

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

AUDRIUS TEKORIUS

**DIDELIŲ ĮTĖKIŲ HADRONŲ APŠVITŲ DOZIMETRIJOS KOMBINUOTI
METODAI IR ĮRANGA**

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2015

Disertacija rengta 2011 – 2015 metais Vilniaus universiteto Fizikos fakultete.

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

Disertacija ginama jungtinėje Vilniaus universiteto ir FTMC Fizikos mokslo krypties taryboje:

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

Nariai:

Habil. dr. Vladimiras Gavriušinas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Prof. habil. dr. Antanas Feliksas Orliukas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Prof. habil. dr. Artūrs Medvids (Rygos Technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Prof. habil. dr. Artūras Plūkis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama 2015 m. rugsėjo 23 d. 15⁰⁰ val. 212 auditorijoje Vilniaus universitete Saulėtekio al. 9-III, LT- 10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2015 m. rugpjūčio 21 d.

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

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

AUDRIUS TEKORIUS

**COMBINED METHODS AND INSTRUMENTATION FOR DOSIMETRIC
MONITORING OF THE LARGE FLUENCE HADRON IRRADIATIONS**

Doctoral dissertation

Physical sciences, Physics (02P)

Vilnius, 2015

Doctoral dissertation was prepared during period of 2011 – 2015 years at Vilnius University Faculty of Physics.

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

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

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

Members:

Dr. Sc. Vladimiras Gavriušinas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Prof. Dr. Sc. Antanas Feliksas Orliukas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Prof. Dr. Sc. Artūrs Medvids (Riga Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Prof. Dr. Sc. Artūras Plūkis (Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

The dissertation will be defended on 23rd of September in 2015, 3 PM in auditorium Nr. 212 in Vilnius University Saulėtekio al. 9-III, LT- 10222, Vilnius, Lithuania.

Summary of the dissertation sent on 21st of August in 2015.

The dissertation is available at Vilnius University, Center for Physical Sciences and Technology libraries and on internet: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Įvadas

Tyrimų aktualumas ir tikslas

Dozimetrijos metodai ir įranga yra plačiai išvystyti radiacinės saugos ir medicininės terapijos baruose. Čia registruojamų dozių diapazonas dažniausiai apima 1 mGy – 20 Gy (J/kg) sritį. Šioje srityje siekiama kuo tiksliau išmatuoti spinduliuotės poveikius biologiniams audiniams. Vystant spinduliuotėmis pagrįstus diagnostikos ir gydymo metodus, pasitelkiami vis sudėtingesni apšvitų šaltiniai ir apšvitų detektavimo metodai, skirti sutelkto spinduliuočių poveikio dozimetrijai ir dozių erdvinio pasiskirstymo skenavimui, detektuojant gana mažas dozes.

Vystant aukštųjų energijų fizikos eksperimentus ir naujos kartos spinduliuočių/dalelių generatorius, pagrįstus vis didesnio ryškio dalelių greitintuvų bei nuskėlėjų (spalator'ių) kūrimu, iškyla nauja dozimetrijos sritis, skirta itin didelių dozių (>200 kGy) įvertinimui. Viena tokių dozimetrijos šakų yra spinduliuočių šaltinių ir poveikio spinduliuočių detektoriams parametrų įvertinimas. Čia įprastai naudojamas laike integruoto spinduliuotės srauto įvertis, lietuviškoje terminijoje vadinamas įtėkiu, angliškoje, – fluence. Elektringų dalelių įtėkis įprastai nusakomas sukaupto dalelių skaičiaus, tenkančio vienetiniam plotui (cm^{-2}), dydžiu. Įtėkio stebėseną (monitoringą) yra svarbi tiek siekiant numatyti dalelių detektorių, veikiančių „karštuose“ spinduliuočių laukuose, tiek elektronikos bei pluoštelių atlenkimo sistemų funkcionalumą. Dėl itin didelių įtėkių sukaupto per gana trumpą poveikio ekspoziciją, įtėkių monitoringe atsiranda specifinės problemos: dozimetrų radiacinio atsparumo, radiacinių defektų evoliucijos bei inžinerijos, kuriant spinduliuotėms tolerantiškus sensorius, reikmė vykdyti nuotolinius dozimetrinius matavimus (siekiant apsaugoti matavimų įrangą ir personalą), aprėpti didelius stebėsenos plotus ir tūrius, kai šiuolaikinių dalelių greitintuvų geometriniai matmenys kinta nuo šimtų metrų (pvz., konstruojamas Lund'o spalatorius) iki dešimčių kilometrų (pvz., CERN). Dideliems įtėkiams detektuoti yra pasitelkta keletas fizikos reiškinių: elektrinių charakteristikų dalelių detektoriuose degradacija (pvz., nuotėkio srovės išaugimas), branduolinės reakcijos (pvz. transmutacijos metalinėse folijose, kadangi spinduliuočių dalelių energijos viršija slenkstines vertes branduoliniams virsmams aktyvuoti), cheminiai medžiagų pokyčiai (polimerizacija gel-sensoriuose, laisvųjų radikalų susidarymas organiniuose sacharozės/alanino jutikliuose). Plataus įtėkių diapazono dozimetrijai yra ypač aktualios sensorių signalų tiesiškumo charakteristikos. Daugelis pasitelktų įtėkių monitoringo metodų ir detektorių užtikrina signalų tiesinius sąryšius su registruojamu įtėkiu tik gana siaurame diapazone. Dažnai signalų nuskaitymo procedūra yra sudėtinga ir ilgai trunkanti. Todėl didelių įtėkių monitoringui yra aktualūs tiek efektyvių fizikinių principų paieška, tiek pigių dozimetrijos medžiagų bei spartaus sensorių signalų nuskaitymo metodų kūrimas.

Šio darbo tikslas buvo aukštųjų energijų dalelių apšvitų efektyvių dozimetrijos principų bei metodų paieška ir įrangos kūrimas, siekiant surasti efektyvias sensorių medžiagas ir sparčius bei patikimus būdus hadronų apšvitų didelių įtėkių registravimui plačiame įtėkių diapazone, kuriuos būtų galima taikyti greitintuvų aplinkos bei branduolinės energetikos objektų monitoringui.

Uždaviniai

Siekiant užsibrėžto tikslo ir įtėkių dozimetrijai pasitelkiant puslaidininkinius sensorius, kuriuose registruojama parametrų kaita, priklausanti nuo spinduliuotėmis sudarytų radiacinių defektų tankio, buvo suformuluoti tokie pagrindiniai uždaviniai:

- įrangos, skirtos nesąlytiniam krūvininkų gyvavimo trukmių matavimui Si sensoriuose, naudojant mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų metodą, išplitusių ir taškinių defektų tankio pokyčių, priklausomų nuo įtėkio, selektyviam įvertinimui, optimizavimas;

- technologinių ir spinduliuotės sukurtų defektų charakterizavimas polikristaliniuose CdS ir Cu₂S hetero-sandūrų sluoksninėse struktūrose, siekiant sukurti dvigubos paskirties sensorius bei kombinuotus metodus, įgalinančius registruoti optinius ir elektrinius signalus;

- technologinių ir spinduliuotės sukurtų defektų charakterizavimas MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksiniuose sluoksniuose, krūvininkų transporto bei rekombinacinių parametrų kaitos įvertinimas. Antrinių krūvininkų porų generacijos hadronais efektyvumo tyrimas, siekiant sukurti būdus vienalaikiam optinių ir elektrinių signalų detektavimui bei sukurti greitą ir atsparų spinduliuočių pažeidoms jutiklį;

- nesąlytinių metodų, skirtų in situ ir nuotoliniams elektrinių ir optinių signalų matavimams plačiatarpėse puslaidininkinėse medžiagose jas švitinant protonais, išvystymas;

- technologinių ir spinduliuotėmis sukurtų krūvininkų gaudyklių kombinuotos spektroskopijos metodų sukūrimas;

- siekiant išvystyti naujas pasyvuoto krašto formavimo technologijas didelės erdvinės skyros juostelinių sensorių sukūrimui, vienas uždavinių buvo paviršinės rekombinacijos greičio įvertinimas ieškant būdų paviršinės nuotėkio srovės sumažinimui pasyvuojant nuskeltą juostelinių detektorių matricų kraštą bei formuojant paviršių pasyvuojančias dangas, sudarant Al₂O₃, Si_xN_y bei SiO₂ sluoksnius, kuriuose yra vidinis statinis krūvis, stabdantis krūvininkų patekimą į paviršinės rekombinacijos centrus, sudarymo technologijos.

Mokslinis naujumas

Išsami krūvininkų rekombinacijos ir pagavos gyvavimo trukmių priklausomybės nuo hadronų įtėkio ir iškaitinimo analizė didžiavaržiuose pasyvuoto paviršiaus Si dariniuose sudaro pagrindą selektyviam aukštųjų energijų apšvitų sukurtų taškinių ir išplitusių defektų parametrų įvertinimui. Tiesioginiai krūvininkų tankio relaksacijos bei fotolaidumo pokyčių matavimai atlikti naudojant mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų analizę leido sukurti plataus įtėkių intervalo (10^{10} - 3×10^{16} cm⁻²) dozimetą su artima tiesinei atsako charakteristika. Tokiu būdu spartus greitintuvų aplinkų dozimetris monitoringas dideliame greitintuvo infrastruktūros plote gali būti vykdomas pasitelkiant didelės varžos ir pasyvuoto paviršiaus Si plokštelių fragmentus, kurie tarnauja dozimetrijos jutikliais, ir atliekant periodinius krūvininkų gyvavimo trukmės matavimus įrenginiu VUTEG-5-AIDA. Siekiant apsaugoti jutiklius nuo mechaninių pažeidimų ir Si sensorius priskirti stebėsenos taškams, nedidelio ploto Si plokštelių fragmentai yra pakuojami plastikiniuose dėkluose, kurie yra skaidrūs zonduojančių infraraudonosios ir mikrobangų spinduliuotės pluošteliams. Šio darbo naujumą sudaro matavimų technologija ir krūvininkų tankio relaksacijos spartos susiejimas su apšvitų įtėkiais ir radiacinių defektų tipu. Šiame darbe parodyta, kad

kombinuotos ir įvairiapusės giliųjų lygmenų spektroskopijos, barjerinės talpos Cu_2S -CdS hetero-sandūrose, liuminescencijos laike ir erdvėje išskirtosios spektroskopijos bei mikroskopijos ir krūvininkų transporto modeliavimo polikristalinėse CdS medžiagose metodikos yra patikimas būdas plačiatarpių medžiagų, perspektyvių dalelių sensorių gamybai, įvertinimui. Šiame darbe pirmąkart buvo įvertinti antrinių krūvininkų porų sukūrimo efektyvumo detektoriuje ir radiacinių defektų susidarymo spartos parametrai polikristalinio Cu_2S -CdS hetero-sandūrinėse struktūrose ir polikristalinio CdS sluoksniuose. Tai yra svarbu pigių, polikristalinių medžiagų funkcinių parametru nustatymui sensorių projektavime, kuriant didelio įtėkio hadronų spinduliuotės dozimetrus. Sukurta metodologija, eksperimentiniai būdai ir įranga nesąlytiniam bei nuotoliniam krūvininkų tankio relaksacijos parametru ir scintiliacijos spektrinių charakteristikų vienalaikiam tyrimui apšvitų metu, kuri aprobuota polikristalinių CdS sluoksnių bei kristalinio GaN parametru, svarbių dozimetrijai, matavimams. Parodyta, kad antrinių krūvininkų porų sukūrimo efektyvumo ir radiacinių defektų susidarymo spartos MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksinuose sluoksniuose parametrai ir jų sąsajos su struktūros netvarkos parametrais priklauso nuo apšvitos įtėkio. Pasiūlytas modelis paaiškinti krūvininkų srautų persiskirstymą tarp spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos centrų, kuris nulemia liuminescencijos gesinimą polikristaliniuose CdS dariniuose. Šiame darbe pirmąkart susieti relaksacijos procesų netvarkiose CdS ir GaN struktūrose parametrai su medžiagos fraktališkumo parametrais ir eksperimentiškai atskleistos elektrinių charakteristikų (barjerinės talpos ir kt.) sąsajos su mikrokristalų dydžio bei jų pasiskirstymo charakteristikomis. Sukurtos metodikos paviršinės rekombinacijos greičiui įvertinti, nuskeltų juostelinių Si detektorių krašto pasyvavimo efektyvumui įvertinti. Tai svarbu kuriant didelės erdvinės skyros dalelių detektorių formavimo technologijas.

Praktinė svarba

Sukurta dozimetras VUTEG-5-AIDA buvo įdiegtas Europos Branduolinių Tyrimų Centre (CERN) Ženevoje, dalelių detektorių ir įrangos monitoringui. Įrenginys ir tyrimo metodikos buvo pritaikytos medžiagų ir apšvitos charakterizavimui, naudojant neutronų spalatorių Louvain la Neuve bei Tandem tipo elektringų dalelių greitintuvus, esančius Fizikos institute (FMTC, Vilnius) ir Helsinkio universitete, vykdant FP7 projektą AIDA.

Spartus dalelių greitintuvų aplinkų monitoringas, įgyvendinamas instrumentu VUTEG-5-AIDA, gali būti taikomas ir branduolinėse elektrinėse bei branduolinių atliekų saugyklose.

Sukurta metodologija, eksperimentiniai būdai ir įranga, skirta nesąlytiniam, nuotoliniam bei vienalaikiams krūvininkų relaksacijos ir liuminescencijos spektrinių parametru matavimams polikristaliniuose Cu_2S -CdS ir epitaksinio GaN dariniuose apšvitų metu, gali būti naudojama naujų medžiagų, atsparių aukštos energijos spinduliuotėms charakterizavimui.

Buvo patvirtinta, kad antrinių krūvininkų porų sukūrimo efektyvumo ir radiacinių defektų susidarymo spartos įvertinimo eksperimentiniai būdai yra tinkami dalelių detektorių funkcinių charakteristikų ir medžiagų parametru įvertinimui, ir šie metodai gali būti panaudoti ieškant alternatyvių scintiliacinių medžiagų, A_2B_6 ir A_3B_5 junginių pagrindu.

