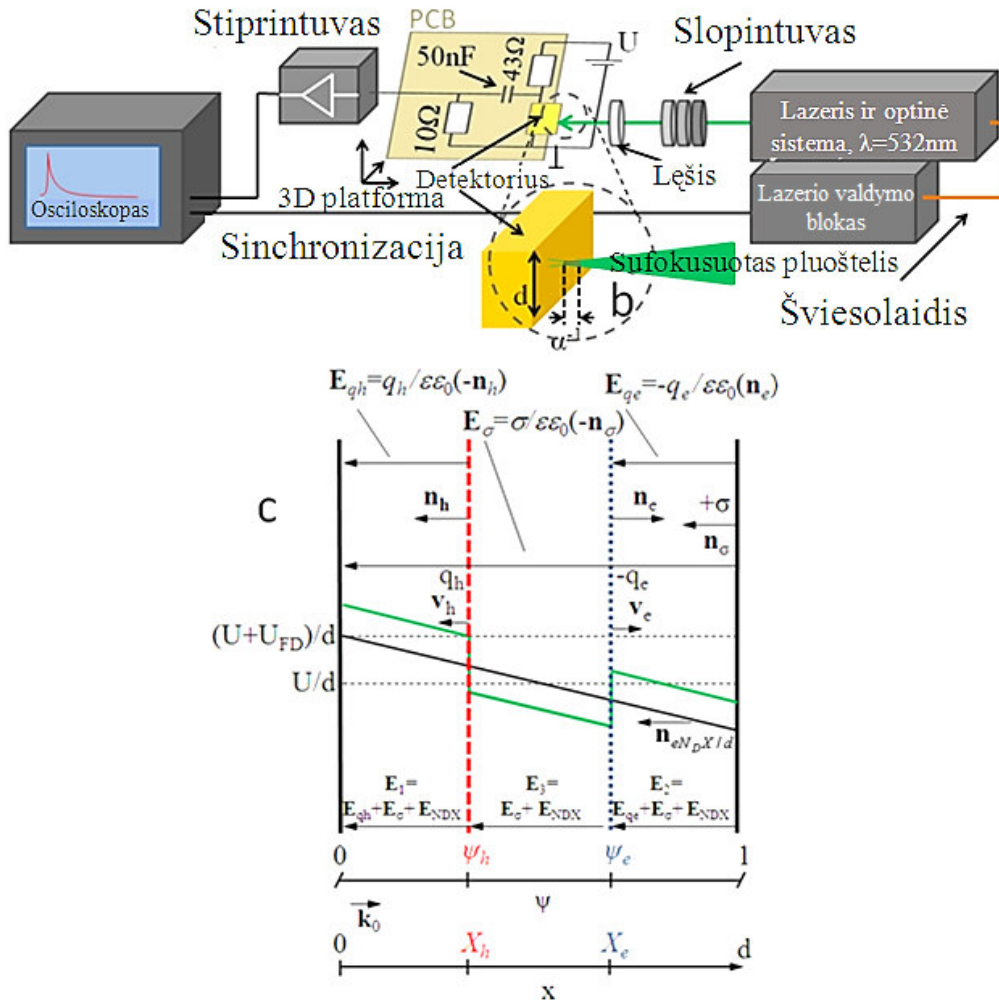
Čia aptarti ir kiti radiacinės pažeidos GaN ypatumai, kai keičiasi MOCVD GaN netvarkumo parametrai, įvedant spartesnės rekombinacijos centrus, sudarytus apšvitomis. Paminėtina, kad antrinių elektron-skylinių porų generavimo efektyvumo ir radiacinių defektų įvedimo spartos parametrų įvertinimo metodologija tinkama ir kitų medžiagų, pasitelkiamų radiacijos sensorių formavimui, charakteristikų įvertinimui.

IV-as skyrius yra skirtas sensorių impulsinių signalų analizei. Dalelių detektoriai dažnai veikia kaip impulsinės apšvitos sensoriai, - pvz., CERN LHC greitintuvas generuoja ~80 MHz pasikartojimo dažniu įgreitintų hadronų pluoštelių. Impulsiniame režime sensoriaus signalus formuoja slinkties srovės, kai signalo registravimo režimas skiriasi nuo nuolatinės veikos režimo, kur signalas formuojamas konvekcinės, krūvio/masės pernešimo srovės tankio. Taigi, dalelių detektorių signalai dažniausiai aprašomi dinaminiam (indukcinės Šoklio-Ramo srovės artinyje) artinyje, besiskiriančio nuo statinio-konvekcinės srovės režimo.

Tačiau daugeliu atveju pasitelkiama supaprastinta Šoklio-Ramo teoremos versija, taikytina tik itin mažo injektuoto krūvio atveju. Šoklio-Ramo efektas numato srovės generavimą užtrumpintoje grandinėje, kai injektuotas elementarus krūvis juda tam tikru greičiu tarpelektrocinėje srityje. Iš esmės, Šoklio efektas yra elementaraus krūvio dreifo sukurtos slinkties srovės pasireiškimas grandinėje su grįžtamuoju ryšiu. Tačiau realūs sensoriai veikia esant išoriniam įtampos šaltiniui. Tokiu atveju, dreifuojantis injektuotas krūvis keičia sistemos talpa, ir reaguojant į šį sistemos talpos kitimą išorinis šaltinis keičia tiekiamą elektrodams krūvį. Šis impulsinis krūvio kitimas išorinės grandinės apkrovos varžoje ir yra registruojamas kaip sensoriaus signalas. Įprastai taikomame sensoriaus signalų modelyje, pagrįstame Šoklio-Ramo teorema, injektuoto krūvio kuriamo lauko kitimų nepaisoma, ir priimama, kad elektronai ir skylės dreifuoja per visą tarpelektrocinę sritį vieni kitų būsenos neįtakodami. Iš tikrųjų gi, vienas elementarusis krūvis yra pernešamas, kai elektronas ir skylė iš injektuotos krūvininkų poros nuskrieja skirtingus atstumus (dėl nevienodo judrio) tarpelektrocinėje srityje, kol pasiekia elektrodą. Dažniausiai, šių krūvininkų tranzito trukmės skiriasi. Todėl tikslesniam signalų modeliavimui būtina išskirti bipolinio ir monopolinio dreifo režimus. Be to, reiktų įskaityti šių poros krūvininkų sąveiką per elektrodus, t.y. per grįžtamąjį ryšį su išoriniu šaltiniu. Dargi, Schockley-Ramo teoremos versijoje, dreifo greitis yra postuluojuamas, nesiejant su injektuoto krūvio dydžiu ir to krūvio (jo greičio ir padėties elektrodų atžvilgiu) sukelta elektrinio lauko persiskirstymą. Minėti efektai ir yra nagrinėjami IV-ame skyriuje, siekiant sumodeliuoti impulsinius sensoriaus signalus ir interpretuoti signalų kitimų profilį keičiant bipolės injekcijos spinduliuote lokalizaciją arba išorinę įtampą bei injektuoto krūvio dydį. Vystomo modelio prielaidos, sensoriaus signalų generavimo bei matavimo optinės ir elektrinės schemos yra iliustruojamos 4.1 pav. Čia pateiktas momentinis laukų pasiskirstymas esant momentinei elektronų ir skylių domenų padėčiai.

