

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Aurimas Uleckas

NESĄLYTINĖ SAVITŲJŲ IR TECHNOLOGINIŲ DEFEKTŲ
SPEKTROSKOPIJA Si, Ge IR GaN DARINIUOSE

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

Vilnius, 2012

Disertacija rengta 2008 – 2012 metais Vilniaus universiteto, Fizikos fakulteto ir Taikomųjų mokslų institute.

Mokslo vadovas:

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

Disertacija ginama Vilniaus universiteto medžiagų inžinerijos krypties mokslo taryboje:

Pirmininkas

Prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

Prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

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

Doc. dr. Bonifacas Vengalis (FTMC Puslaidininkų fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Oponentai:

Prof. habil. dr. Arvidas Galdikas (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Prof. habil. dr. Antanas Feliksas Orliukas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama 2012 m. rugsėjo 26 d. 17.00 val. 704 auditorijoje Vilniaus universitete Saulėtekio al. 9-III, LT- 10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. rugpjūčio 20d.

Su disertacija galima susipažinti Vilniaus universiteto bibliotekoje ir Fizinių ir Technologijos mokslų centro Puslaidininkų fizikos institute.

Padėka

Visų pirma norėčiau padėkoti savo vadovui habil. dr. E. Gaubui už įtraukimą į mokslinį darbą laboratorijoje ir didelę įtaką mano tobulėjimui.

Esu dėkingas prof. A. F. Orliukui ir dr. R. Aleksiejūnas už kruopštų disertacijos perskaitymą ir vertingas pastabas.

Dėkoju visiems laboratorijoje dirbusiems kolegoms už kūrybingą ir draugišką atmosferą, ypač T. Čeponiui už produktyvų ir sklandų bendradarbiavimą.

Galiausiai, norėčiau padėkoti tėvams ir draugams už jų nuolatinę paramą ir palaikymą studijų metais.

Šį darbą rėmė Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Išvadas

Viena iš pagrindinių priežasčių, keičiančių puslaidininkinių prietaisų parametrus, yra elektriškai aktyvūs defektai. Gilieji lygmenys sąlygoja krūvininkų gyvavimo trukmės mažėjimą medžiagoje, todėl blogėja krūvininkų surinkimo koeficientas puslaidininkiniuose detektoriuose, išauga energijos nuostoliai galios prietaisuose bei mažėja šviesos diodų našumas. Geriausiai įsisavinto ir dominuojančio šiuolaikinėje elektronikoje silicio technologijos vystymasis, paremtas tranzistorių geometrinių matmenų mažinimu, pasiekė Si savybių fundamentines ribas. Nauja silicio pagrindu paremtos technologijos vystymosi kryptis yra įtemptų Si sluoksnių pritaikymas bei medžiagų su geresniais elektriniais parametrais integravimas, formuojant puslaidininkinius prietaisus ant silicio pagrindo. Poreikis pakeisti Si paviršiaus pasyvavimui naudojamą silicio oksidą didesnės dielektrinės skvarbos medžiagomis, atveria galimybes tranzistorių formavimui pritaikyti medžiagas, tokias kaip germanis, pasižymintis dideliu krūvininkų judriu. Tačiau auginant kelias medžiagas su skirtingomis gardelės konstantomis yra neišvengiamas dislokacinių defektų susidarymas. Germanio sluoksnių, formuojamų ant Si, kokybės pagerinimui yra taikoma visa eilė technologinių būdų: periodinis iškaitinimas auginimo metu, papildomų sluoksnių įterpimas dislokacijų tankio tarp skirtingų medžiagų sluoksnių sumažinimui, nano-heteroepitaksija, kai elastiniai įtempimai yra sumažinami, formuojant mažas Si saleles ir ant jų auginant Ge.

Dislokaciniai tinklai yra aktuali problema, įtakojanti GaN pagrindu pagamintų prietaisų elektrooptinius bei elektrinius parametrus. Plačiatarpiai III grupės nitridų dariniai yra paprastai auginami ant safyro arba silicio karbido padėklų, todėl susidaro sraigtinės ir kraštinės dislokacijos dėl gardelių konstantų neatitikimo bei skirtingų terminų plėtimosi koeficientų. Formuojant GaN darinius ant Si paviršiaus, dislokacijų sumažinimui yra naudojamos daugiasluoksnės struktūros, tokios kaip $\text{Sc}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Si}$. Kristale dislokacijos sąlygoja elektrinių būsenų susidarymą draustinių energijų tarpe, kurios veikia kaip rekombinaciniai arba prilipimo centrai, mažinantys šviesos diodų liuminescencijos našumą, diodų pramušimo įtampą bei įtakojantys nuotėkio srovių didėjimą. Dėl šių priežasčių defektų nustatymas yra būtinas, vystant ir tobulinant naujų, kokybiškų sluoksnių auginimo technologijas.