Išvystyti metodai ir įranga, skirti nesąlytiniam bei nuotoliniam apšvitų signalų detektavimui, naudojant vienalaikį elektrinių bei scintiliacinių parametrų registravimą, gali būti panaudota dvigubų sensorių bei jų sistemų kūrimui ir testavimui.

Sukurtos eksperimentinės metodikos paviršinės rekombinacijos greičiui matuoti, siekiant įvertinti nuskeltų juostelinių Si detektorių krašto pasyvavimo efektyvumą, yra svarbios kuriant didelės erdvinės skyros dalelių detektorių formavimo technologijas.

Ginamieji teiginiai:

1. Krūvininkų rekombinacijos ir transporto parametrų įvertinimo metodologija, pagrįsta elektrinių bei optinių signalų, sukeltų to paties lokalaus sužadavimo trikdžio, laikinių ir spektrinių charakteristikų sinchroniniais matavimais ir analizės bei derinimo modeliu, leidžia įvertinti mikro-kristalitinių plačiatarpių puslaidininkinių struktūrų netvarkumo bei radiacinių poveikių parametrus, kai elektriniai mikrobangomis zondojuojamo fotolaidumo relaksacijos ir spektriškai išskirtosios liuminescencijos kinetinių signalai registruojami iš tos pačios sužadintos bandinio srities.

2. Sukurtas metodas paremtas krūvininkų rekombinacinių ir pagavos komponentų kontrole stipriai apšvitintuose ir termiškai apdorotuose didžavaržio, pasyvuoto paviršiaus Si plokštelių fragmentuose, leidžia selektyvią įtėkių dozimetriją intervale nuo 10^{11} iki 10^{16} cm^{-2} išlaikant kalibracinių charakteristikų tiesiškumą. Paviršinės rekombinacijos parametrų patikimam įvertinimui, plonose padidintos erdvinės skyros detektorių pasyvuotose struktūrose, turi būti naudojamas kombinuotas lygiagretaus ir statmeno tiriamiems paviršiams skenavimo būdas, keičiant sužadavimo gylį ir pasitelkiant keletą diskrečių sužadavimo šviesos bangos ilgių.

3. Suprojektuotas ir sukonstruotas įrenginys VUTEG-5-AIDA, pasitelkiant įtėkį kaupiančius Si sensorius plastikiniuose dėkluose, leidžia vykdyti aukštųjų energijų spinduliuočių dozimetrinę stebėseną didelėse dalelių greitintuvų bei spalatorių erdvėse su galimybe profiliuoti spinduliuočių pluoštelių kontūrus ir apšvitos įtėkių pasiskirstymą.

4. Išvystyti eksperimentiniai būdai ir įranga nesąlytiniam ir nuotoliniam matavimams apšvitų metu sinchroniškai registruojant elektrinių ir scintiliacinių parametrų kitimus, gali būti panaudoti įvertinant antrinių krūvininkų porų sukūrimo efektyvumą detektoriuose ir radiacinių defektų susidarymo spartos parametrus skirtingose sensorių medžiagose paveikiant jas įvairių tipų aukštųjų energijų spinduliuočių pluoštais.

Disertacijoje pateiktų rezultatų publikavimas

Disertacijoje pateikti rezultatai yra publikuoti kartu su bendraautorais 11-oje mokslinių straipsnių, - po 1 straipsnį išspausdinta žurnaluose „Materials Science and Engineering B“, „Journal of Instrumentation“, „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B“, „Advances in Condensed Matter Physics“, „AIP Advances“, „Applied Physics Letters“, „Journal of Applied Physics“, bei 4-ri straipsniai išspausdinti konferencijų darbuose. Tyrimų rezultatai taip pat buvo pristatyti 13-oje pranešimų tarptautinėse (IWORID14, “Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2012 ir 2014”) ir nacionalinėse (LNFK39 ir LNFK40) konferencijose. Disertacijos autoriaus publikacijų sąrašas yra pateikiamas šio autoreferato pabaigoje.

Disertacijos struktūra

Disertacija yra sudaryta iš septynių skyrių. Pirmame skyriuje aptartas tyrimų aktualumas, uždaviniai, mokslinis naujumas ir praktinė svarba, ginamieji teiginiai, bei autoriaus indėlis. Antrame skyriuje apžvelgiami didelių įtėkių dozimetrijos metodai, pagrindžiant disertacijoje aprašytų tyrimų reikmę. Trečiame skyriuje aptariamos naudotos medžiagos ir bandiniai bei pasitelkti tyrimų metodai. Siaurakraščių Si detektorių paviršiaus pasyvavimas, krūvininkų rekombinacijos gyvavimo trukmės charakteristikų priklausomybė nuo įtėkio ir spinduliuotės sukurtų taškinių defektų spektriniai parametrai įvairios technologijos Si detektoriuose aptariami ketvirtame skyriuje. Polikristalinių CdS sluoksnių ir Cu₂S-CdS sandūrų tyrimų rezultatai pateikti ir aptarti penktame skyriuje. Taip pat čia aptariama antrinių krūvininkų porų generacijos aukštųjų energijų dalelėmis ir radiacinių defektų sukūrimo CdS polikristaliniuose sluoksniuose sparta bei šių parametru įvertinimo metodai. Technologinių ir radiacinių defektų parametru matavimų rezultatai MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksiniuose sluoksniuose aptarti šeštame skyriuje. Suprojektuotas ir sukonstruotas didelių įtėkių dozimetras, pagrįstas nesąlytiniu krūvininkų rekombinacijos gyvavimo trukmės matavimu Si dariniuose, aprašytas septintame skyriuje. 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 apžvelgiamos hadronų apšvitos dozimetrijos metodikos. Branduolinėmis reakcijomis paremtuose metoduose naudojamos metalų folijos, ir dozimetrinė folija turi būti išimta iš didelio srauto apšvitų „karštosios“ zonos įtėkiui įvertinti bei reikia užregistruoti antrinės, radioaktyvios spinduliuotės intensyvumą po kiekvienos apšvitos „karštojoje“ zonoje. Tai daro šį metodą nepatogiu naudoti įrengimuose su sunkiai pasiekiamu apšvitos taikiniu. Be to, šiuo metodu neįmanoma atskirti susidarančių radiacinių defektų tipo. Šie metodai tinka tik aukštųjų energijų hadronų įtėkiams įvertinti, nes būtina, kad būtų viršyta slenkstinė energija, reikiama branduoliniams virsmams aktyvuoti. Nežiūrint minėtų ribojimų, šis metodas yra plačiai naudojamas įgreitintų dalelių pluoštelių parametrams matuoti, kadangi tokie dozimetrai yra neįprastai „minkštesniųjų“ jonizuojančiųjų spinduliuočių poveikiui.

Kitą įtėkių dozimetrijos metodų grupę sudaro metodai pagrįsti įprastų dalelių detektorių radiacinės pažeidos charakteristikų matavimais. Įprasti puslaidininkiniai detektoriai yra pagrįsti sandūrinėmis struktūromis. Sandūra paremti sukaupto įtėčio dozimetrai veikia naudojant radiacinių defektų tankio nulemtus giliųjų lygmenų spektro kitimus (registruojant DLTS spektrus), nuotėkio srovės išaugimą (kontroliuojant I-V charakteristikas), barjerinės talpos pokyčius (registruojant C-V charakteristikos pokyčius) ir kitus metodus, leidžia įvertinti tik bendrus elektriškai aktyvių gaudyklių parametrus. Kita grupė metodų yra pagrįsta laisvųjų radikalų koncentracijos, susietos su apšvitų įtėkių vertėmis, kitimais organiniuose sensoriuose. Laisvųjų radikalų koncentracijos kitimai gana patikimai gali būti įvertinti EPR (Electron Paramagnetic Resonance) spektroskopijos metodais. Šios pakraipos dozimetrija tinka įtėkių įvertinimui gana plačiame intervale. Tačiau dėl sąsajų tarp laisvųjų radikalų koncentracijos ir įtėčio netiesiškumo bei EPR spektro smailių amplitudinių verčių priklausomybės nuo EPR spektro registravimo režimų yra reikalingas didelis rinkinys kalibracinių dozimetų bei EPR spektro amplitudinių reperių. Todėl, norint išmatuoti įtėkių kitimus keleto dydžio eilių intervale reikia stebėsenai reikiama įtėkių diapazoną padalinti į keletą mažesnių intervalų. Iš kitos pusės, itin didelių įtėkių srityje, EPR signalas gali netgi mažėti didėjant įtėkiui dėl organinio darinio matricos radiacinės pažeidos. Nepaisant minėtų ribotumų, minėti metodai ir jų realizavimo įrenginiai yra komercializuoti, pvz. Bruker gaminami alanino dozimetrai ir EPR signalo registratoriai-skaitytuvai. Tačiau tokie prekybai pateikiami instrumentai yra labiau tinkami jonizuojančių spinduliuočių mažų ir vidutinių verčių įtėkių dozimetrijai.

Dar vieną dozimetų grupę sudaro metodai pagrįsti scintiliacinių charakteristikų matavimais. Daugumos scintiliatorių naudingumo koeficientas svyruoja nuo keleto iki 30%. Toks mažas išėigos koeficientas nusako tai, kad didžioji spinduliuotės energijos dalis transformuojasi nespinduliniuose procesuose, dažniausiai terminio scintiliatoriaus sužadavimo būdu. Kai apšvitų yra sukuriamas silpnas liuminescencijos signalas,

papildomai reikalingas fotodaugintuvas silpniems optiniams signalams registruoti. Atsižvelgiant į tai, kad visi scintiliatoriai yra jautrūs radiaciniais pažeidimams, reikalingi jutiklio atsako degradacijos tyrimai norint juos naudoti aukštos spinduliuotės dozimetrijai. Optinių signalų registravimu pagrįsti ir organiniai geliniai jutikliai. Čia gali būti registruojami šviesos sklaidos, optinio pralaidumo matavimais radiacijos paveiktose medžiagose, kai dėl sukaupto įtėkio kinta medžiagos polimerizacijos laipsnis. Vėlgi, tokio tipo dozimetrai yra skirti mažų ir vidutinių verčių įtėkių matavimams.

Tad, šio darbo pradžioje buvo identifikuota reikmė naujų principų, matavimo būdų paieška aukštųjų energijų spinduliuočių įtėkių matavimams. Praktinė svarba buvo pagrįsta ir pasauliniu mastu problemos svarba, - ES tyrimų programų komitetas buvo teigiamai įvertinęs keleto dešimčių institucijų paraišką gilesniems šios krypties tyrimams, tiekdamas finansavimą FP7 projektui AIDA (Advanced European Infrastructures for Detectors at Accelerators).

III-ame skyriuje aptariamos ištirtos medžiagos ir bandiniai bei pasitelkti tyrimo metodai.

Čia aprašytas didelės erdvinės skyros, naujos technologijos siaurakraščių struktūrų bandinių rinkinys, kurių formavimui naudojamas įrėžimo-nuskėlimo-pasyvavimo (SCP - Scribe-Cleave-Passivate) metodas. Tokiu būdu gaunama aukštos kokybės juostelinių detektorių matricos briauna, kuri leidžia betarpiškai registruoti į juostelinį sensorių patenkančių dalelių treką juostelinėje matricoje. Šis metodas tinkamas tiek n- tiek ir p-laidumo tipo juosteliniams Si sensoriams. Bandiniai n-Si medžiagos struktūrose buvo suraižyti lazerio pluošteliu ir pasyvuoti SiO₂ bei Al₂O₃ sluoksniais suformuotais ALD (Atomic Layer Deposition) metodu. P-Si bandiniai buvo suraižyti mechaniniu būdu ir pasyvuoti Si₃N₄ sluoksniais, suformuotais PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) būdu. Šiame bandinių rinkinyje buvo vykdyti paviršinės rekombinacijos greičio kitimai varijuojant įvairias juostelinių sensorių matricos briaunos pasyvavimo technologijas.

Čia taip pat pateikti duomenys apie įvairios auginimo technologijos Si bandinius, naudotus dozimetrijos kalibraciniams matavimams. Tam buvo pasitelkti n-tipo MCz Si 300 μm storio pasyvuotų plokštelių fragmentų rinkiniai, ir identiškai pradiniai bandiniai buvo apšvitinti neutronais Liublianios branduoliniame reaktoriuje. Tokiu būdu gautas bandinių rinkinys aprėpė įtėkių intervalą nuo 10¹¹ iki 3×10¹⁶ cm⁻², išreiškiant įtėkius 1 MeV energijos neutronų poveikio (sąveikos skerspjūvių) ekvivalentu. Taip pat buvo panaudoti bandinių rinkiniai, sudaryti iš n- ir p-tipo Cz Si pin diodų, kurie buvo apšvitinti reaktoriaus neutronais ir 50 MeV energijos protonais.

Mikrokristalitinių struktūrų tyrimams buvo apsitelkti polikristaliniai CdS ir epitaksiniai n-GaN sluoksniai. Pastarieji buvo užauginti ant safyro padėklų MOCVD (Metal-Organic-Chemical Vapour Deposition) būdu. Pradinių medžiagų parametru įvertinimui buvo ištirti skirtingų storių, tos pačios auginimo technologijos, bandiniai užauginti Vilniaus ir Tokušimos universitetuose. Krūvininkų transporto ir kristalinės struktūros įvertinimui buvo atlikti Holo judrio ir Rentgeno difraktometriniai (HRXRD - High Resolution X-Ray Diffraction) matavimai. Įvertinta, kad seklių, donorinio tipo, lygmenų tankis mažėja didėjant kristalų tūriui. Tai taip pat sietina su dislokacijų (supančių mikro-kristalines GaN augimo prizmes) tankio kitimais 10⁸ – 10¹¹ cm⁻² intervale įvairiais režimais užaugintuose GaN sluoksniuose. Vario sulfido- kadmio sulfido hetero-sandūriniai dariniai yra patrauklūs dėl savo unikalios struktūros, sąlyginai

paprasto ir pigaus formavimo būdo ir potencialaus panaudojimo daugelyje sričių. Todėl buvo ištirti polikristaliniai CdS sluoksniai ir Cu₂S-CdS heterosandūrų struktūros, pagamintos Odesos I. Mečnikovo universitete. Stecheometrinis šių polikristalinių medžiagų sąstatas buvo įvertintas pasitelkiant Rentgeno difraktometrinius ir spektrinius (HRXRD) tyrimus. Hetero-sandūrų barjerinės talpos ir generacinės srovės įvertinimai buvo atlikti impulsinių talpos matavimų BELIV (Barrier Evaluation by Linear Increasing Voltage) metodu. Buvo atskleisti trys hetero-sandūrinių bandinių tipai (lyginant tipines BELIV kinetikų formas), sietini su mikrokristalitų dydžiu, jų pasiskirstymo homogeniškumu ir sluoksnių fraktaline struktūra. Sandūrų papildomam įvertinimui taip pat buvo panaudoti tradiciniai I-V ir C-V matavimo metodai. Sandūriniai dariniai buvo ištirti naudojant užtvarinę įtampą 0.3 iki 3 V intervale ir harmoninį signalą dažnių intervale nuo 50 Hz iki 100 kHz.