Nagrinėjant momentinio dreifuojančių elektriniame lauke domenų greičio kitimus ir indukcinį procesų sukeltus lauko persiskirstymus, bendru atveju srovės tankio išraiškoje atsiranda dvi dedamosios, sietinos su bipolio dreifo faze (j_1) ir monopolinio (j_2) dreifo atsiliekančių krūvininkų, elektrodo pasiekimo momento aspektu. Čia yra svarbios posistemių tranzito trukmės ($\tau_{r,e,h}$) ir dreifuojančio krūvio Maksvelo relaksacijos ($\tau_{Mq,e,h}$), jonų krūvio

relaksacijos ($\tau_{M,NDex}$) ir tarpelektroinės srities laisvo (kai pasireiškia tik pradinis greitis, sukurtas išorinės įtampos krūviui, lokalizuotam ties elektrodu) praskriejimo (τ_{TOF}), būdingieji laikai.



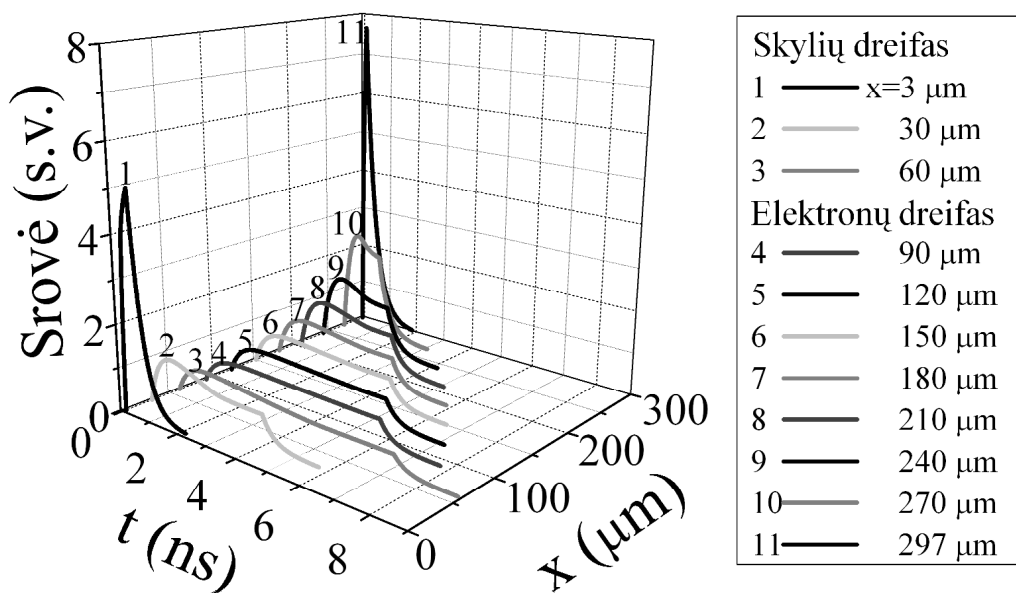
4.1 pav. Sensorių signalų profiliavimo eksperimentinės elektrinės (a) ir optinės injekcijos (padidintas vaizdas) (b) schemas. (c) – momentinis elektrinio lauko pasiskirstymas tarpelektroinėje sandūrinio (pin) sensoriaus aktyvioje srityje bipolinio dreifo atveju. Čia pasitelkti simboliai žymi: $X_{e,h}$ momentines padėtis išoriniu elektriniu lauku išskirtų elektronų (e) ir skylių (h) domenų, kurių paviršinio krūvio tankis yra $(-q_e)$ elektronams ir skylėms (q_h) (su normalių vektoriais \mathbf{n}_e ir \mathbf{n}_h , atitinkamai). Elektrinis laukas $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{qh} + \mathbf{E}_\sigma + \mathbf{E}_{NDX}$ yra superpozicija dreifuojančių domenų paviršinio krūvio lauko (\mathbf{E}_{qh}), indukuoto judančiais domenais paviršinio krūvio elektroduose (\mathbf{E}_σ) ir jonų nuskurdintoje srityje sukurto paviršinio krūvio lauko \mathbf{E}_{NDX} . Analogiškai elektrinis laukas \mathbf{E}_2 yra superpozicija laukų $\mathbf{E}_{qe} + \mathbf{E}_\sigma + \mathbf{E}_{NDX}$, o \mathbf{E}_3 yra superpozicija laukų $\mathbf{E}_\sigma + \mathbf{E}_{NDX}$. $\mathbf{v}_{e,h}$ yra momentinis elektronų ir skylių domenų dreifo greitis, priklausantis nuo momentinės domenų padėties tarpelektroinėje srityje storio d . Čia ϵ ir ϵ_0 žymi medžiagos ir vakumo dielektrines skvarbas. \mathbf{k}_0 nurodo vienetinį vektorių koordinačių sistemoje. ψ_h ir ψ_e žymi bedimensines dreifuojančių domenų padėtis, gautas normuojant į tarpelektroinės srities storio d dydį.

Bendresniu atveju gauta srovės tankio išraiška gali būti užrašyta taip:

$$j(t) = \begin{cases} j_1 = \frac{q_e}{\tau_{tr,h}} \left\{ \psi_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{tr,h}}\right) \right] + \exp\left(-\frac{t}{\tau_{tr,h}}\right) \right\}, & \text{for } 0 \leq t \leq \tau_{tr,h}; \\ j_2 = \frac{q_e}{\tau_{Mqe}} \left[\exp\left(-\frac{\tau_{Mqe}}{\tau_{M,NDef}}\right) \frac{t}{\tau_{Mqe}} \left(\frac{\tau_{Mqe}}{\tau_{TOFe}} + \frac{1}{2} \frac{\tau_{Mqe}}{\tau_{M,NDef}} - 1 + \frac{v_0 \tau_{Mqe}}{d} \right) \right], & \text{for } 0 \leq t \leq \tau_{e,mor} \end{cases} \quad (4.1)$$

Kintant įtampai, kai, pavyzdžiui, pasiekiamas visiškas pin diodo bazės nuskurdinimas, galima visa seka režimu. Disertacijoje aprašyta didesnė režimų įvairovė, pateikiant signalų parašymo išraiškas.

Buvo sumodeliuotos impulsinių signalų formos, dydžio ir trukmės modeliavimai, profiliuojant bipolės injekcijos lokalizaciją. Modelinis sensoriaus srovės impulsų kitimų profilis iliustruojamas 4.2 pav. Čia yra būdingas srovės stiprio išorinėje grandinėje mažėjimas tolstant injekcijos lokalizacijai nuo elektrodų, kai ilgėja krūvininkų tranzito trukmė.



4.2 pav. Sumodeliuotas srovės impulsų kitimų profilis keičiant injektuoto 3.5×10^{-12} C/cm² dydžio paviršinio krūvio domeno lokalizaciją 300 μm storio pin diodo n-laidumo bazėje pridėjus išorinę $U=100$ V įtampą [A9].