Rekombinacinės Si darinių charakteristikos buvo ištirtos Vilniaus universitete (VU) sukurtais mikrobangomis zondojujamo fotolaidumo kinetikų metodais ir matavimo įrenginiais VUTEG-3, VUTEG-4 ir VUTEG-5-AIDA, varijuojant planarinio ir briaunos skenavimo režimus, keičiant sužadavimo ir papildomo pašvietimo spektrinius parametrus, vykdant in situ matavimus (VUTEG-3) ir apšvitų sukeltus poveikius po apšvitų (VUTEG-4, VUTEG-5-AIDA).

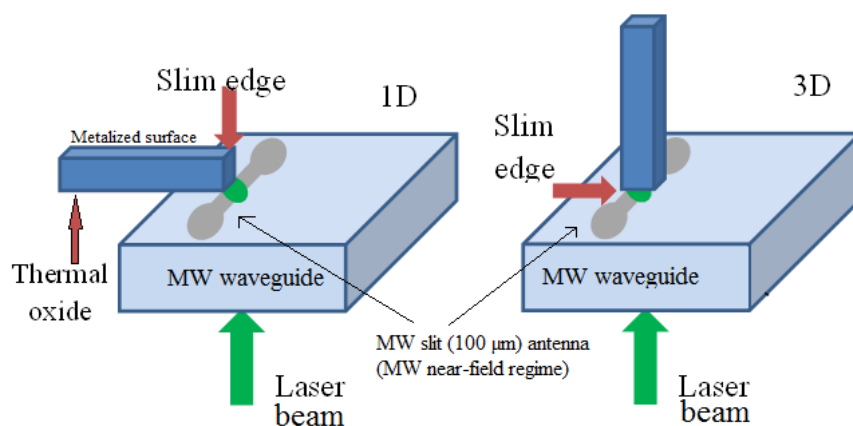
Technologinių ir radiacinių defektų spektrinės charakteristikos buvo ištirtos kombinuojant ir derinant talpinės giliųjų lygmenų spektroskopijos (C-DLTS, Deep Level Transient Spectroscopy) ir nuostoviosios bei impulsinės fotojonizacinės spektroskopijos metodus bei įrenginius (SemiTrap DLS-E). Šie standartiniai metodai buvo kombinuojami su BELIV kinetikų temperatūrinių kitimų tyrimais.

Spindulinės rekombinacijos centrams charakterizuoti buvo atlikti laike ir spektre išskirtosios liuminescencijos kinetikų tyrimai sinchroniškai vykdyti su mikrobangomis zondojujamo fotolaidumo kinetikų kitimų matavimais. Čia buvo sukurtos įvairios matavimų schemos ir pasitelkti specialūs režimai. Liuminescencijos topogramos buvo ištirtos konfokalinės mikroskopijos būdu, siekiant išskirti mikrokristalitų dydžio ir pasiskirstymo charakteristikas.

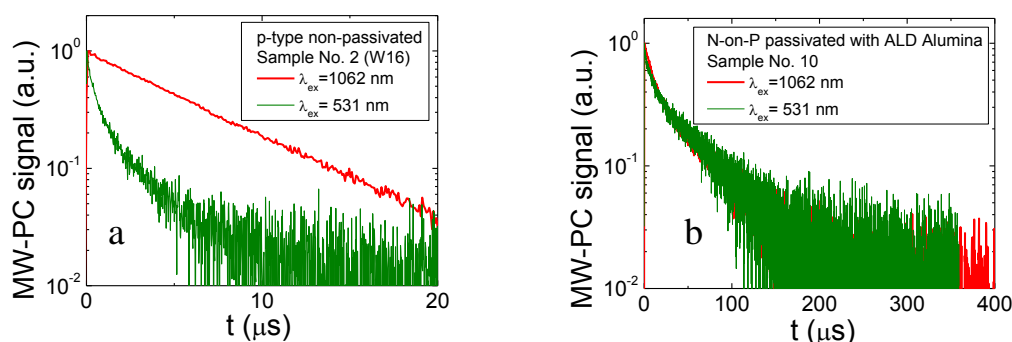
Rekombinacinių ir liuminescencijos spektrinių charakteristikų evoliucija buvo registruojama apšvitos 1.6 - 2 MeV protonais metu, nesąlytiniu būdu, - į apšvitos kamerą įvedant mikrobangų, lazerinės spinduliuotės bei liuminescencijos signalo išvedimo zondus, naudojant VU sukurtus įrenginius VUTEG-3, daugiaskaidulinius šviesolaidžius, bei mažagabaritinius spektrofotometrus.

IV-ame skyriuje pateikti ir aptarti Si darinių tyrimai, nukreipti siaurakraščių Si juostelinių detektorių briaunų paviršiaus pasyvavimo efektyvumui įvertinti, krūvininkų rekombinacinės gyvavimo trukmės charakteristikų priklausomybės nuo apšvitų hadronais įtėkio nagrinėjimui ir spinduliuočių sukurtų taškinių defektų spektriniam parametrui įvertinti.

Tikslesniam juostelinių detektorių briaunos pasyvavimo įvertinimui papildomai buvo apjungti du matavimo režimai (Pav. 4.1): kai vyrauja viendimensinis perteklinių krūvininkų difuzijos režimas (Pav. 4.1 kairėje) ir kai būtina įvertinti trimatę difuziją (Pav. 4.1 dešinėje) ir rekombinaciją visuose plonasluoknės struktūros paviršiuose.



4.1 pav. Paviršinės rekombinacijos greičio matavimo schema kai analizei pakanka viendimensinio artinio (kairėje) ir kai būtina įvertinti trimatę difuziją (dešinėje) bei rekombinaciją visuose plonasluoknės struktūros paviršiuose.



4.2 pav. Mikrobangomis zondojuamo fotolaidumo kinetikos esant tūriniam (raudonos kreivės) ir paviršiniam (žalios kreivės) sužadinimui naudojant 1062 nm ir 531 nm lazerių impulsus nepasyvuotoje (kairėje) ir aliuminiu pasyvuotoje (dešinėje) šoninėse sienelėse.

4.2 pav. yra iliustruojami tipiniai mikrobangomis zondojuamo fotolaidumo kinetinių kitimai sužadinimui naudojant 1062 nm ir 531 nm lazerių impulsus nepasyvuotose ir pasyvuotose briaunose. Iš krūvininkų tankio relaksacijos būdingų trukmių ir fotolaidumo normuotų amplitudžių kinetikoje santykinų kitimų, varijuojant sužadinimo gylį buvo įvertintos paviršinės rekombinacijos greičio vertės.

4.1 lentelėje yra pateiktos išmatuotų parametų suvestinės priskirtinos įvairiems Si juostelinių detektorių briaunos pasyvavimams. Įvertinta, kad efektyviausias briaunos pasyvavimas buvo pasiektas p-tipo Si bandiniuose, naudojant ALD technologiją (aliuminis). Mažesnis efektyvumas, kai paviršinės rekombinacijos greitis sumažinamas ne daugiau 2-jų kartų, gautas n-tipo Si bandiniuose naudojant PECVD technologija formuojamus silicio nitrido bei silicio oksido sluoksnius. Palyginimui buvo ištirti efektinges rekombinacijos trukmės kitimai gana dideliu įtėkiu apšvitintuose nepasyvuotos

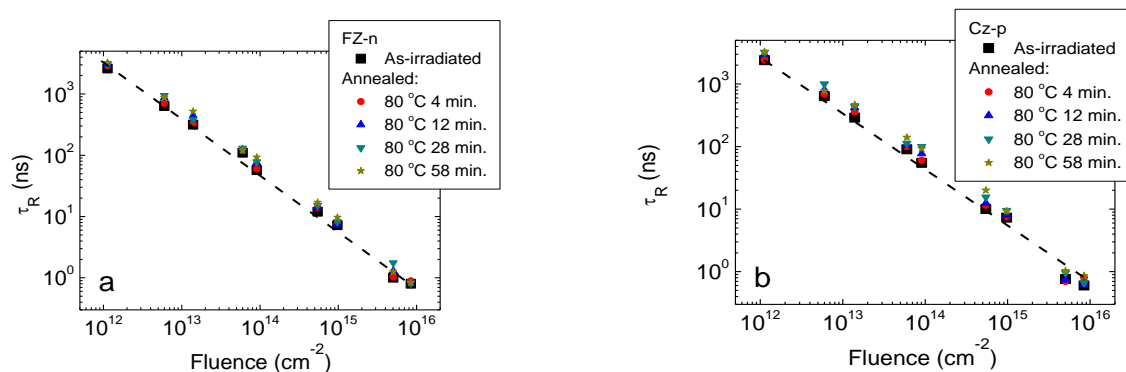
briaunos bandiniuose. Šiuo atveju buvo gautos vien-eksponentinės kinetikos su τ_{eff} nepriklausančiu nuo sužadavimo gylis (bangos ilgio). Čia tik gautas žymus τ_{eff} verčių sumažėjimas didėjant apšvitos įtėkiui. Tai aiškiai rodo tūrinės rekombinacijos dominavimą prieš paviršinę rekombinaciją esant dideliems radiacinių defektų tankiams. Tuo būdu, detektoriaus briaunos pasyvavimas yra prasmingas tik mažų įtėkių vyksmų detektavimui.

Lentelė 4.1. Paviršinės rekombinacijos sparta ir efektinė gyvavimo trukmė skirtingo laidumo ir paviršiaus pasyvavimo bandiniuose palyginant su vertėmis gautomis nešvitintuose ir protonais apšvitintuose bandiniuose.

Bandinys Nr.	$\tau_{R,eff}$ (μs)	τ_{tr} (μs)	s (cm/s)
p-tipo detektorius, p-Si, nepasyvuotas, nešvitintas			
W18, No. 3	8	33	9.3×10^3
W16, No. 2	6	-	1.9×10^4
W16, No. 3	9	62	9.3×10^3
ATLAS $\varnothing 7$ No.3	6	-	1.9×10^4
ATLAS $\varnothing 7$ No.5	9	-	1.9×10^4
p-tipas (N-on-P) detektorius, p-Si, pasyvuotas ALD aliuminiu, nešvitintas			
8	11	50	560
9	12	64	560
10	15	55	330
11	11	51	370
12	11	62	560
n-tipo detektorius, n-Si, nepasyvuotas, nešvitintas			
2	9	610	1.9×10^4
3	17	110	1.4×10^4
n-tipo detektorius (P-on-N), n-Si, pasyvuotas PECVD nitridu ir oksidu, nešvitintas			
5	6	480	9.3×10^3
6	18	270	4.7×10^3
7	18	270	4.7×10^3
Švitinti			
Bandinys Nr.	Įtėkis (neq, cm^{-2})	$\tau_{R,eff}$ (μs)	
B1P6	0.95×10^{13}	0.700	-
B2P10	5.78×10^{13}	0.130	-
B2P8	4.82×10^{14}	0.013	-
B2P3	3.98×10^{15}	0.001	-

Sparčiai apšvitų įtėkių dozimetrijai, pagrįstai nepusiausvirųjų krūvininkų gyvavimo efektinės trukmės priklausomybe nuo sukauptos hadronų apšvitos silicyje, yra itin svarbu įvertinti galimą poapšvitiminį faktorių, kurių svarbiausias yra galimas defektų išsikaitinimas, įtaką. Iš kitos pusės, detalesnei radiacinių defektų analizei, išplitusių ir taškinių defektų sandų išskyrimui, yra svarbūs krūvininkų rekombinacijos ir prilipimo trukmių sandų kitimai. Šiuo tikslu buvo atlikti krūvininkų rekombinacijos ir efektinės

trukmės kitimų tyrimai įvairios technologijos ir laidumo tipo Si plokštelių fragmentuose tuojau po apšvitos didelės energijos protonais ir po iškaitinimų ciklo. Buvo ištirti 26 GeV protonais apšvitinti FZ ir CZ n- ir p-tipo laidumo Si darinių fragmentai. Gauti rekombinacijos trukmių kitimai yra iliustruojami 4.3 pav.

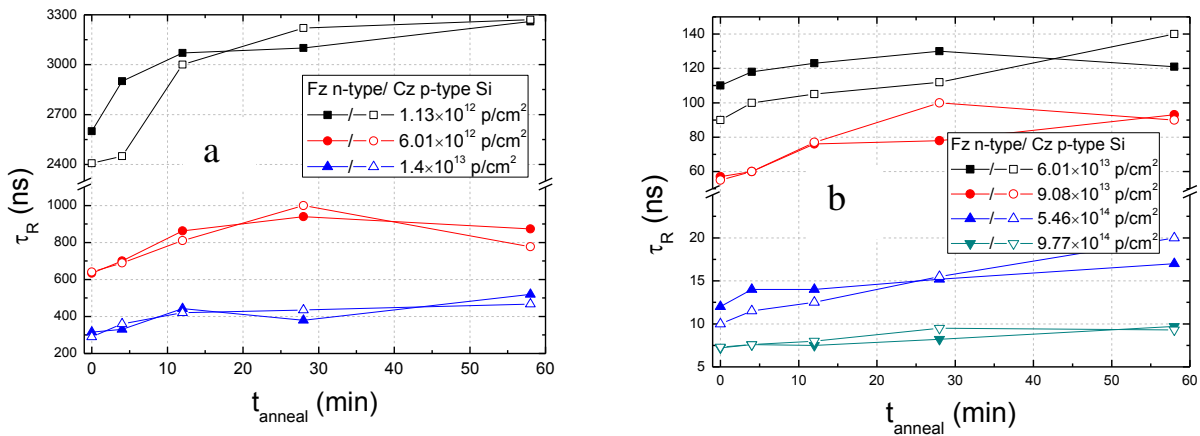


4.3 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybės nuo apšvitos įtekio, išmatuotos tuojau po apšvitos (juodi simboliai) n- (a) ir p-tipo (b) bandiniuose. Skirtingi simboliai žymi krūvininkų efektines rekombinacijos trukmes, išmatuotas po izoterminių iškaitinimų 80 C temperatūroje keičiant iškaitinimo ekspozicijas, - čia yra nurodytos suminės iškaitinimo trukmės.

4.3 pav. matosi, kad krūvininkų gyvavimo trukmė logaritminėse skalėse mažėja beveik tiesiškai ir nepriklauso nuo bandinio gamybos technologijos bei jo laidumo tipo. Absoliutinės τ_R vertės yra artimos n- ir p-tipo medžiagose esant fiksuotoms įteklių vertėms. Toks kitimų pobūdis leidžia manyti, kad rekombinacinę gyvavimo trukmę įtakoja dominuojantys išplitę (klasterinio tipo) radiaciniai defektai. Tokią išvadą patvirtina ir tai, kad rekombinacijos trukmių vertės yra labai artimos tokioms, išmatuotoms MCZ technologijos Si plokštelių fragmentuose, apšvitintuose reaktoriaus neutronais.

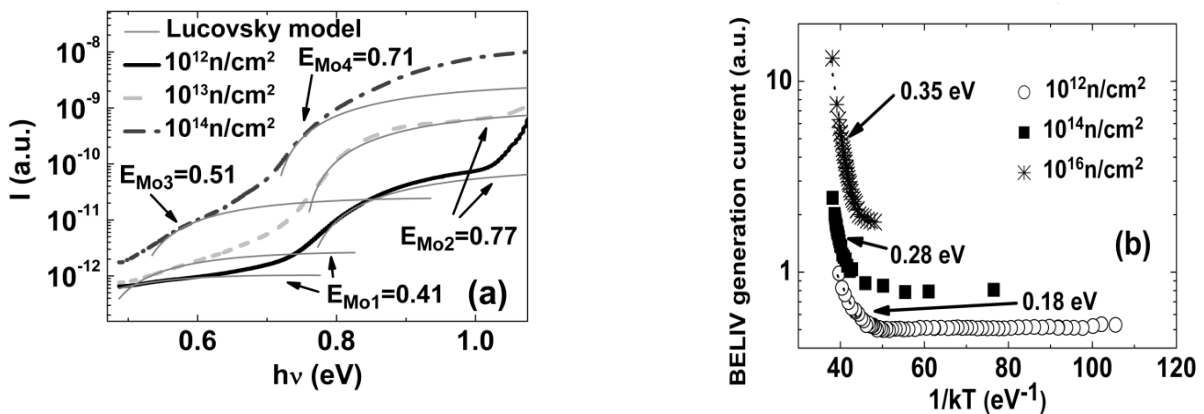
Efektinių rekombinacijos trukmių kitimai varijuojant izoterminio iškaitinimo ekspozicijos trukmes tiesinėse skalėse yra iliustruojami 4.4 pav. Čia galima pastebėti, kad žymesnė iškaitinimo įtaka pasireiškia tik mažųjų įteklių srityje. Tai galima paaiškinti tuo, kad taškinių radiacinių įtaka krūvininkų rekombinacijos srautų perskirstyme gali būti svarbi tik kai išplitusių defektų tankis yra santykinai mažas. Santykinai mažų terminės aktyvacijos energijų gali pakakti tik taškinių defektų transformacijoms, - iškaitinimui. Šiuo atveju taškiniai defektai veikia kaip prilipimo centrai, pailginantys rekombinacijos proceso trukmę. Todėl reikšmingesnis efektinių rekombinacijos trukmių kitimas, ryškiau pastebimas tiesiame mastelyje po pradinių iškaitinimo ciklų, kuriuose transformuojasi didžioji dalis taškinių defektų, - po kurių rekombinacijos trukmių vertės beveik įsisotina. Po vėlesnių iškaitinimų pasireiškia tik šių verčių kitimai statistinių paklaidų intervale (sistemines paklaidas čia nulemia protonų pluoštelių nevienalytiškumas, plokštelės technologinių parametrų kaitos sklaida). Tikslesniam taškinių ir išplitusių defektų įtakos įvertinimui buvo atlikti detalūs rekombinacijos ir krūvininkų prilipimo trukmių tyrimai varijuojant temperatūrą. Tuo būdu galima įvertinti rekombinacijos ir prilipimo centrų aktyvacijos energijas. Įteklių dozimetrijai gi svarbūs

tik rekombinacijos trukmių priklausomybė nuo įtėkio, o technologinių bei iškaitinimo nulemta šių verčių sklaida įtakoja tik įtėkio matavimo paklaidas.



4.4 pav. Krūvininkų rekombinacijos trukmės kitimai tiesiniame mastelyje priklausantys nuo integrinės izoterminių 80 C iškaitinimų ekspozicijos įvairios technologijos (FZ ir CZ) Si plokštelėse apšvitintose 26 GeV protonų mažais (a) ir vidutiniais (b) įtėkiais.

Taškinių defektų aktyvacijos energijos ir lygmenų spektras buvo detaliau ištirtas kombinuojant foto-jonizacijos (PIS - Photo-Ionization Spectroscopy) ir impulsinės barjerinės talpos (BELIV) temperatūrinių kitimų charakteristikas.



4.5 pav. a - Fotojonizacijos spektrai išmatuoti nuostoviosios fotosrovės spektrinių pokyčių metodu MCZ n-Si dioduose, apšvitintuose skirtingais 1 MeV ekv. neutronų įtėkiais. b - Generacinės srovės temperatūrinių kitimų charakteristikos, išmatuotos BELIV metodu, įvairiais įtėkiais apšvitintuose Si pin detektoriuose.

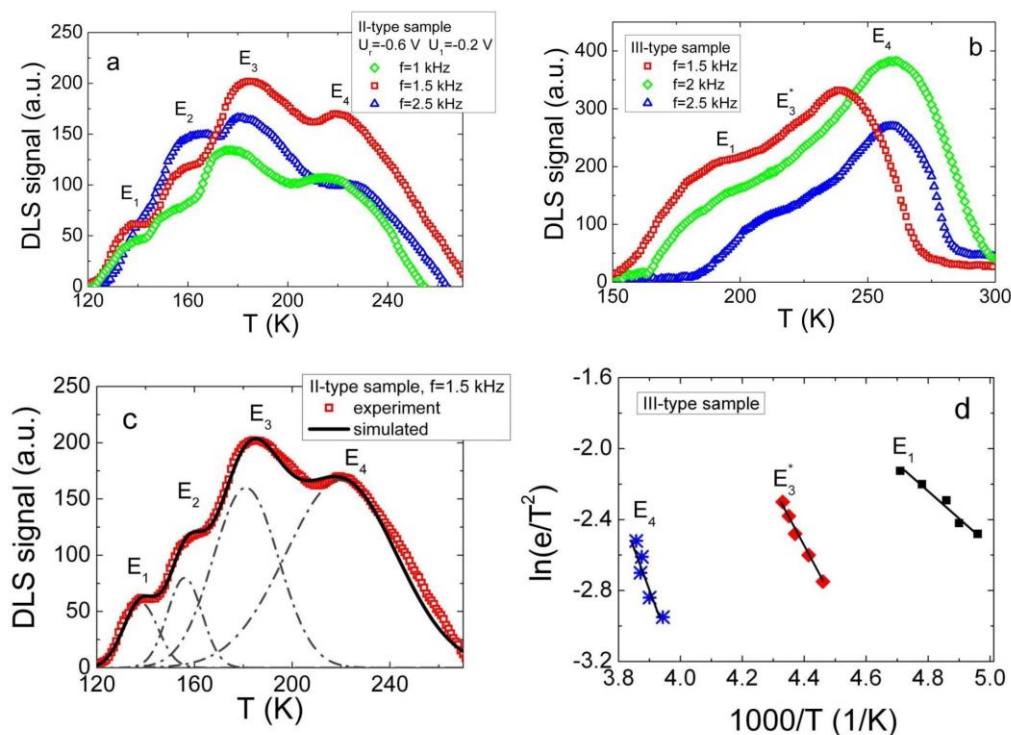
Fotojonizacijos (PIS) spektriniai matavimai buvo atliekami registruojant nuostoviosios srovės pokyčius Si dioduose, esant daliniam diodo bazinės srities nuskurdinimui. Siekiant sumažinti nuotėkio srovių įtaką, bandiniai matavimo metu buvo patalpinti į skystu azotu šaldomą kriostatą. Fotojonizacijos spektrai (4.5a pav.) buvo išanalizuoti pasitelkus Lukovskio modelį. Apšvitos įtėkiui viršijus 10^{12} n/cm², gaudyklių tankis viršija legirantų tankį. Esant dideliame gaudyklių tankiui, laisvieji krūvininkai yra sparčiai sugaudomi ir diodo bazės sritis tampa visiškai nuskurdinta ir be užtvarinės

įtampos, todėl tradiciniai spektroskopijos metodai, tokie kaip C-DLTS, tampa netinkami. Taikant fotojonizacijos spektroskopiją pavyko išskirti galias gaudykles, su aktyvacijos energija $E_a \geq 0.41$ eV. Pastaroji aktyvacijos energijų vertė yra būdinga apšvitomis sukurtoms divakancijoms silicije.

Generacinės srovės sandas, pasireiškiantis BELIV kinetikose, yra nulemtas termiškai aktyvuotų krūvininkų. Šio sando srovės dydžio (4.5b pav.) kitimai varijuojant bandinio temperatūrą taip pat leidžia įvertinti taškinių defektų aktyvacijos energiją Si dariniuose apšvitintuose vidutiniu ir dideliu įtėkiu. Įvertintos aktyvacijos energijos leido identifikuoti vakancijos-deguonies komplekso, - VO ($E_a \approx 0.18$ eV), divakancijos $V_2^{0/-}$ ($E_a \approx 0.28$ eV) ir aukštesnės eilės VOH – $V_2^{-/+}$ kompleksams ($E_a \approx 0.35$ eV) priskirtinus radiacinius taškinius defektus, kurie vyrauja įvairiais įtėkais apšvitintuose Si sensoriuose.

V-ame skyriuje pateikti ir aptarti Cu_2S -CdS sandūrinių struktūrų ir polikristalinio CdS sluoksnių tyrimų rezultatai. Pradinių medžiagų parametrų įvertinimui buvo ištirti polikristaliniai CdS sluoksniai ir Cu_2S -CdS heterosandūrų struktūros. Heterosandūrų barjerinės talpos ir generacinės srovės įvertinimai buvo atlikti impulsinių talpos matavimų metodu. Buvo atskleisti trys heterosandūrinių bandinių tipai (lyginant tipines BELIV kinetikų formas), sietini su mikrokristalitų dydžiu, jų pasiskirstymo homogeniškumu ir sluoksnių fraktaline struktūra. Sandūrų papildomam įvertinimui taip pat buvo panaudoti tradiciniai I-V ir C-V matavimo metodai. Sandūriniai dariniai buvo ištirti keičiant užtvarinę įtampą ir harmoninio testinio signalo dažnį 50 Hz - 100 kHz intervale. Didelės savitosios varžos (I-tipo) heterosandūrose, kuriose yra didelė krūvininkų gaudyklių koncentracija, buvo įvertinta struktūrų geometrinė talpa C_g , ir gautos tipiškos vertės $C_g = 3$ nF ištirtiems bandiniams. Šios eksperimentinės C_g vertės gerai dera su teorinėmis C_g vertėmis suskaičiuotomis pasitelkiant CdS sluoksnių storio d ir bandinių elektrodų ploto S dydžius. II-o ir III-tipo Cu_2S -CdS heterosandūrų struktūrose, kuriose yra didesnės pusiausvirųjų krūvininkų koncentracijos, buvo aiškiai išskiriami BELIV kinetikos barjerinės talpos kitimų nulemti ir terminės krūvininkų generacijos srovių sandai. Buvo gauta, kad barjerinės talpos kitimų srovės sandas ženkliai priklauso nuo papildomo stacionaraus pašvietimo, kai giliųjų lygmenų užpildymas stacionarizuojamas. Generacinės srovės sando amplitudė šiuo papildomo pašvietimo atveju išauga BELIV impulso baigiamojoje stadijoje. Šie tyrimai implikavo DLTS tyrimus, naudojant papildomą pašvietimą „balta“ šviesa.

DLTS spektruose (kurie dėl didelio gaudyklių tankio gali būti patikimai registruojami tik esant papildomam pašvietimui), II-o ir III-čio tipo dariniuose buvo aptikta sudėtinga, persiklojančių smaيليų struktūra, 5.1 pav. II-tipo struktūrų DLTS spektruose (5.1a pav.) galima išskirti keturias smailes ties 138 K, 157 K, 183 K ir 225 K DLTS spektro temperatūrinėje skleistinėje. III-tipo sandūrinių darinių DLTS spektruose (5.1b pav.) pagrindinių krūvininkų gaudyklėms priskirtinos smailes aptiktos ties 205 K, 232 K ir 255 K DLTS spektro temperatūrinėje skleistinėje. Iš smaيليų slinkimų, keičiant testinio signalo dažnį talpai matuoti ir krūvininkų injekcijos impulsų trukmę, tradiciniu DLTS spektrometrija būdu buvo sudarytos Arenijaus kreivės (5.1d pav.) ir įvertintos gaudyklių aktyvacijos energijos. Derinant šias aktyvacijos energijų vertes su literatūroje publikuotais spektro smaيليų parametrais buvo identifikuotos vyraujančios gaudyklės šiame darbe ištirtuose CdS sluoksniuose.