Dėl sensorių radiacinės pažeidos, dažnai sumodeliuoti (4.2 pav.) sensorių signalai, kurie gali būti pasitelkti dalelių trajektorijos ir energijos skenavimui (susiejant signalo dydį su antrinių krūvininkų porų sukuriama paviršinio krūvio domenu), realybėje yra nepasiekiami. Dėl didelio krūvininkų gaudyklių tankio

signalas gali būti nulemtas tik krūvininkų skaičiaus, o ne jų dreifinio greičio kitimais. Tada sensoriaus signalas gali būti itin trumpas ir itin mažo srovės stiprio. Siekiant gauti patikimai išmatuojamus signalus, pastaruoju metu vis plačiau nagrinėjamas vidinio stiprinimo režimas. Šis režimas galėtų būti realizuotas prijungus aukštą išorinę įtampą, kai pasiekimas krūvininkų dreifinis greitis užtikrintų kinetinės energijos išaugimą virš slenkstinės smūginei jonizacijai vertės. Tuo tikslu, pasitelkiant aukščiau aptartą dinaminį modelį buvo išnagrinėti krūvininkų porų dauginimo koeficientai M , prabėgant domeniui tarpelektrocinę sritį. Šiame dinaminiame artinyje buvo išvesta krūvininkų porų skaičiaus koordinatinio kitimo išraiška, elektronų ir skylių sub-domenams praskriejant tarpelektrocinę sritį vieną kartą ir kai viena pora injektuojama lokaliaje pozicijoje x , užrašoma taip:

$$M(x, x', x'') = \begin{cases} \exp[\beta(x - x')], & \text{for } 0 \leq x' < x, \\ 1, & \text{for } x' \equiv x \equiv x'', \\ \exp[\alpha(x'' - x)], & \text{for } x > x'' \geq w \end{cases} \quad (4.2)$$

Čia gauta eksponentinė porų skaičiaus augimo išraiška yra analogiška Townsend'o dėsniai, plačiai eksploatuojamam, aprašant lavininius dujinių sensorių veikos režimus. Integrinis signalo stiprinimo koeficientas, įskaitant bipolinį vienaskadių dreifą, yra užrašomas taip:

$$M(x) = 1 + \int_0^x \beta M(x') d(-x') + \int_x^w \alpha M(x'') d(x''). \quad (4.3)$$

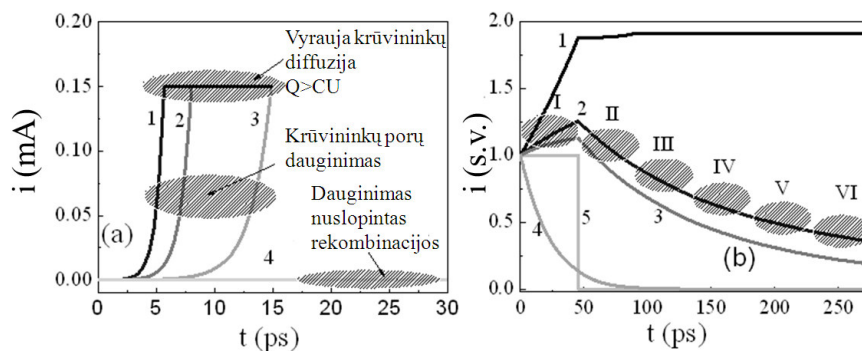
Bendresniu atveju, jeigu krūvininkų rekombinacija nėra per daug sparti, lyginant su dreifo aukštos įtampos lauke, galimas daugkartinio pralėkimo stiprinimas, kai, pvz., elektronų generuotos prie neigiamai įelektrinto kontakto, ištraukiamos ir dreifuoja link priešingo elektrodo, vėlgi didindamos generuojamų porų skaičių. Tokiu atveju, porų dauginimas vykta kaskadomis, ir po n kaskadų porų skaičiaus dauginimo koeficientas išreiškiamas taip:

$$M(x, n) = 2 \left[e^{\alpha x} - \sum_{m=0}^{2n-2} \frac{(\alpha x)^m}{m!} \right] + 1, \quad (4.4)$$

o srovės stipris, įskaitant krūvininkų rekombinaciją (su būdinga trukme τ) ir difuziją (su būdinga trukme τ_D), išreiškiamas taip:

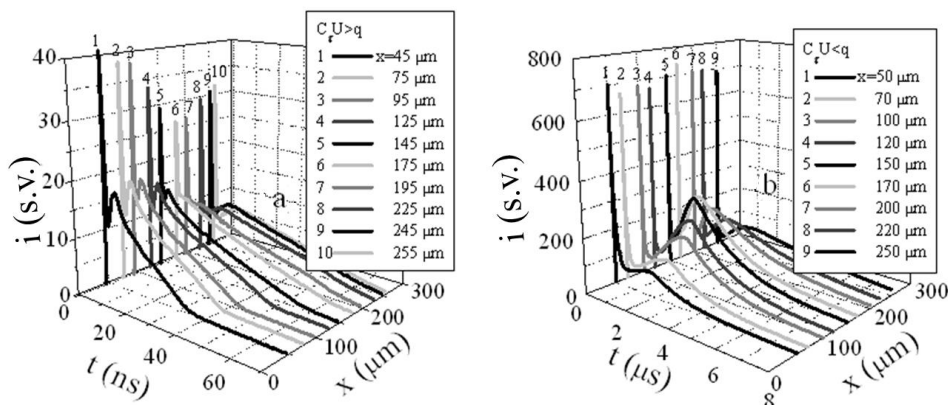
$$i(t, n) = \frac{qSM(t_n, n)}{\tau_{tr}} M(t_{n-1} - \tau_{tr} = t_n = 0, n - 1) \exp\left[-\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{Dn}}\right)t_n\right]. \quad (4.5)$$

Modelinės (pasitelkiant išraiškas (4.2-4.5)) srovės vidinio stiprinimo ir tokio sensoriaus signalų kinetikos yra iliustruojamos 4.3 pav. Kaip galima pastebėti 4.3 pav. iliustracijose, lavininis tokio sensoriaus signalo stiprinimas yra ribotas iš viršaus. Tai atsitinka dėl to, kad lavinoje sugeneruotų krūvininkų sukuriama elektrinis laukas gali visiškai ekranuoti išorinės įtampos šaltinio sudaromą elektrinį lauką, ir dreifą nukonkuruoja krūvininkų difuzinis ištraukimas iš aktyviosios sensoriaus srities.

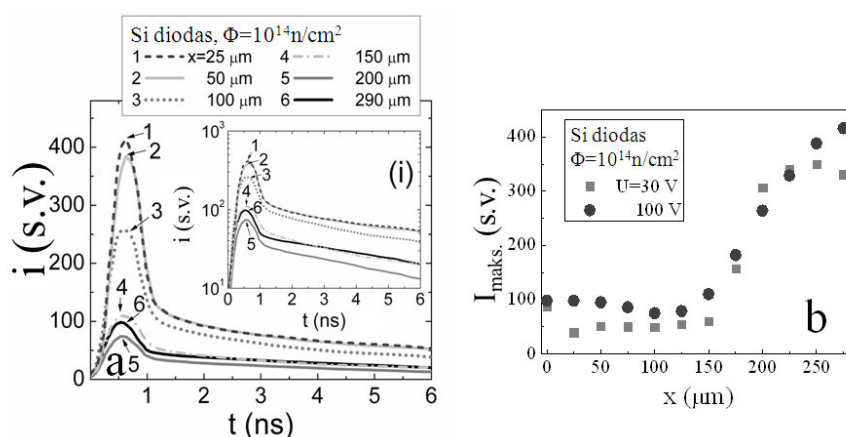


4.3 pav. Modelinės porų dauginimo srovės (i) kinetikos, suskaičiuotos kondensatoriniams GaN sensoriams. a – Pradinė signalo kinetikos dalis detektoriuje, kurio elektrodų plotas $S=10^{-4} \text{ cm}^2$, efektingas dauginimo koeficientas $\langle M(x, l) \rangle_{\lambda=2}$ krūvininko laisvo lėkio keliui, sensoriaus storis $d=5 \mu\text{m}$, išorinė įtampa $U=40 \text{ V}$, kai pradiniu momentu injektuojama $R=10$ krūvininkų porų, o krūvininkų rekombinacijos trukmė yra postuliuojama atitinkamoms modelinėms kreivėms taip: 1 – $\tau=20 \text{ ps}$, 2 – 2 ps, 3–1 ps, 4–0.5 ps. b – Sensoriaus signalai (kinetikos sumodeliuotos įskaitant keletą kaskadų (domenų pralėkimo tarp elektrodų aspektu) su tokiais parametrais (4.5) išraiškoje: $D=2 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\delta=0.5 \mu\text{m}$, $d=5 \mu\text{m}$, $v=10^6 \text{ cm/s}$, $\alpha=8000 \text{ cm}^{-1}$ ir tokiais rekombinacijos trukmės vertėmis 1- $\tau=\tau_D=\infty$, 2- $\tau=1 \text{ ns}$, 3- $\tau=300 \text{ ps}$; 4-20 ps. Ištininė (5) kreivė iliustruoja srovės signalo kinetiką esant bipoliniam dreifui, bet kai nepasireiškia vidinis stiprinimas [A3].