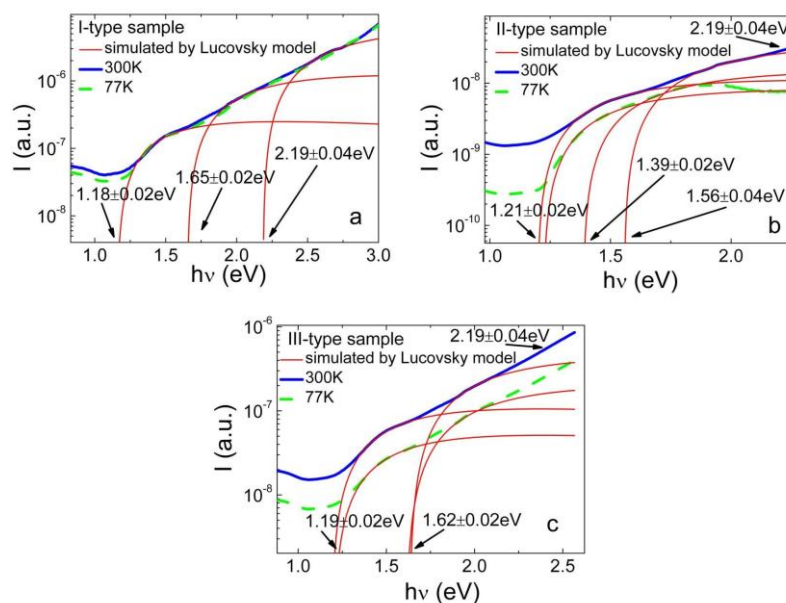


5.1 pav. C-DLTS spektrai ir jų būdingos charakteristikos Cu_2S -CdS sandūriniuose II-o (a) ir III-čio (b) tipo bandiniuose, užregistruoti naudojant papildomą pašvietimą baltos šviesos diodu (LED). c – Spektro smailių modeliavimas II- tipo Cu_2S -CdS sandūrinėse struktūrose. d – Arenijaus grafikai DLTS smailėms III-tipo Cu_2S -CdS sandūrinėse struktūrose.

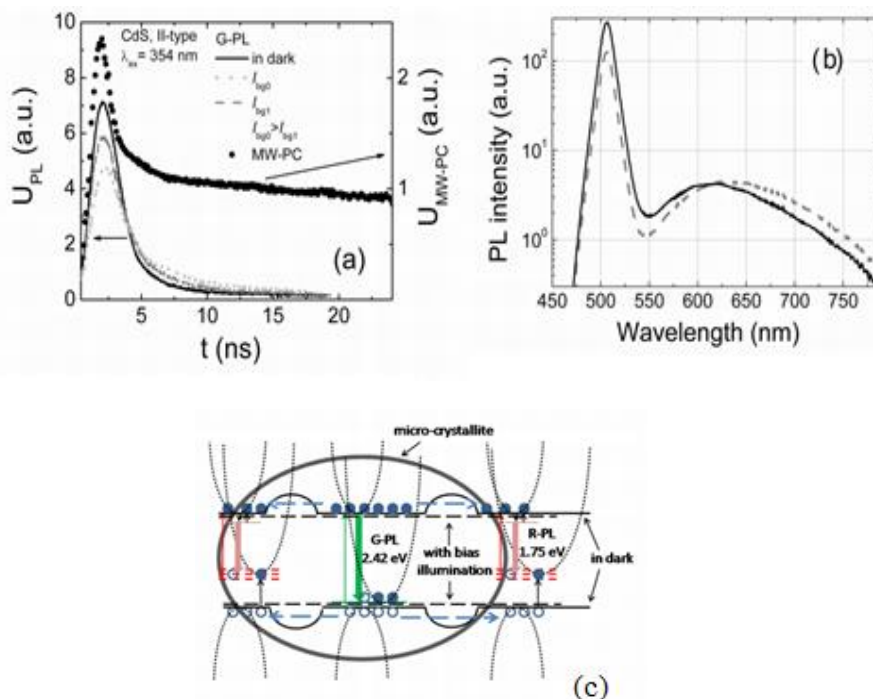
Siekiant įvairiapusiškiau įvertinti giliųjų lygmenų parametrus, buvo papildomai pasitelkta fotojonizacijos spektroskopija. Šiuo atveju buvo registruojama fotosrovė, priklausanti nuo fotojonizacijos skerspjuvio, kai signalo dydis (fotosužadintų nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija) gali būti varijuojamas keičiant sužadavimo intensyvumą, o tamsinė (foninė srovė) sumažinama žeminant temperatūrą. Todėl fotojonizacijos spektrus pavyko užregistruoti visų trijų tipų heterosandūrinėse struktūrose (5.2 pav.). Fotojonizacijos spektras standartiškai yra gaunamas laiptelinės formos. Foto-aktyvacijos energijos buvo įvertintos aproksimuojant laiptelinę spektro struktūrą Lukovskio modeliu, kuris pagrįstas δ -formos energetinio gaudyklės spektro artiniu. Aproksimuotų aktyvacijos energijų vertės yra nurodytos 5.2 pav. Kadangi fotosrovės signale neįmanoma išskirti elektronų ir skylių srovės sandų, bendra elektroninių šuolių schema buvo sudaroma derinant fotojonizacijos ir terminės generacijos (registruojamos DLTS spektre) aktyvacijos energijas. Tokiu būdu įvertintų gaudyklių parametrų suvestinė ir gaudyklių identifikacija yra pateikta 5.1 lentelėje.

Fotojonizacijos ir terminės generacijos aktyvacijos energijų suderinamumas buvo nagrinėjamas identifikuojant elektroninių optinių ir termiškai sužadintų šuolių, kurių energijų suma konfigūracinėje diagramoje būtų skaitmeniškai susieta su draustinių energijų tarpu CdS. Tokiu būdu surastos giliųjų lygmenų padėtys valentinės juostos atžvilgiu ir yra pateiktos 5.1 lentelėje. Trys vyraujantys lygmenys buvo identifikuoti visų 3-jų tipų bandiniuose. Išskirti Cu_2S -CdS heterosandūrinių bandinių tipai yra nulemti tik šių gaudyklių koncentracijomis. Šie Cu_2S -CdS heterosandūrinių bandinių tipai (nuo I-o iki III-čio) buvo susieti su šių sluoksnių formavimo technologiniais režimais taip: I–mam

tipui priskirtas režimas: $T_{\text{dep}}=220\text{ C}$, $t_{\text{dep}}=60\text{ min.}$; II-am: $T_{\text{dep}}=260\text{ C}$, $t_{\text{dep}}=75\text{ min.}$, ir III-čiam: $T_{\text{dep}}=260\text{ C}$, $t_{\text{dep}}=80\text{ min.}$, atitinkamai.



5.2 pav. Fotojonizacijos spektrai užregistruoti I-o (a), II-o (b) ir III-čio (c) tipo $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$ heterosandūrinėse struktūrose, esant 0.5 V pridėtai įtampai bei dviems skirtingoms temperatūroms: kambario (ištinisės mėlynos pastoritinos kreivės) skysto azoto (brūkšninės žalios spalvos kreivės). Plonos ištinisės raudonos spalvos kreivės atitinka modelines kreives priderintas prie eksperimentinių spektro laiptelių, sumodeliuotos Lukovskio artinyje. Skaičiai prie modelinių kreivių nurodo aktyvacijos energijas.



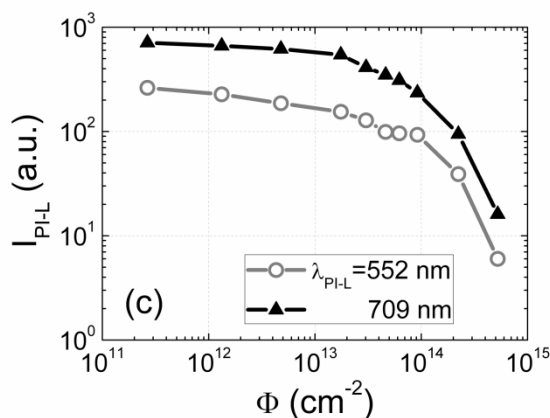
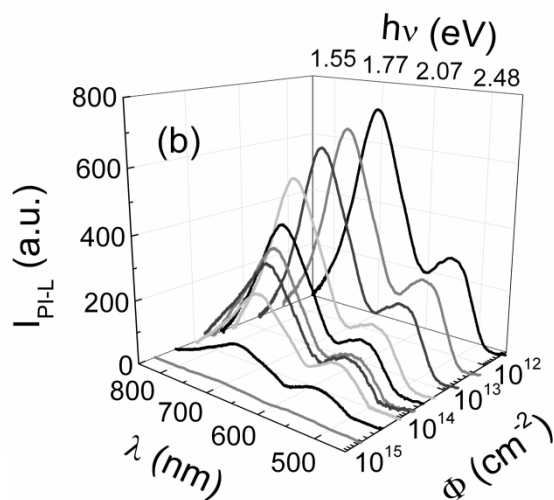
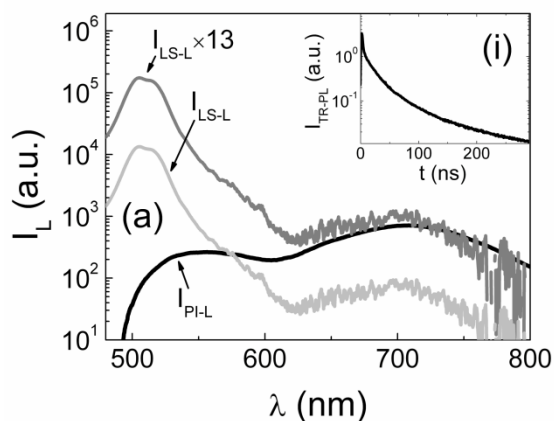
5.3 pav. Fotolaidumo (a) ir fotoluminescencijos (a, b) gesinimo charakteristikos, užregistruotos polikristalinio CdS sluoksniuose, susietai analizuojant mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (a) ir fotoluminescencijos laikinius (a) bei spektrinius (b) kitimus, keičiant foninio papildomo apšvietimo intensyvumą. c - Fotoluminescencijos gesinimo modelis netvarkios sandaros polikristalinio CdS sluoksnyje.

Lentelė 5.1. Fotojonizacijos (PIS) ir terminės (DLTS) aktyvacijos energijų suderinamumas skirtingų tipų Cu₂S-CdS dariniuose.

Bandinio tipas	Fotono energija atitinkanti PIS laiptelį (eV)	Gaudyklės fotoaktyvacijos energija gauta Lukovskio artinyje (eV)	Aktyvacijos energija $E_g(300K)=2.53$ eV	Gaudyklės prieskyra
I-tipas	1.4	1.17±0.02	1.34±0.02	elektronų gaudyklė, rekombinacinis centras
	1.8	1.65±0.02	0.90±0.02	skylių gaudyklė, Cu priemaišos
	2.5	2.19±0.04	0.34±0.04	Cu priemaišos; elektronų gaudyklė polikristaliniame CdS
II-tipas	1.3	1.21±0.02	1.31±0.02	elektronų gaudyklė, rekombinacinis centras
	1.9-2.0	1.56±0.04	1.0±0.04	skylių gaudyklė, Cu priemaišos
	2.5	2.19±0.04	0.34±0.04	skylių gaudyklė, Cu priemaišos; elektronų gaudyklė polikristaliniame CdS
III-tipas	1.3	1.19±0.02	1.34±0.02	elektronų gaudyklė, rekombinacinis centras
	2.0	1.62±0.02	0.90±0.02	skylių gaudyklė, Cu priemaišos
	2.5	2.19±0.04	0.34±0.04	skylių gaudyklė, Cu priemaišos; elektronų gaudyklė polikristaliniame CdS

Lentelė 5.2. Netvarkos parametrai skirtingų tipų bandiniuose.

Parametras	Bandinio tipas		
	I-tipas	II-tipas	III-tipas
α	0.20	0.16	0.17
f	0.17	0.13	0.14



5.4 pav. a – Lazeriu (I_{SL-L}) ir protonais (I_{PL-L}) sužadintos liuminescencijos spektrai gauti neapšvitintuose CdS sluoksniuose. Laike ir spektre išskirtosios fotoluminescencijos (TR-PL) kinetika gauta R-L spektro juostoje yra iliustruojama 5.4a pav. intarpe (i); b – Protonais sužadintos liuminescencijos spektrų evoliucija kintant apšvitos įtėkiui; c – Žaliosios ir raudonosios liuminescencijos spektrinių juostų kitimo priklausomybė nuo apšvitos 1.6 MeV protonais įtėkio.