Aptartų aukščiau modelių adekvatumas sensorių signalų aprašymui buvo verifikuojamas profiluojant Si pin diodų signalus. Matavimai buvo vykdyti pasitelkiant eksperimentų schemas, pateiktas 4.1 pav. Užregistruotas Si diodų signalų kitimų profiliai yra iliustruojami 4.4 pav., kai buvo injektuojamas gana mažas (4.4a pav.) krūvis (atžvilgiu baterijos indukuoto paviršinio krūvio CU elektrode) ir krūvis, gebantis ekranuoti išorinį lauką (4.4b pav.). Šie skenuoti profiliai kokybiškai gerai dera su modeliniais, iliustruotais 4.2 pav.

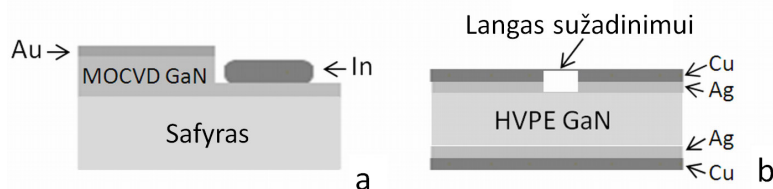


4.4 pav. Srovės (i) signalų kitimo profiliai, skenuoti Si pin diodo $300 \mu\text{m}$ storio n-laidumo tipo bazėje, kur legirantų koncentracija buvo $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, varijuojant injekcijos lokalizaciją ir esant mažo krūvio $q/q_C = q/C_g U \approx 10^{-3}$, $U=100 \text{ V}$ (a) ir gana didelio, $- q/q_C \approx 10$, $U=11 \text{ V}$ (b) krūvio injekcijos režimams [A9].



4.5 pav. Srovės (i) signalų profiliavimas 10^{14} n/cm^2 neutronų įtėkiu apšvitintame Si pin detektoriuje keičiant injekcijos lokalizaciją mažo injektuoto krūvio režime ($q/q_C \cong 10^{-3}$) kai $U=100 \text{ V}$. a – iliustruojamos srovės kinetikos (intarpe – logaritminėje skalėje). b – iliustruojamos srovių kinetikų smailių maksimalios vertės kitimo profiliai, esant skirtingoms išorinio šaltinio įtampoms [A9].

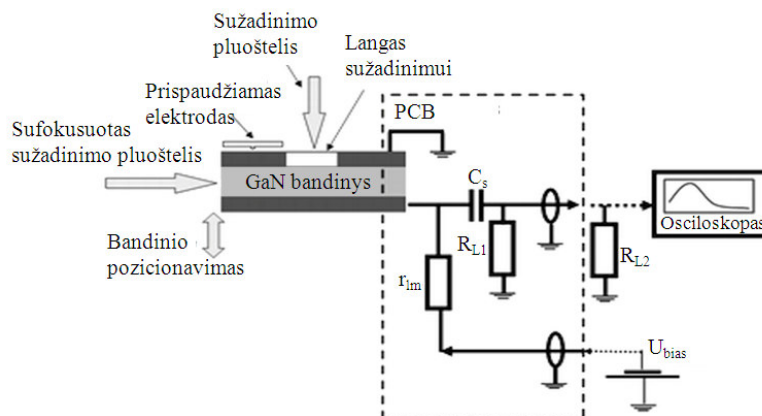
V-ame skyriuje aptarti GaN (HVPE, MOCVD) kondensatorinių ir Schottky diodų (MOCVD GaN) tipo sensorių formavimo technologija. Deimanto medžiagose galimi tik kondensatorinio tipo sensoriai, todėl šiame darbe jie nebuvo plačiau nagrinėti. MOCVD GaN dariniuose buvo suformuotos terasinės (meza) struktūros,- plazminio bei lazerinio ėsdinimo ir metalizacijos procedūromis. Struktūrų eskizai yra iliustruojam 5.1 pav. Kai kurie sensorių parametrai yra pateikti 5.1 lentelėje.



5.1 pav. Šotki diodų (SD) (a) ir kondensatorinių sensorių C_d (b) struktūros eskizai.

5.1 lentelė. GaN medžiagų ir sensorių parametrai.

GaN medžiaga	Sensoriaus storis (μm)	Medžiagos formavimo technologija	Sensorius tipas
u-GaN	24	MOCVD	C_d ir SD
SI GaN:Fe	475	HVPE	C_d
HVPE-LD	400	HVPE	C_d
HVPE-HD	400	HVPE	C_d



5.2 pav. Sensorių signalų profiliavimo grandynų schema.

Šiame skyriuje buvo plačiau ištirtos suformuotų GaN sensorių signalų charakteristikos. Čia taip pat buvo atlikti specifiniai modeliavimai dinaminiam artinyje, siekiant išskaidyti sparčią rekombinaciją (dėl didelio technologinių ir radiacinių defektų, aptartų 3 skyriuje, tankio šiose GaN medžiagose). Parodyta, kad sensoriaus signalo srovė, nagrinėjant sinchroniškai pasireiškiančią rekombinaciją ir dreifą užrašoma taip:

$$i(t) = \frac{d\sigma}{dt} S = \left[-\frac{\partial q_e(t)}{\partial t} (1 - \psi_e(t)) - q_h(t) \frac{d\psi_h(t)}{dt} - \frac{\partial q_h(t)}{\partial t} \psi_h(t) - q_h(t) \frac{\partial \psi_h(t)}{\partial t} \right] S. \quad (5.1)$$

Kitas reiškinys, būdingas GaN sensoriams, savitoji ir indukuota poliarizacija, į kurią tai pat turi būti atsižvelgta, analizuojant GaN detektorių signalus. Nagrinėjant šiuos specifinius režimus, parodyta, kad dinaminė poliarizacija mažų išorinio šaltinio įtampų srityje gali atsirasti dėl nusukdintų prie-elektrodinių sričių, t.y. erdvinio neištraukto krūvio (n_0) formavimosi bei įelektrintų gaudyklių sukuriama erdvinio krūvio sričių. Nusukdinimo srities plotis tada aprašomas tokia išraiška:

$$X_{e0}(n_0, U) = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U}{en_0 (d/2)^2}} \right) \approx \frac{d}{2} \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 (U/2)}{en_0 (d/2)^2} \right). \quad (5.2)$$

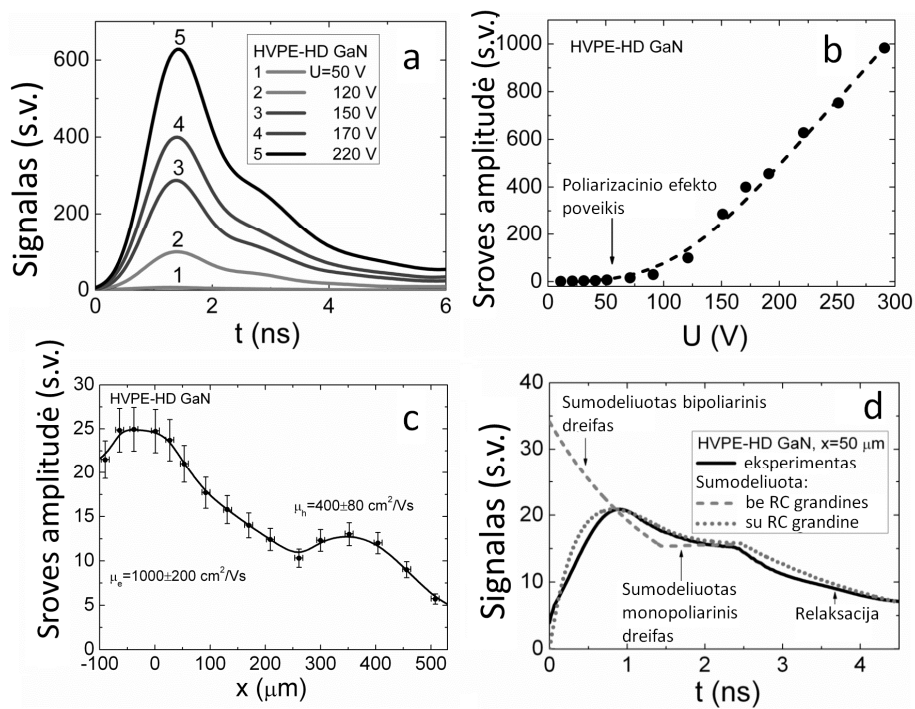
Srovės stiprio kitimas pradiniam kinetikos sande, pasireiškiant dinaminei poliarizacijai, aprašomas taip:

$$i_1(t) = S \frac{d\sigma}{dt} = \frac{S}{X_e(t)} \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 U}{X_e(t)} - en_0 X_e(t) \right) \frac{dX_e(t)}{dt}. \quad (5.3)$$

Iliustracijose (5.3 pav.) yra pateiktos būdingos sensorių signalų profiliavimo charakteristikos. Pradinė kinetikos (5.3a pav.) smailė ($i_{peak}(t) = q / \tau_{tr, bip}$), signalus profiliuojant išorine įtampa, atspindi bipolio dreifo sandą, kai vėlesniais momentais ima vyrauti krūvininkų pagavimas į defektų centrus. Srovės (5.3b pav.) kinetikos smailėje kitimas nuo pridėtos įtampos atspindi poliarizacijos pasireiškimą, - priepaviršiniame sluoksnyje susikaupęs krūvis ekranuoja išorinio šaltinio lauką, ir srovė mažai priklauso nuo įtampos, kai pastarosios vertės yra gana mažos. Tuo būdu poliarizacija blokuoja

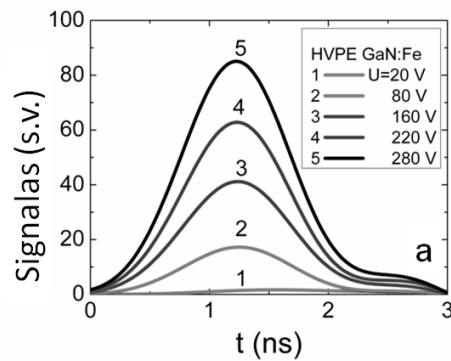
sensoriaus signalų valdymą įtampa, kai $U < 50$ V (5.3b pav.). Srovės augimas ima paklusti mažo krūvio dreifo dėsningumams ($i \sim U$), kai viršijama slenkstinė įtampa $U_{thr} \geq 100$ V (5.3b), ir srovė auga maždaug tiesiškai dėl tranzito trukmės (τ_{tr}) trumpėjimo, didinant įtampą ($U > 100$ V). Visgi, sparčios rekombinacijos GaN medžiagose dreifo trukmės ($\sim \tau_{tr}$) ir būdingo kelio ilgio neįmanoma tiksliai įvertinti iš šių (5.3 a pav.) kinetikų, kai krūvininkų pagavimas į defektų centrus nulemia baigiamąją impulso dalį, esant $\tau_R < \tau_{tr}$.

GaN sensoriuose, suformuotuose medžiagose su tinkamai ilga krūvininkų pagavimo trukme (HVPE–HD GaN), galima išskirti krūvininkų dreifinės srovės komponentes (5.3c ir 5.3d pav.). Čia srovės minimumas, srovės kitimų nuo injekcijos pradinės lokalizacijos (5.3c pav.) profilyje, leidžia nepriklausomu būdu įvertinti atstumą dreifo tų krūvininkų, kurie pirmieji pasiekia elektrodą, o iš sinchroniškai registruojamų kinetikų (5.3d pav.), galima įvertinti bipolio dreifo tranzito trukmę, nes srovės minimumas tokioje kinetikoje yra sietinas su vėluojančių krūvininkų monopolinio dreifo pradžia.

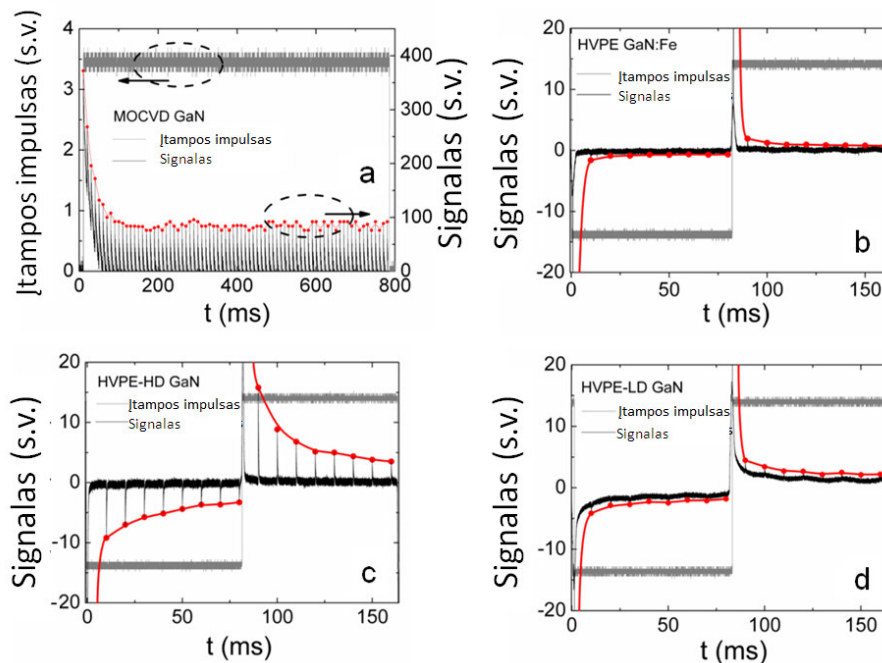


5.3 pav. GaN sensorių signalų profiliavimas keičiant išorinę įtampą (a, b) ir injekcijos lokalizaciją (c, d). Būdingos signalų kinetikos, užregistruotos MOCVD GaN, HVPE GaN:Fe (a) ir HVPE –HD GaN (d) sensoriams. Smailinės srovės kitimai, priklausantys nuo išorinio šaltinio įtampos (b) ir injekcijos lokalizacijos (c). Iliustracijoje (d) ištisinė kreivė yra eksperimentinė signalo kinetika, užregistruota sužadavimo pluošteliai sensoriaus briaunoje nutolus $x = X_0 = 50 \mu\text{m}$ nuo elektrodo, brūkšninė kreivė – idealizuota sensoriaus signalo kinetika sumodeliuota neįskaitant išorinės grandinės įtakos, taškinė kreivė – modelinė kinetika įskaitant užlaikymus dėl išorinės grandinės elementų [A1].