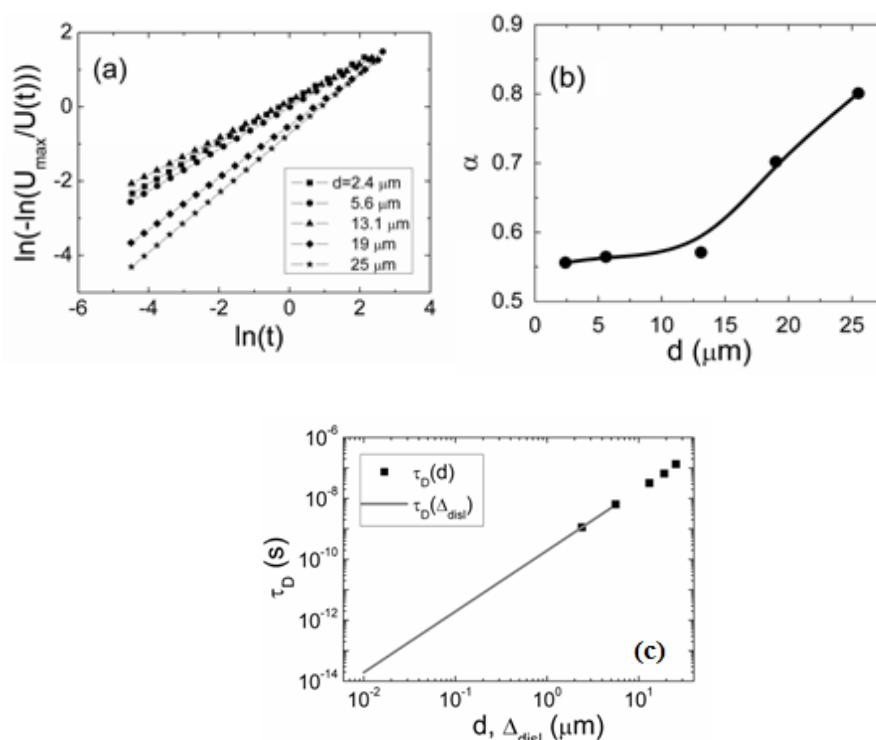
Sudėtinga technologinių defektų struktūra CdS sluoksnyje, kuris yra heterosandūros didžiavaržė bazė, nulemia injektuotų krūvininkų rekombinacijos ir transporto srautų persiskirstymą. Tai sąlygoja ir tokių reiškinių, kaip fotolaidumas ir fotoluminescencijos gesinimą, kurie buvo aptikti (5.3a ir b pav.) analizuojant fotolaidumo ir fotoluminescencijos kinetiką bei spektrų kitimus. Be to, fotolaidumo ir

fotoluminescencijos relaksacijos kinetikose aptiktas neeksponentinis ilgos trukmės sandas. Tai sąlygoja medžiagos polikristališkumas. Šių kinetikų pobūdis kiekybiškai galėjo būti aprašytas tik pasitelkus išstętosios eksponentės (SER, - Stretched Exponent Relaxation) modelį. Pasirodė, kad skirtingo tipo (nuo I-o iki III-čio) dariniuose kinetikų aproksimacija galima esant skirtingiems SER rodikliams α . Šitoks kinetikų pobūdis ir SER relaksacija gerai žinomas netvarkių struktūrų fizikoje. Šis pobūdis yra nulemtas krūvininkų transporto atsitiktinio klaidžiojimo (random-walk) ir difuzijos riboto krūvininkų prilipimo reiškiniais. Tokiu atveju krūvininkų rekombinacija kristalituose, jų difuzinis išnešimas į kristalitų periferiją, klaidžiojimais nulemtas transportas iki krūvininkai pagaunami defektais kristalitų periferijoje padaro krūvininkų nespindulinės ir spindulinės rekombinacijos charakteristikas gana sudėtingas. Šių procesų, tokių kaip fotolaidumo ir luminescencijos gesinimas, paaiškinimui buvo sukurtas modelis, iliustruojamas 5.3c pav. Čia buvo kokybiškai išskirti nepusiausvirųjų krūvininkų srautų persiskirstymas ir pernešimas tarp skirtingo kristališkumo sričių. SER rodiklio α kitimai skirtingo tipo (nuo I-o iki III-čio) dariniuose buvo susieti su netvarkių struktūrų fraktalinės dimensijos faktoriumi f . Šie α ir f parametrai yra pateikti 5.2 lentelėje. Ženkliai mažesnės už vienetą $f \ll 1$ fraktalinės dimensijos faktoriaus vertės rodo, kad gali būti tik maži kristalinės medžiagos tūriai įterpti nutrūkusio periodiškumo (netvarkioje) matricoje. Makroskopiškai tai sietina su mikrokristalitų pasiskirstymo sluoksnyje vienalytiškumu ir kristalitų dydžiu. Tai buvo patvirtinta fotoluminescencijos konfokalinės mikroskopijos vaizdų analize, pateikta disertacijoje.

Aptartos technologinės medžiagos charakteristikos ir jų derinimo metodologija bei modeliai buvo pasitelkti laikinių bei spektrinių charakteristikų sinchroniams matavimams ir analizei apšvitos metu radiacinių poveikių parametrams įvertinti, kai elektriniai mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo relaksacijos ir spektre išskirtosios luminescencijos kinetikų signalai registruojami iš tos pačios sužadintos bandinio srities (5.4 pav.). Tuo būdu buvo sukurta metodika nesąlytiniams ir nuotoliniams matavimams apšvitų metu sinchroniškai registruojant elektrinių ir scintiliacinių parametrų kitimus, įvertinant antrinių krūvininkų porų sukūrimo efektyvumą $\kappa_{pAp}=60 \mu\text{m}^{-1}\text{p}^{-1}$ sandūrinio detektoriaus bazės plotyje ir radiacinių defektų susidarymo spartos $K_p \approx 0.9 \text{ cm}^{-1}$ parametrus, paveikus aukštųjų energijų protonų pluoštais. Čia protonais indukuotos fotoluminescencijos spektrų evoliucija buvo derinama su fotoluminescencijos spektrų parametrais, o nespindulinės rekombinacijos parametrai buvo iš fotolaidumo kinetikų formos bei būdingų trukmių kaitos, tuo būdu įvertinant antrinių elektron-skylinių porų sukūrimo efektyvumą bei radiacinių defektų sudarymo spartos parametrus. Buvo atskleista, kad didėjant apšvitos įtėkiui, kai radiacinių defektų koncentracija viršija technologinių defektų tankį, medžiagos rekombinacinėse charakteristikose matosi matricos vienalytiškumo išaugimas ir fraktalinės dimensijos faktoriaus padidėjimą.

VI-ame skyriuje aptariamas technologinių defektų ir kristalo kokybės įvertinimas pradinės medžiagos, MOCVD būdu užaugintuose GaN epitaksiniuose sluoksniuose. Šiuolaikinės technologijos MOCVD GaN sluoksniai turi didelį dislokacijų tankį, nes sluoksniai susidaro suaugant prizmių formos mikrokristalams. Didėjant sluoksnio storiui, kristalinė sandara įprastai darosi tobulesnė. Tačiau dėl MOCVD technologijos ypatumų, didesnio storio sluoksniams sudaryti, auginimo procedūra vykdoma etapais. Todėl pradinės medžiagos (detektorių-scintiliatorių formavimui) parinkimui buvo ištirti skirtingų storių, tos pačios auginimo technologijos bandiniai, užauginti Vilniaus ir

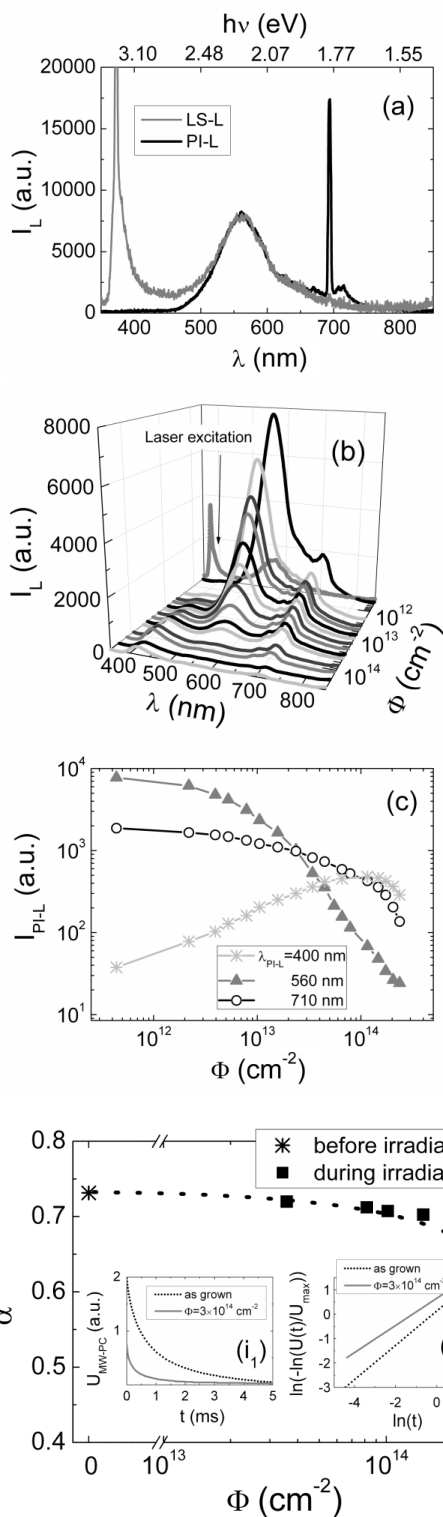
Tokušimos universitetuose. Įvertinta, kad seklių, donorinio tipo lygmenų tankis mažėja didėjant kristalų storiui, ir dislokacijų (supančių mikro-kristalines GaN augimo prizmes) tankis kinta nuo 10^{11} cm^{-2} iki 10^8 cm^{-2} intervale, didėjant sluoksnio storiui nuo 2.4 iki 25 μm , atitinkamai, įvairiais režimais užaugintuose GaN sluoksniuose. Dėl išliekančio didelio dislokacijų tankio, krūvininkų tankio relaksacija MOCVD GaN sluoksniuose vėlgi gali būti kiekybiškai aprašyta tik pasitelkiant išstętosios eksponentės (SER) modelį (6.1 pav.). Netvarkiems dariniams būdingą SER kinetikų relaksacijos formą patvirtina tiesinės charakteristikos, gautos standartiniame SER analizės mastelyje: $\ln(-\ln(n_{max}/n(t))) = f(\ln(t))$, kai krūvininkų koncentracijos $n(t)$ kitimas laike t yra analizuojamas nagrinėjant atžvilgiu pradinės n_{max} koncentracijos, registruojamos kinetikoje. 6.1a pav. matosi, kad SER tiesės polinkis, ir atitinkamai, SER rodiklio α vertės didėja (6.1b pav.), pradėdant sluoksnių storiumi $d \geq 13 \mu\text{m}$.



6.1 pav. a – Išstętosios eksponentės (SER) standartiniame mastelyje $\ln(-\ln(n_{max}/n(t))) = f(\ln(t))$ išskleistos mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikos, išmatuotos skirtingo storio MOCVD GaN sluoksniuose. b - Išstętosios eksponentės (SER) rodiklio α priklausomybė nuo MOCVD GaN sluoksnio storio d . c - Modelinė (ištininė linija) ir eksperimentinės vertės (simboliai) difuzijos ribotos paviršinės rekombinacijos gyvavimo trukmės (τ_D) priklausomybė nuo efektinio atstumo tarp dislokacijų (Δ_{disl}) bei sluoksnio storio d .

Gautos gana didelės SER rodiklio $\alpha \geq 0.55 \dots \alpha \geq 0.8$ vertės pradinės medžiagos MOCVD GaN sluoksniuose rodo, kad mikrokristalų tūris (monokristale $\alpha=1$) sluoksnyje sudaro esminę dalį. Scintiliacinės pradinės medžiagos charakteristikos buvo įvertintos iš fotoluminescencijos spektrų. Spektre buvo aptiktos kristalams būdingos eksitoninės liuminescencijos (UV-PL) sandas su fotonų energijomis $h\nu \approx 3.45 \text{ eV}$ ir defektams priskirtinos mėlynosios B-PL (su spektro juostos smaile $h\nu \approx 2.9 \text{ eV}$) ir geltonosios (Y-PL, su juostos smaile ties $h\nu \approx 2.4 \text{ eV}$) liuminescencijos juostos. Gautas UV-PL juostos intensyvumo padidėjimas, esant didesniai fotosužadavimo tankiui, tuo tarpu B-PL

juostos intensyvumas beveik nekintamas. B-PL buvo priskirtas krūvininkų rekombinacijai dislokacinių cilindrų paviršiuje, o Y-PL, - donor-akceptoriniams elektroniniams šuoliams. Didelės $\alpha \geq 0.8$ vertės ir gana intensyvi UV-PL pradinėse MOCVD GaN medžiagose rodo gerai žinomą MOCVD GaN efektyvumą šviestukų (LED) formavimui.



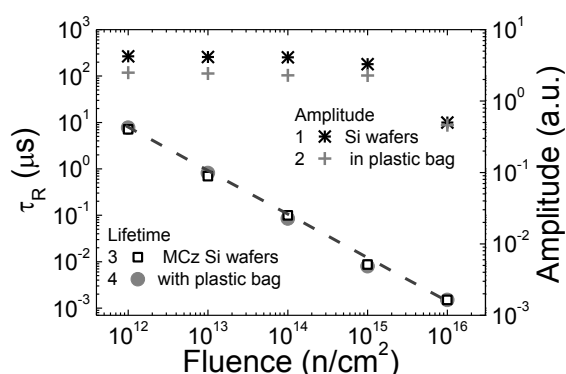
6.2 pav. a – Lazerinės UV spinduliuotės impulsais sužadintos (S-L) ir 1.6 MeV, itin mažo įtekio protonų pluoštelio sužadintos liuminescencijos spektrų palyginimas MOCVD GaN sluoksnuose: (pilka kreivė - padidintas LS-L spektras, priderinimui prie protonais sužadintos liuminescencijos intensyvumo); b - Protonų pluoštelio sužadintos (PI-L) liuminescencijos spektro evoliucija kintant sužadinimo įtekiui apšvitos protonais metu. c – Mėlynosios, geltonosios ir raudonosios protonais sužadintos liuminescencijos spektro smailių amplitudinių verčių kitimai didėjant 1.6 MeV protonų apšvitos įtekiui.

6.3 pav. Ištęstosios eksponentės (SER) rodiklio α kitimas didėjant 1.6 MeV protonų įtekiui. Intarpe i_1 iliustruojama mikrobangomis zondojuojamo fotolaidumo kinetikų būdinga kaita. Intarpe i_2 iliustruojama šių kinetikų kaita tradiciniame SER analizei mastelyje.

Apšvitų įtaka ir radiacinių defektų sudarymo parametrai buvo ištirti analogiškai, kaip aprašyta polikristalinio CdS medžiagoje, - atliekant laikinių bei spektrinių charakteristikų sinchroninius matavimus apšvitęs protonais metu. Medžiagos elektrinių parametrų kitimas buvo ištirtas nagrinėjant mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo relaksacijos kinetikas ir derinant su spektre išskirtosios liuminescencijos signalų, registruojamų iš tos pačios sužadintos bandinio srities (6.2 pav.). Antrinių (didelės energijos protonų smūginės fotojonizacijos sudarytų) krūvininkų porų sukūrimo efektyvumas $\kappa_p A_{pr} = 40 \mu\text{m}^{-1} \text{p}^{-1}$ ir radiacinių defektų sukūrimo sparta $K_p \approx 0.6 \text{ cm}^{-1}$ buvo įvertinta derinant fotoliuminescencijos, protonais indukuotos liuminescencijos spektrų parametrus, o nespindulinės rekombinacijos parametrai buvo surandami iš fotolaidumo kinetikų formos bei būdingų trukmių kaitos. Buvo atskleista, kad didėjant apšvitės įtėkui, kai radiacinių defektų koncentracija viršija technologinių defektų tankį MOCVD GaN, medžiagos tvarkumas mažėja, $\alpha < 0.8$ (6.3 pav.), priešingai, nei gauta CdS polikristaliniams sluoksniams, ir, tuo būdu, mažėja fraktalinės dimensijos faktorius.

VII-ame skyriuje aprašytas Vilniaus universitete suprojektuotas ir sukonstruotas didelių hadronų spinduliuotės įtėkių dozimetras VUTEG-5-AIDA, pagrįstas nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmės priklausomybe nuo hadronų apšvitės įtėkio

Įrenginys veikia nesąlytiniu būdu matuojant krūvininkų rekombinacijos trukmes, apšvitintuose didžiavaržio kristalinio Si plokštelių fragmentuose. Šis matavimų realizavimo būdas leidžia gana sparčiai išmatuoti didelį kiekį apšvitintų testinių bandinių, surinktų apšvitės stebėsenai (monitoringui) iš įvairių apšvitės vietų, ir tiesiogiai įvertinti įtėkį, remiantis tuo, kad absoliutinė krūvininkų rekombinacijos trukmė didžiavaržiam Si tiesiškai mažėja, didėjant apšvitės hadronais įtėkiui intervale $5 \times 10^{11} < \Phi < 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$.



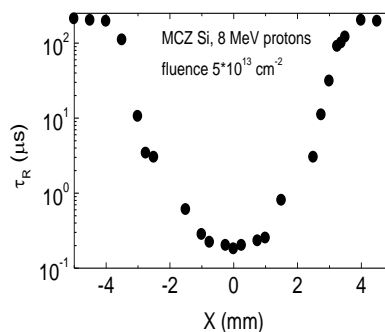
7.1 pav. MW-PCT signalo amplitudės (1, 2) ir krūvininkų rekombinacijos trukmės (3, 4) priklausomybės nuo hadronų įtėkio, išmatuotos laisvuose (1, 3) ir įpakuotuose (2, 4) Si dozimetriniuose sensoriuose.

Testinių stebėsenos bandinių (sensorių) priskyrimui (ženklinimui) ir siekiant išvengti paviršiaus užteršimo bei mechaninių pažeidimų, Si sensoriai yra talpinami plastikiniame dėkle. Įrenginyje VUTEG-5-AIDA matavimų kamera sukonstruota taip, kad būtų galima sparčiai įmontuoti ir matuoti sensorius plastikiniame dėkle. Šie polietileno tipo medžiagos dėklai nežymiai sklaido šviesą ir kiek sumažina registruojamo mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo (MW-PCT) signalo dydį. Apšvitės įtėkis įvertinamas derinant išmatuotų MW-PCT kinetikų parametrus su kalibracinėmis vertėmis. Signalų pakitimai dėl plastikinio dėklo sklaidomos sužadinto šviesos buvo įskaitomi įvedant pataisos koeficientus kalibracinėms kreivėms (7.1 pav.). Kaip matosi

7.1 pav., MW-PCT signalo amplitudė dėl plastikinio dėklo sumažėja, atžvilgiu neįpakauto testinio bandinio, bet signalo verčių kreivės yra lygiagrečios, t.y. identiškai priklauso nuo apšvitos įtėkio. Tuo tarpu krūvininkų gyvavimo trukmės vertės išlieka nepakitusios, t.y. nepriklauso nuo matavimo režimo, - su ir be plastikinio dėklo.

Siekiant padidinti matavimų tikslumą ir gauti kalibracines kreives įtėkių įvertinimui, kalibraciniai matavimai buvo atlikti naudojant skirtingos auginimo technologijos (MCZ, CZ, FZ, epi-Si) medžiagas bei jų darinius (epitaksiniai didžiavaržiai sluoksniai ant didelio laidumo padėklų) ir įvairias spinduliuotes (50 MeV, 26 GeV protonus, branduolinio reaktoriaus bei spalatoriaus neutronus). Buvo įsitikinta, kad tiesinis τ_R - Φ mažėjimas ir rekombinacijos trukmių vertės, gaunamas testiniuose Si dariniuose, nepriklauso nuo Si monokristalų auginimo technologijos (FZ, MCZ, DOFZ) ir dalelių tipo (rekombinacijos trukmių vidutinės vertės ir kitimai kreivėms po apšvitų protonais ir neutronais) bei hadronų energijos, kai yra viršytos slenkstinės energijos vertės dalelių stabdymui medžiagoje.

Siekiant padidinti matavimo režimų išlaikymo tikslumą ir patikimumą, įrenginys VUTEG-5-AIDA yra komplektuojamas su dviem matavimų kameromis, kur sudėtingesnėje iš jų yra sumontuoti temperatūros/drėgmės matavimo jutikliai ir žingsniniais varikliais valdomo kryptinio/plokštuminio skenavimo moduliai. Įrenginio VUTEG-5-AIDA, sukomplektuoto su skenavimo kamera, nuotrauka yra iliustruojama 7.2 pav. kairėje. Tokia VUTEG-5-AIDA įrenginio versija įgalina apšvitos pluoštelių kontūrų identifikavimą, kai pluoštelių diametras yra mažesnis už geometrinius Si sensoriaus matmenis (ilustracija 7.2 pav. dešinėje).



7.2 pav. Kairėje - patobulintas įrenginys VUTEG-5-AIDA-M. Dešinėje - krūvininkų gyvavimo trukmių pasiskirstymas Si darinio plokštumoje po 8 MeV protonų apšvitos, pluoštelių diametras 5 mm.

Siekiant iširti krūvininkų gyvavimo trukmės pasiskirstymą bandinio plokštumoje sukonstruotas 1D skeneris užtikrina $\sim 20\mu\text{m}$ erdvinę skyrą. Kalibraciniams hadronų pluoštelių profilio įvertinimo tyrimams buvo atliekamas skenavimams naudojant Si plokštelės fragmentą, apšvitintą 8 MeV protonų (kurie yra skvarbūs 300 μm storio Si sensoriams) pluošteliu. Pluoštelių vizualinis diametras registruojamas, CCD kamera, buvo 5 mm. Viendimensinė pluoštelių skerspjūvio projekcija pluoštelių diametre yra gana tiksliai atkurama rekombinacijos trukmių skenavimo būdu.

Didžioji dalis matavimo procedūrų, naudojant įrenginį VUTEG-5-AIDA, yra automatizuotos ir valdomos kompiuterio programa. Dozimetro VUTEG-5-AIDA programinę įrangą sudaro penki pagrindiniai moduliai, skirti oscilografo ir periferinių matavimo įrenginių (žingsninių variklių kontrolerio, temperatūros jutiklių, papildomo nuostovaus pašvietimo, oscilografo amplitudžių ir skleistinių režimo nustatymo) valdymui bei duomenų analizei.

Esminių rezultatų suvestinė ir išvados

1. Buvo parodyta, kad juostelinių Si detektorių briauna gali būti patikimai pasyvuota formuojant atominių Al_2O_3 sluoksnių nusodinimą (ALD) p-Si ir Si_3N_4 (PECVD būdu) sluoksnius n-Si, siekiant sukurti didelės erdvinės skyros Si juostelinių sensorių matricas. Atskleista, kad juostelinių detektorių briaunos pasyvavimas, siekiant žymiai sumažinti paviršinę rekombinaciją nuskeltoje briaunoje, yra efektyvesnis p-Si (ALD, Al) negu n-Si (PECVD, nitridas). Taip pat atskleista, kad pasyvuojančių sluoksnių su kristaliniu Si riboje ir pasyvuojančiuose sluoksniuose egzistuoja didelės krūvininkų prilipimo centrų koncentracijos.
2. Parodyta, kad nuskeltoje didelės erdvinės skyros Si juostelinių sensorių briaunoje paviršinės rekombinacijos įtaka elektrinėms detektorių charakteristikoms yra nežymi vidutiniais ir dideliais įtėkiais apšvitintose juostelinių detektorių matricose su nuskelta briauna, kai tūrinės rekombinacijos trukmė tampa žymiai trumpesnė už efektyvią paviršinės rekombinacijos trukmę.
3. Dviguboje logaritminėje skalėje gaunama tiesinė priklausomybė tarp hadronų apšvitos įtėkio (Φ) ir nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacinės gyvavimo trukmės (τ_R) kai hadronų apšvita sukuriami kintamo tankio išplitę klasterių tipo radiaciniai defektai kurių tankis yra proporcingas hadronų įtėkiui. Ši $\tau_R(\Phi)$ charakteristika yra universali ir nepriklauso nuo Si įtėkio sensorių auginimo technologijos bei apšvitinimo hadronų tipo. Taškiniai radiaciniai defektai sudaro krūvininkų prilipimo centrus. Šie centrai gali pasireikšti apšvitintuose Si sensoriuose po iškaitinimų, ir tuo atveju yra būdinga dvikomponentė nepusiausvirųjų krūvininkų tankio relaksacijos kinetika, kurios pradinis sandas atspindi krūvininkų rekombinaciją, o asimptotėje formuojasi prilipimo sandas.
4. Giliųjų lygmenų, priskiriamų taškiniams radiaciniams defektams Si, fotojonizacinės spektroskopijos būdu buvo identifikuota krūvininkų gaudyklė su aktyvacijos energija $E_{Mo1}=0.41$ eV, priskiriama tiesioginei užpildytų divakansijos $\text{V}_2^{=}$ lygmenų fotoaktyvacijai, o fotojonizacijos spektro laiptelis ties $E_{Mo2}=E_V+E_M=0.77$ eV priskirtinas valentinės juostos elektrono fotosužadimui į tuščius $\text{V}_2^{-/0}$ lygmenis. Fotojonizacijos spektriniai matavimai patvirtino $\text{V}_2^{-/0}$ gaudyklių dominavimą 10^{12} n/cm² įtėkiu apšvitintuose dioduose ir tai sutampa su DLTS spektrais, gautais tuose pačiuose bandiniuose. Šios gaudyklės veikia kaip krūvininkų prilipimo centrai su gana ilga terminės aktyvacijos trukme.
5. Buvo aptiktas liuminescencijos ir laidumo fotogesinimo efektas kuris pasireiškia mikro-kristaluose, esančiuose polikristalinėje CdS medžiagoje dėl nepusiausvirųjų krūvininkų srautų persiskirstymo tarp mikro-kristalų ir periferinių sričių netvarkioje polikristalinėje medžiagoje. Šis efektas reiškia, kad vyksta sudėtinga defektų sąveika foto-sužadintų krūvininkų tankio kitimo ir planarinio persiskirstymo procesuose. Liuminescencijos planarinio pasiskirstymo konfokalinės mikroskopijos vaizdinimas skirtingų tipų polikristaliniuose CdS sluoksniuose atskleidė, kad homogeniškiausias sluoksnius yra antrojo tipo bandiniuose (suformuotuose pasitelkiant 260 C temperatūros ir

75 min. ekspozicijos režimą). Trečiojo tipo (260 C, 80 min) bandiniuose fotoluminescencijos spektruose dominuoja žalia liuminescencija.

6. Nepusiasvirųjų krūvininkų tankio relaksacijos kinetikos gali būti aprašytos tik naudojantis išžėstosios eksponentės (SER) aproksimacija, priskiriant skirtingas SER rodiklio α vertes, aproksimuojant eksperimentinių fotolaidumo kinetikų, gautų skirtingo tipo CdS dariniuose, formą SER modeliui. Priderintos SER rodiklio vertės ($\alpha=0.16-0.20 \ll 1$) indikuoja anomalaus krūvininkų transporto (atsitiktinių klaidžiojimų, krūvininkų prilipimo ribotos mažadimensinės difuzijos) dominavimą, būdingą netvarkioms medžiagoms, kuris ženkliai pasireiškia ištirtose CdS polikristalinėse struktūrose. SER rodiklis α gali būti susietas su netvarkaus darinio fraktalinės dimensijos (f) parametru. Tuo būdu buvo nustatyta, kad antrojo ir trečiojo tipo CdS sluoksniai turi panašią fraktalinę struktūrą, apibūdinamą fraktaline dimensija $f \approx 0.14$, o pirmojo tipo CdS polikristalai charakterizuojami fraktaline dimensija $f \approx 0.17$.

7. Mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo ir laike bei spektre išskirtosios liuminescencijos charakteristikų sinchroniniai matavimai CdS sluoksniuose apšvitos 1.6 MeV protonų metu leido įvertinti tokius parametrus: krūvininkų porų generavimo našumą $\kappa_p = 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ vienam 1.6 MeV protonui, radiacinių defektų sukūrimo spartą $K_p \approx 0.9 \text{ cm}^{-1}$ bei krūvininkų porų sukūrimo sensoriaus pločio viename mikrone efektyvumą $\kappa_p A_p = 60 \text{ } \mu\text{m}^{-1} \text{ p}^{-1}$. Buvo nustatyta kad CdS polikristalinių sluoksnių liuminescencijos apčiuopiamas signalas gali būti užregistruojamas protonų apšvitos metu esant protonų įtėkiui $\Phi < 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

8. Mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo ir laike bei spektre išskirtosios liuminescencijos charakteristikų sinchroniniai matavimai GaN epitaksiniuose sluoksniuose apšvitos 1.6 MeV protonų metu leido įvertinti tokius parametrus: krūvininkų porų generavimo našumą $\kappa_p = \langle n_p \rangle / N_p \approx 1.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ vienam 1.6 MeV protonui, radiacinių defektų sukūrimo spartą $K_p \approx 0.6 \text{ cm}^{-1}$ bei krūvininkų porų sukūrimo sensoriaus pločio viename mikrone efektyvumą $\kappa_p A_p = 40 \text{ } \mu\text{m}^{-1} \text{ p}^{-1}$. Palyginant K_p GaN ir CdS sluoksniuose, matosi, kad GaN yra radiacijai tolerantiškesnė medžiaga. Palyginant $\kappa_p A_p$ parametrus, matosi, kad tinkamam krūvio surinkimo dalelių detektoriuje efektyvumui pasiekti, GaN sluoksniai turėtų būti storesni už CdS sluoksnius. Taip pat buvo nustatyta, kad esant didesniems nei 10^{14} cm^{-2} protonų įtėkiams vyksta neišvengiama GaN medžiagos degradacija, ir scintiliacinės charakteristikos blogėja. Kalibruotas žaliai - geltonos protonais indukuotos liuminescencijos (PI-L) GaN intensyvumo mažėjimas taip pat gali būti panaudotas hadronų dozimetrijai ganėtinai plačiame įtėkių intervale.

9. Aptikti krūvininkų porų generavimo fotonais ir aukštųjų energijų protonais efektyvumo skirtumai plačiatarpiuose CdS ir GaN puslaidininkiuose. Šie skirtumai paaiškinti impulso tvermės ypatumais su medžiaga sąveikaujant fotonams ir didelių energijų protonams.

10. Buvo suprojektuotas ir sukonstruotas dozimetras VUTEG-5-AIDA skirtas didelių įtėkių spinduliuotės matavimams hadronų greitintuvuose ir spalatoriuose ir spinduliuotės poveikių stebėsenai greitintuvų aplinkoje. Šis VUTEG-5-AIDA įrenginys buvo įdiegtas CERN'e greitintuvo aplinkos ir dalelių pluoštelių monitoringui.

VUTEG-5-AIDA dozimetras leidžia spartų greitintuvų aplinkų monitoringą, naudojant Si darinių fragmentus plastikiniuose dėkluose ir priimtina tikslų apšvitintų detektorių bei dalelių pluoštelių įvertinimą, įgyvendinant krūvininkų rekombinacijos trukmių bei

fotolaidumo amplitudžių kitimų įvertinimus atžvilgiu kalibracinių verčių, o hadronų pluoštelių kontūrų profiliai ir apšvitų pasiskirstymai greitintuvų aplinkose gali būti skenuojami pasitelkiant mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo parametrų kitimus.

Publikacijų sąrašas

Straipsniai

- A1. E. Gaubas, V. Borschak, I. Brytavskyi, T. Ceponis, V. Kalendra, V. Smyntyna, **A. Tekorius**, *Spectroscopy of deep traps in CdS-Cu₂S junction structures*, Materials Science and Engineering B (2012), **5(12)**, 2597-2608.
- A2. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, A. Jasiūnas, A. Uleckas, J. Vaitkus, A. Velička, *Dosimetry of background irradiations of accelerators based on hadrons fluence dependent carrier lifetime measurement*, Proceedings of the 4th International conference “Radiation interaction with material and its use in technologies 2012, Program and materials (2012), pp. 282-285.
- A3. E. Gaubas, V. Kalendra, T. Ceponis, A. Uleckas, **A. Tekorius**, J. Vaitkus, A. Velička, *Study of deep level characteristics in the neutrons irradiated Si structures by combining pulsed and steady-state spectroscopy techniques*, Journal of Instrumentation (2012), JINST **7** C11006.
- A4. E. Gaubas, V. Kovalevskij, A. Kadys, M. Gaspariūnas, J. Mickevicius, A. Jasiūnas, V. Remeikis, A. Uleckas, **A. Tekorius**, J. Vaitkus, A. Velička, *In situ variations of recombination characteristics in MOCVD grown GaN epi-layers during 1.7 MeV protons irradiation*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **307** (2013) 370–372.
- A5. E. Gaubas, V. Borschak, I. Brytavskyi, T. Čeponis, D. Dobrovolskas, S. Juršėnas, J. Kusakovskij, V. Smyntyna, G. Tamulaitis, **A. Tekorius**, *Nonradiative and Radiative Recombination in CdS Polycrystalline Structures*, Advances in Condensed Matter Physics, 2013 (2013).
- A6. E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiūnas, E. Jelmakas, S. Juršėnas, A. Kadys, T. Malinauskas, **A. Tekorius**, P. Vitta, *Study of carrier recombination transient characteristics in MOCVD grown GaN dependent on layer thickness*, AIP Advances **3**, (2013), 112-128.
- A7. E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiūnas, 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**, 062104 (2014).
- A8. E. Gaubas, D. Meskauskaite, I. Brytavskyi, T. Ceponis, J. Pavlov, A. Jasiūnas, V. Remeikis, V. Kalesinskas, G. Tamulaitis, V. Kovalevskij, **A. Tekorius**, *In situ variations of carrier decay and proton induced luminescence characteristics in polycrystalline CdS*, Journal of Applied Physics (2014).
- A9. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, A. Jasiūnas, V. Kovalevskij, D. Meškauskaitė, J. Pavlov, V. Remeikis, J. Vaitkus, *In situ and ex situ study of variations of recombination characteristics in MOCVD grown GaN under hadron irradiations*, 5th International conference „Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014“, Kaunas, 2014, Program and materials (2014), P3-25, pp. 436-439.
- A10. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, J. Pavlov, J. Vaitkus, M. Glaser, M. Moll, *Fluence and anneal dependent variations of recombination parameters in Si irradiated by 26 GeV protons*, 5th International conference „Radiation interaction with materials:

fundamentals and applications 2014“, Kaunas, 2014, Program and materials (2014), P3-24, pp. 432-435.

A11. T. Čeponis, 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*, 5th International conference „Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014“, Kaunas, 2014, Program and materials (2014), P3-17, pp. 405-408.

Pranešimai konferencijose

P1. A. Uleckas, E. Gaubas, T. Čeponis, **A. Tekorius**, V. Kovalevskij, V. Remeikis, *Barjerinės talpos elektrinio srovių kaitos tyrimas Si detektoriuose apšvitinimo 1.5 MeV energijos protonais metu*, 39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2011.

P2. A. Velička, T. Čeponis, E. Gaubas, A. Uleckas, **A. Tekorius**, *Technologinių defektų iškaitinimo tyrimai Si tiristoriniuose dariniuose talpiniais ir giliųjų lygmenų spektroskopijos metodais*, 39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2011.

P3. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, A. Jasiūnas, A. Uleckas, J. Vaitkus, A. Velička, *Dosimetry of background irradiations of accelerators based on hadrons fluence dependent carrier lifetime measurement*, 4th International conference “Radiation interaction with material and its use in technologies“ 2012.

P4. V. Kalendra, E. Gaubas, T. Čeponis, J. Vaitkus, A. Uleckas, **A. Tekorius**, *Study of deep level characteristics in the hadrons irradiated Si detectors by combining pulsed and steady-state spectroscopy techniques*, 14th International workshop on radiation imaging detectors, Figueira da Foz, Coimbra, Portugal, 2012.

P5. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, V. Kovalevskij, V. Remeikis, I. Brytavskyi, *In situ modification of CdS-Cu₂S structures during irradiation by protons*, 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2013.

P6. **A. Tekorius**, E. Gaubas, J. Vaitkus, M. Glaser, M. Moll, *Variations of recombination parameters under anneals in Si structures irradiated by hadrons*, 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius, 2013.

P7. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, J. Vaitkus, *Hadronų greitintuvų foninių apšvitų dozimetrija*, 3-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai“, Vilnius, 2013.

P8. E. Gaubas, T. Čeponis, **A. Tekorius**, J. Vaitkus, *Silicon single crystals for radiation monitoring imaging by the free carriers lifetime measurement*, 15th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Paris, 2013.

P9. E. Gaubas, T. Čeponis, **A. Tekorius**, J. Vaitkus, V. Fadeyev, H. Sadrozinski, *Preliminary results on measurements of surface recombination velocity on slim-edge passivated Si structures*, 23rd RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders, Geneva, 2013.

P10. E. Gaubas, T. Čeponis, A. Uleckas, **A. Tekorius**, J. Vaitkus, M. Glaser, M. Moll, *Hadrons fluence measurements based on carrier lifetime control*, 2nd AIDA Annual Meeting, Frascati, 2013.

P11. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, A. Jasiūnas, v. Kovalevskij, D. Meškauskaitė, J. Pavlov, V. Remeikis, J. Vaitkus, *In situ and ex situ study of variations of*

recombination characteristics in MOCVD grown GaN under hadron irradiations, 5th International conference “Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014”, Kaunas, 2014.

P12. **A. Tekorius**, E. Gaubas, T. Čeponis, J. Pavlov, J. Vaitkus, M. Glaser, M. Moll, *Fluence and anneal dependent variations of recombination parameters in Si irradiated by 26 GeV protons*, 5th International conference “Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014”, Kaunas, 2014.

P13. 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*, 5th International conference “Radiation interaction with materials: fundamentals and applications 2014”, Kaunas, 2014.

Summary

This dissertation, titled “Combined methods and instrumentation for dosimetric monitoring of the large fluence hadron irradiations”, is addressed to solve several nowadays problems of dosimetry and fluence measuring under high energy hadron type irradiations. There additional problems in radiation defect physics for recognition and characterization of dominant defects, in charge carrier recombination and transport physics for rapid and reliable interpretation of sensor signals, in surface modification physics and surface recombination evaluation methodology appear in design of dosimetry sensors and measurement technologies.

The research problems, scientific relevance and novelty, objectives of the research and practical importance of the results of the dissertation are discussed within Introduction section. The statements to defence as well as author contribution are there determined in the Introduction section. In Chapter 2, the large fluence dosimetry methods are briefly reviewed to ground motivation of this research. In Chapter 3 there are discussed the materials and samples investigated as well as the research techniques applied. The surface passivation of slim edge Si detectors evaluations, the fluence dependent carrier recombination lifetime characteristics and spectral parameters ascribed to radiation induced point-like defects are discussed in Chapter 4. The results of the research of the initial material and of junctions made of Cu₂S-CdS are presented in Chapter 5. The parameters of carrier pair production and of radiation defect introduction rate in CdS polycrystalline layers are presented and methods for their extraction are also discussed in Chapter 5. Evaluations of the parameters of the technological and of the radiation defects in MOCVD grown GaN epi-layers are discussed in Chapter 6. The designed and fabricated large fluence dosimeter based on contactless measurements of the carrier recombination lifetime in Si wafer fragments is described in Chapter 7. The general conclusions are presented at the end of dissertation.

Trumpinių sąrašas

- ALD** – atomic layer deposition (formavimo technologija)
BELIV – barrier evaluation by linearly increasing voltage (impulsinė metodika)
CERN –European Centre of Nuclear Research
CZ – Czochralski (auginimo technologija)
CMI – confocal microscopy imaging
C-V – capacitance-voltage (matavimo metodika)
CVD – chemical vapour deposition (auginimo technologija)
ENR – electrically neutral region
EPR – electron paramagnetic resonance (spektroskopijos tipas)
FZ – float zone (auginimo ir gryninimo technologija)
DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy
DOFZ – oxygen doped float zone (auginimo ir legiravimo technologija)
GIXRD – grazing incidence X-ray diffractometry
Kerma – kinetic energy released per unit mass
LED – light emitting diode (WL-LED white light LED)
MCZ – Czochralski with applied magnetic field (auginimo technologija)
MOCVD – metal-organic chemical vapour deposition (auginimo technologija)
MW-PC (T) –microwave probed photo-conductivity (MW-PC (T) transient)
NIEL – non-ionizing energy loss processes
PECVD – plasma enhanced chemical vapour deposition
PIS – photo-ionization spectroscopy
PL– photo-luminescence
SER – stretched exponential relaxation (relaksacijos modelis ir procesas)
S/HL-LHC – super/hyper luminous large hadron collider (CERN'e)
SCP – method scribe–cleave–passivate (detektoriaus siauro krašto formavimas)
TDD – threading dislocation density
TR-L – time resolved luminescence
TSC – thermally stimulated currents (spektroskopijos metodika)
UV – ultra violet
XRD –X-ray diffractometry
YG-PI-L – yellow-green proton induced luminescence (kaip ir PI-YG-L)
Y–yellow; **B**–blue; **IR**–infra-red; **RIR**– red-infrared (liuminescencijos spalva)

Informacija apie autorių

Vardas Pavardė	Audrius Tekorius
Gimimo data ir vieta	1984 m. gegužės 24 d., Šiauliai, Lietuva
Adresas	Pašilaičių g. 6-70, Vilnius, Lietuva
Elektroninis paštas	audrius.tekorius@ff.stud.vu.lt
Išsilavinimas	2003 Šiaulių „Romuvos“ vid. mokykla 2003-2007 Šiaulių universitete, gamtos mokslų fakultete įgytas fizikos bakalauro laipsnis 2007-2009 Vytauto Didžiojo universitete, gamtos mokslų fakultete įgytas fizikos magistro laipsnis 2011-2015 Vilniaus universitete, Fizikos fakultete doktorantūros studijos
Darbo patirtis	2009-2011 Šiaulių universitetas; inžinierius 2011-2014 Vilniaus universitetas, Taikomųjų mokslų institutas; inžinierius 2014-2015 Vilniaus universitetas, Taikomųjų mokslų institutas; jaunesnysis mokslo darbuotojas
Specializacija	Puslaidininkų ir jų darinių charakterizavimas nesąlytinais metodais; krūvininkų gyvavimo trukmės matavimai, nesąlytinė fotojonizacijos spektroskopija, radiacinių ir savitųjų defektų charakterizavimas
Publikacijos	12 straipsnių, įtrauktų į ISI duomenų bazę, 13 pranešimų konferencijose