Žinoma, eksperimentinės kinetikos nėra idealios, todėl kinetikas tenka analizuoti, derinant modelines ir eksperimentines charakteristikas (kaip iliustruojama 5.3 d pav.). Krūvininkų, kurie pirmieji pasiekia elektrodą, tipas vienareikšmiškai identifikuojamas fiksuojant išorinės įtampos poliarumą. Kombinuojant srovės profilių, kinetikos formos ir būdingų parametrų analizę dinaminio modelio artinyje galima įvertinti krūvininkų dreifo parametrus. Tokiu būdu buvo įvertinti elektronų $\mu_e=1000\pm 200$ cm²/Vs ir skylių $\mu_h=400\pm 80$ cm²/Vs judriai HVPE-HD GaN medžiagos sensoriuose. Dėl daugiaparametrinio modeliavimo reikmės ir eksperimentinių paklaidų, judrių vertės čia gautos su ~20% paklaida. Vidutinės įvertintų judrių vertės gana gerai dera su literatūroje skelbiamais duomenimis.



5.4 pav. HVPE GaN:Fe sensoriaus kinetikų kaita varijuojant išorinio šaltinio įtampą [A1].

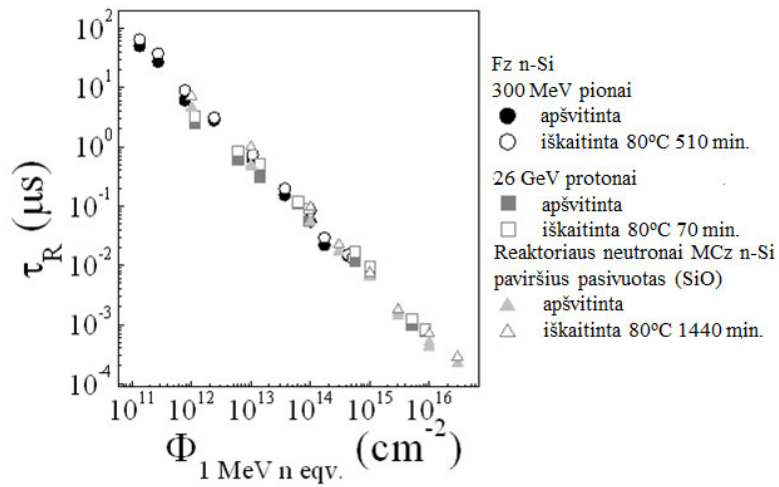


5.5 pav. MOCVD GaN šotkio sandūrų (a) ir GaN:Fe (b), HVPE-HD (c) bei HVPE-LD (d) kondensatorinio tipo (b) sensorių smailinės srovės kitimai veikiant išorinės įtampos impulsais ir seka injekcijos lazerio (400 ps trukmės) impulsų, pasikartojančių 100 Hz dažniu, dėl poliarizacinių efektų [A1].

Sensoriuose, suformuotuose pasitelkiant trumpos krūvininkų gyvavimo trukmės medžiagas, tokias kaip geležimi legiruotą, pusiau-izoliuojančią HVPE GaN medžiagą, sensoriaus atsako impulsų trukmė (5.4 pav.) yra artima krūvininkų pagavimo trukmei, pavyzdžiui, įvertintai MW-PC būdu. Viršijus slenkstinę įtampą (poliarizacinių efektų pasireiškimo aspektu) srovė impulso smailėje auga beveik tiesiškai. Tai leistų kontroliuoti antrinių krūvininkų porų tankio kitimus, tačiau apie injekcijos gylį (dalelių sensoriuje pralėkimo poziciją) šiuo atveju gauti informaciją neįmanoma.

Kaip minėta aukščiau, sensorių signalai mažų išorinių įtampų intervale yra perturbuojami poliarizacinių efektų. Paviršinio krūvio susidarymas yra kaupiamąjį pobūdžio, t.y. kai neištraukti lauku krūvininkai sudaro judrių krūvininkų arba pagautų į priepaviršines gaudykles erdvinį krūvį, kuris ekranuoja išorinio šaltinio lauką, vienodo intensyvumo injekcijos impulsai sukuria vis mažesnį sensoriaus signalą, kaip galima matyti 5.5 pav. Šį erdvinį ekranuojantį krūvį galima ištraukti tik pakeitus išorinio šaltinio įtampos poliarumą. Tam galima pasitelkti meandrinį bipolių išorinės įtampos impulsų šaltinį, kai pasikeitus impulso poliarumui, atsistato sensoriaus signalo amplitudė. Impulsinės išorinės įtampos pasitelkimas taip pat leidžia išvengti abejonių dėl medžiagos kaitimo. Iš poliarizacijos relaksacijos pobūdžio (5.5 pav.) sensoriuose, suformuotuose įvairių medžiagų pagrindu, matosi, kad medžiagos defektiškumas nulemi poliarizacijos dydį ir sensoriaus atstatymo trukmę.

VI-ame skyriuje aptarti Si dozimetriniai sensoriai, kurie yra aktualūs itin didelių apšvitos aukštųjų energijų hadronais įtėkių įvertinimui. Šiame skyriuje aptarti radiacinių defektų spektras įvairios technologijos ir laidumo tipo Si medžiagose, kurie nulemia krūvininkų rekombinacijos trukmę. Matuojant šią rekombinacijos trukmę MW-PC būdu ir susiejant ją su apšvitos įtėkių (6.1 pav.), galima pagaminti gan pigius ir paprastus dozimetrinius sensorius. Šiame darbe buvo parodyta, kad Si plokštelių fragmentai gali būti pasitelkti ir trumpai gyvuojančių sub-atominių dalelių, tokių kaip pionai, apšvitų dozimetrijai. Įvedus reikiamas pataisas, eliminuojant technologinių defektų įtaką rekombinacijos trukmei bei ekvivalentą apšvitos įtėkiams, buvo sudaryta kalibracinė gyvavimo trukmės-įtėkio funkcinė charakteristika (ilustruojama 6.1 pav.) Pionų arba kitų hadronų įtėkio vertė gal būti sparčiai ir nesąlytiniu būdu įvertinta išmatavus krūvininkų rekombinacijos trukmę ir pasitelkus 6.1 pav. kalibracinę kreivę.



6.1 pav. Krūvininkų rekombinacijos trukmės kitimai FZ n-Si plokštelės fragmentuose, apšvitintuose 300 MeV pionais, 26 GeV protonais ir reaktoriaus neutronais, priklausantys nuo apšvitos įtėkio. Tokie dozimetriniai Si sensoriai gali būti sukalibruoti perskaičiuojant įtėkio vertes į ekvivalenčią 1 MeV energijos neutronų apšvitai [P1].

Esminių rezultatų suvestinė ir išvados

1. Savitųjų ir radiacinių defektų parametrų įvairiapusiško įvertinimo metodologija, kombinuojant sąlytines ir nesąlytines matavimų bei spektroskopijos metodikas, užtikrina reikiamą informaciją pasirenkant medžiagas ir struktūrų architektūrą bei projektuojant ir formuojant sparčius sensorius plačiatarpių puslaidininkių medžiagose.
2. Dinaminiai modeliai, sukurti sensorių signalų aprašymui, yra aprobuoti analizuojant signalų kitimų profilius, skenuojamus diskretiškai varijuojant detektorių maitinimo įtampą ir krūvininkų injekcijos lokalizaciją.
3. Buvo sukurti krūvininkų porų dauginimo dinaminiai modeliai, skirti aprašyti sensorių signalus esant smūginei jonizacijai ir lavininiams procesams, kurie yra tinkami sensorių su vidiniu stiprinimu -projektavimui.
4. Kondensatorinio ir Šotki diodų tipo sensoriai buvo sukonstruoti ir suformuoti GaN medžiagose. Buvo aptikta ir iširta poliarizacinių efektų įtaka šių sensorių operacinėms charakteristikoms, kai poliarizacinių efektų vaidmuo didėja mažinant detektorių maitinimo įtampą.
5. Poliarizacijos relaksacija priklauso nuo GaN medžiagos legiravimo. Poliarizacijos signaluose atskleisti nuostovūs ir dinaminis sandai.
6. Sensorių krūvio surinkimo efektyvumas gali būti ženkliai ribojamas mažų įtampų srityje dėl išorinio lauko ekranavimo poliarizacijos paviršiniu krūviu, kai krūvininkai yra injektuojami tūryje, apimančiame visą tarp-elektrodeinę sritį.
7. Krūvininkų dreifo sandas gali būti patikimai išskirtas ilgos rekombinacijos trukmės GaN medžiagose skenuojant aštriai fokusuotu lazerio pluošteliu krūvininkų injekcijos lokalizaciją sensoriaus briaunoje. Dreifo kelio ilgis ir tranzito trukmė gali būti tinkami įvertinti suderintai analizuojant signalų smailinės srovės priklausomybę nuo injekcijos lokalizacijos ir signalo kinetikas, esant fiksuotai injekcijos lokalizacijai. Pasitelkiant šiuos dreifo kelio ilgio ir tranzito trukmės parametrus krūvininkų judriai gali būti įvertinti, kurių vertės HVPE-HD GaN medžiagai buvo gautos tokios: $\mu_e = 1000 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ elektronams ir $\mu_h = 400 \pm 80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ skylėms.
8. Sinchroniškai matuojant ir suderintai analizuojant krūvininkų rekombinacijos ir liuminescencijos charakteristikas apšvitos metu galima įvertinti radiacinių defektų sudarymo spartos koeficientą. Buvo gauta šio koeficiento vertė $K_p \approx 0.6 \text{ cm}^{-1}$, kuri nulemia, kad GaN medžiagų radiacinių degradacija prasideda, kai medžiaga apšvitinama hadronų įtekiais didesniais už 10^{14} cm^{-2} .
9. Palyginant liuminescencijos spektrus ir liuminescencijos intensyvumo relaksacijos parametrus (liuminescenciją sužadinant lazerio ir protonų pluošteliu) galima įvertinti GaN sensorių efektyvumą, registruojant optinius ir elektrinius signalus, ir jautrį skvarbiųjų dalelių detektavimui. Buvo gauti GaN medžiagoms tokie parametrai: 1.6 MeV protonas sukuria antrinių krūvininkų porų tankį $\kappa_p = \langle n_p \rangle / N_p \approx 1.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ir $\kappa_p A_{pr} = 40 \mu\text{m}^{-1} \text{ p}^{-1}$ antrinių krūvininkų porų sensoriaus ilgio mikrometre. Matuojant kalibruotą (lazerio indukuotam

fotoluminescencijos intensyvumui) liuminescencijos intensyvumo kitimą priklausomą nuo apšvitos įtėkio galima suformuoti optinės detekcijos dozimetrinius sensorius GaN medžiagų pagrindu.

10. Skenuojant rekombinacijos trukmės pasiskirstymą 1 cm^2 ploto Si dozimetriniuose sensoriuose buvo įvertintas pionų pluoštelio ženklus išplitimas. Pionų pluošteliu radiaciniai defektai sukurti Si dozimetruose yra termiškai gana stabilūs su mažu planarinės migracijos nuotoliu. Dėl to Si plokštelių fragmentų pagrindu suformuoti dozimetriniai sensoriai gali būti pasitelkti pionų pluoštelių profiliavimui.

11. Absoliutinės krūvininkų rekombinacijos trukmės vertės įvairios technologijos Si, apšvitinto įvairiomis hadronų spinduliuotėmis (pionais, protonais, reaktoriaus neutronais), yra artimos ir sudaro vieningą dozinės priklausomybės kalibracinę funkciją.

Publikacijų, kurių pagrindu paruošta ši disertacija, sąrašas

Straipsniai:

- A1. E. Gaubas, T. Ceponis, E. Kuokstis, D. Meskauskaite, **J. Pavlov** and I. Reklaitis, *Study of Charge Carrier Transport in GaN Sensors*, *Materials* **9** (2016) 293.
- A2. **J. Pavlov**, T. Ceponis, E. Gaubas, D. Meskauskaite, I. Reklaitis, J. Vaitkus, R. Grigonis and V. Sirutkaitis, *Comparative study of deep levels in HVPE and MOCVD GaN by combining O-DLTS and pulsed photo-ionization spectroscopy*, *JINST* **10** (2015) C12015.
- A3. E. Gaubas, T. Ceponis, V. Kalesinskas, **J. Pavlov** and J. Vysniauskas, *Simulations of Operation Dynamics of Different Type GaN Particle Sensors*, *Sensors* **15** (2015) 5429-5473.
- A4. E. Gaubas, T. Čeponis, **J. Pavlov**, *Modeling of radiation damage recovery in particle detectors based on GaN*, *Nucl. Instrum. Meth. B* **365** (2015) 163-167.
- A5. E. Gaubas, T. Čeponis, **J. Pavlov**, A. Tekorius, *In situ variations of the scintillation characteristics in GaN and CdS layers under irradiation by 1.6 MeV*, *Nucl. Instrum. Meth. B*, **365** (2015) 159-162.
- A6. E. Gaubas, T. Ceponis and **J. Pavlov**, *Pulsed current signals in capacitor type particle detectors*, *Journal of instrumentation*, *JINST* **10** (2015) C01006.
- A7. E. Gaubas, T. Ceponis, **J. Pavlov**, A. Jasiunas, V. Jonkus, D. Meskauskaite and A. Tekorius, *Carrier decay and luminescence characteristics in hadron irradiated MOCVD GaN*, *JINST* **9** (2014) C12044.
- A8. E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiunas, V. Kalendra, **J. Pavlov**, N. Kazuchits, E. Naumchik, M. Rusetsky, *Lateral scan profiles of the recombination parameters correlated with distribution of grown-in impurities in HPHT diamond*, *Diam. Relat. Mater.* **47** (2014) 15-26.
- A9. E. Gaubas, T. Ceponis, **J. Pavlov**, and A. Baskevicius, *Profiling of the injected charge drift current transients by cross-sectional scanning technique*, *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 054509.
- A10. **J. Pavlov**, D. Bajarūnas, T. Čeponis, E. Gaubas, D. Meškauskaitė, *Spectroscopy of Technological Defects in Si Solar Cells by Analysis of Temperature Dependent Generation Currents*, *Mater. Sci-Medzg.* **20** (2014) 252-255.
- A11. **J. Pavlov**, E. Gaubas, T. Ceponis, *Simulation of the Pulsed Current Responses in GaN and Diamond Based Capacitor Type Particle Detectors*, *Materials of the international Conference Proceedings “Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2014”* Kaunas, Technologija (2014) 278-281.
- A12. T. Ceponis, E. Gaubas, V. Balevicius, S. Galkin, A. Jasiunas, K. Katrunov, V. Kovalevskij, **J. Pavlov**, V. Remeikis, D. Shevchenko, G. Tamulaitis, A. Tekorius, *Comparative Study of Scintillation Characteristics of CdS and ZnSe Varied during 1.6 MeV proton irradiation*, *Materials of the*

international Conference Proceedings, Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2014, Kaunas, Technologija (2014), 405-408.

A13. E. Gaubas, T. Čeponis, **J. Pavlov**, A. Velička, V. Kalesinskas, *Spectroscopy of radiation traps in Si by temperature dependent photoconductivity and generation currents*, Lith. J. Phys. **54**, (2014) 89-93.

A14. E. Gaubas, D. Bajarūnas, T. Čeponis, D. Meškauskaitė, and **J. Pavlov**, *Optically induced current deep level spectroscopy of radiation defects in neutron irradiated Si PAD detectors*, Lith. J. Phys. **53** (2013) 215-218.

A15. E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiunas, V. Kovalevskij, D. Meskauskaite, **J. Pavlov**, V. Remeikis, A. Tekorius, J. Vaitkus, *Correlative analysis of the in situ changes of carrier decay and proton induced photoluminescence characteristics in chemical vapor deposition grown GaN*, Appl. Phys. Lett. **104** (2014) 062104.

Pranešimai konferencijose:

P1. E. Gaubas, T. Ceponis, **J. Pavlov**, J. Vaitkus, M. Moll, C. Gallrapp, M. Glaser, B. Gkotse, F. Ravotti. *Carrier lifetime variations in pion irradiated and annealed Si*. 27th RD50 Workshop, CERN, Geneva, 2015.

P2. **J. Pavlov**, T. Ceponis, E. Gaubas, D. Meskauskaite, J. V. Vaitkus, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, *Comparative study of deep levels in HVPE and MOCVD GaN by combining O-DLTS and pulsed photo-ionization spectroscopy*, iWoRiD'15, DESY Hamburg, 2015.

P3. J. Vaitkus, E. Gaubas, T. Ceponis, **J. Pavlov**, I. Reklaitis, *Transient signals of the capacitor and Schottky barrier type HVPE and MOCVD GaN sensors*, iWoRiD'15, DESY Hamburg, 2015.

P4. **J. Pavlov**, E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiunas, V. Kovalevskij, D. Meskauskaite, A. Tekorius. *In situ changes of carrier decay and proton induced photoluminescence characteristics in MOCVD grown GaN*, iWoRiD'14, Trieste, 2014.

P5. T. Ceponis, E. Gaubas, **J. Pavlov**, *Pulsed current signals in capacitor and junction type particle detectors*, iWoRiD'14, Trieste, 2014.

P6. E. Gaubas, T. Ceponis, **J. Pavlov**, and J. Vysniauskas, *Operation characteristics and radiation damage of particle detectors based on GaN*, IBMM2014, Leuven, 2014.

P7. T. Ceponis, E. Gaubas, **J. Pavlov**, and A. Tekorius, *In situ variations of the scintillation characteristics in GaN and CdS layers under irradiation by 1.6 MeV protons*, IBMM2014, Leuven, 2014.

P8. **J. Pavlov**, E. Gaubas, T. Ceponis, *Simulation of the Pulsed Current Responses in GaN and Diamond Based Capacitor Type Particle Detectors*, International conference Radiation Interaction with Material: Fundamentals and Applications, Kaunas, 2014.

P9. A. Tekorius, E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiunas, V. Kovalevskij, D. Meskauskaite, **J. Pavlov**, V. Remeikis, J. Vaitkus, *In Situ and Ex Situ Study of Variations of Recombination Characteristics in MOCVD Grown GaN under*

Hadron Irradiations, International conference Radiation Interaction with Material: Fundamentals and Applications, Kaunas, 2014.

P10. **J. Pavlov**, T. Čeponis, E. Gaubas. *Profiling of current transients in silicon particle detector*, Advanced materials and technologies, Palanga, 2013.

P11. **J. Pavlov**, D. Bajarūnas, T. Čeponis, E. Gaubas. *Technologinių defektų si saulės elementuose spektroskopija generacinės srovės temperatūrinių kitimų analizės būdu*. LNFK, Vilnius, 2013.

P12. E. Gaubas, T. Čeponis, **J. Pavlov**, A. Šimkutė, A. Stalnionis. *Dreifo srovės kinetikų dalelių detektoriuose profiliavimas skersinės žvalgos būdu*. LNFK, Vilnius, 2013.

P13. D. Bajarūnas, T. Čeponis, E. Gaubas, **J. Pavlov**, *Radiacinių defektų giliųjų lygmenų spektroskopija neutronais apšvitinto Si detektoriuose optiškai injektuotų srovių kinetikų metodu*, LNFK, Vilnius, 2013.

P14. E. Gaubas, T. Čeponis, V. Kalendra, **J. Pavlov**, J. V. Vaitkus, *Radiacinių defektų spektroskopija ir srovių dalelių detektoriuose profiliavimas*, LNFK, Vilnius, 2013.

P15. **J. Pavlov**, E. Gaubas, T. Čeponis, V. Kalendra, *Radiacinių defektų spektroskopija CERN standarto Si detektoriuose*, third junior researchers' conference (III JMK), Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose – 2012, Vilnius, 2013.

Summary

The research problems, scientific relevance and novelty, objectives of the research and practical importance are discussed within Introduction section. The statement defence as well as author contribution are there determined in the Introduction section. In Chapter 2, the issues concerned with technological and radiation defects in the analyzed semiconductor materials and pulsed current signals in capacitor type particle detectors are briefly reviewed to ground motivation of this research. Chapter 3 is devoted to analysis of the main characteristics of the initial materials for sensor fabrication. There the measurement techniques are also briefly described. In Chapter 4, the dynamic models for description of sensor pulsed responses and results of the profiling of pulsed current signals in GaN detectors are presented. The tentative technologies for fabrication of GaN different type sensors, sensor operation characteristics and carrier drift/recombination parameters extracted from pulsed characteristics are discussed in Chapter 5. There, the appearance of polarization effects and characteristics of their relaxation are also discussed. The dosimetry sensors made of different type Si and their sensitivity to pion irradiations are discussed in Chapter 6. The general conclusions are presented at the end of dissertation.

Gyvenimo aprašymas

Vardas Pavardė	Jevgenij Pavlov	
Gimimo data ir vieta	1987 m. kovo 11 d., Vilnius, Lietuva	
Išsilavinimas	2005-2009	Fizikos bakalauro studijos, Vilniaus Universitetas
	2009-2011	Madžiagotyros ir puslaidininkų fizikos magistro studijos, Vilnius Universitetas
	2012-2016	Medžiagų inžinerijos doktorantūros studijos, Vilniaus Universitetas
Darbo patirtis	2008-2009	Technologas Taikomųjų Mokslų Institute
	2009-2011, 2012-2013	Inžinierius Taikomųjų Mokslų Institute
	Nuo 2013	Jaunesnysis mokslo darbuotojas Taikomųjų Mokslų Institute
Publikacijos	20 straipsnių, įtrauktų į ISI duomenų bazę, 18 pranešimų konferencijose	
Komandiruotės-stažuotės	CERN, Šveicarija	2015/07
	CERN, Šveicarija	2014/11
	CERN, Šveicarija	2012/11
	Helsinki, Suomija	2009/12