Puslaidininkiniai *pin* diodai yra plačiai taikomi kaip dalelių detektoriai Europiniame Branduolinių Tyrimų Centre (CERN). Standartiniai Si detektoriai patikimai veikia iki 10^{15} cm^{-2} apšvitos įtėkio, tuo tarpu atnaujinamame didžiajame priešpriešinių hadronų pluoštelių greitintuve reikalingi detektoriai atsparūs apšvitos įtėkiui $>10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Proporcingai įtėkiui, detektoriuose didėja defektų tankis, kuris įtakoja detektorių pagrindinių parametru blogėjimą – krūvio surinkimą ir didėjančią nuotėkio srovę. Radiacijai atsparių Si detektorių technologijų vystymas vyksta keliomis kryptimis, – tai kristalų auginimo, legiravimo, defektų inžinerijos ir naujų prietaisinių struktūrų formavimas. Magnetiniame lauke Čochralskio metodu užauginti Si kristalai, dėl didelio deguonies tankio ir tolygaus priemaišų pasiskirstymo visame kristalo tūryje, yra vieni iš tinkamiausių radiacijai atsparių detektorių gamybai. Perspektyvi technologija Si kristalų atsparumui radiacinių defektų susidarymui padidinti yra izovalentinių Ge atomų įterpimas į Si gardelę. Germanio atomo radiusas yra didesnis lyginant su Si atomu, todėl silicio gardelėje atsiranda elastiniai įtempimai, kurie sumažina vakansinių defektų susidarymą apšvitos metu. Besivystant plataus draustinių energijų tarpo medžiagų

auginimo technologijoms, radiacijai atsparių detektorių kūrime aktualūs yra deimanto, GaN ir SiC kristalai, kuriems būdingas didelis medžiagos tankis, maža nuotėkio srovė, puikios mechaninės savybės.

Kuriami naujos kartos 3D Si detektoriai, kai kuriais atvejais pakeisiantys įprastus Si detektorius, kurių bazės storis $\sim 300 \mu\text{m}$, ir krūvio surinkimo efektyvumas drastiškai sumažėja dėl didelio defektų tankio, pasiekus $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ apšvitos įtekį. Tuo tarpu 3D detektoriai yra sudaryti iš periodiškai, 20 – 50 μm atstumu, išdėstytų vertikalių n^+ ir p^+ elektrodų-stulpelių, einančių per visą detektoriaus storį, tokiu būdu sumažinamas nuskurdinto sluoksnio storis. Ši technologija leidžia sumažinti visiško nuskurdinimo įtampą, krūvininkų dreifo nuotolį ir tuo pat metu užtikrina didelį krūvio surinkimo efektyvumą.

Vystant medžiagų auginimo ir legiravimo technologijas bei naujų struktūrų ir defektų inžineriją, yra reikalinga informacija apie radiacinių defektų susidarymą bei sąveiką. Svarbūs parametrai, lemiantys puslaidininkinių detektorių efektyvumą, yra krūvininkų gyvavimo trukmės bei pernašos parametrai. Nepaisant didelės įvairovės defektų identifikavimo metodikų, naujų, nesąlytinių prietaisų su didesne skiriamąja geba vystymas atveria galimybes visapusiškesniam medžiagų charakterizavimui. Gilesnis supratimas apie radiacinių defektų susidarymo, migracijos, transformacijos ir defektų tankio kitimus apšvitos metu, leidžia tiksliau įvertinti ir kontroliuoti detektorių parametrus realiu laiku. Prietaisinių bei įvairių daugiasluoksnių struktūrų charakterizavimui jų formavimo metu yra reikalingi daugiafunkciniai, nesąlytiniai prietaisai, leisiantys optimizuoti technologines operacijas.

Darbo tikslas

Naujų nesąlytinių metodų, skirtų defektų charakterizavimui, vystymas ir savitųjų bei technologinių defektų Si, Ge ir GaN struktūrose tyrimas.

Uždaviniai

Darbo tikslui įgyvendinti buvo iškelti tokie uždaviniai:

- nesąlytinės, giliųjų lygmenų laike išskirtosios spektroskopijos vystymas;
- nesąlytinės, mikrobangomis zondojuojamo fotolaidumo metodikos vystymas ir matavimo prietaisų kūrimas krūvininkų gyvavimo trukmės pasiskirstymo nehomogeninėse struktūrose profiliavimui;
- krūvininkų gyvavimo trukmės Si struktūrose kontrolė apšvitinimo skvarbiaisiais ir stabdomais protonais metu bei radiacinių defektų temperatūrinės kaitos tyrimas;
- rekombinacijos parametru, priskirtinų skirtingiems sluoksniams plonose SiGe struktūrose, išskyrimas ir kaitos tyrimas;
- legiravimo, metalų implantacijos ir apšvitinimo įtakos Ge struktūrų rekombinacijos charakteristikoms tyrimas;
- augimo ir radiacinių defektų tyrimas epitaksinėse GaN struktūrose.

Darbo aktualumas ir mokslinis naujumas

Šiame darbe buvo sukurta nesąlytinė laike išskirtosios giliųjų lygmenų spektroskopijos metodika. Šiuo metodu buvo įvertinti defektų parametrai hadronais apšvitintame Si bei metalais implantuotose Ge struktūrose. Rekombinacijos parametru kontrolei apšvitos stabdomais bei skvarbiaisiais hadronais metu buvo sukurta nesąlytinė metodika ir išbandyta matavimų sąranga. Iširta radiacinių defektų tipų ir jų tankio kaita

apšvitos metu ir pasiūlyti modeliai, aprašantys išplitusių defektų tankio kaitą nuo apšvitos įtėkio. Įvertinta dislokacijų tinklo įtaka rekombinacijos parametrams įtemptose SiGe struktūrose ir epitaksiniuose GaN sluoksniuose. Pasiūlytos metodikos ir sukurta matavimų sąranga fotojonizacijos kinetikoms, laisvakrūvės sugerties, vienalaikių fotolaidumo ir fotoluminescencijos kinetikoms registruoti.

Darbo praktinė reikšmė

Skurta nesąlytinė laike išskirtosios spektroskopijos metodika giliųjų lygmenų parametrų įvertinimui kambario temperatūroje. Ši metodika įgalina sinchroniškai kontroliuoti gaudyklių aktyvacijos energiją ir krūvininkų gyvavimo trukmę. Sukurtas, išbandytas ir sukalibruotas mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų matavimo prietaisas, skirtas krūvininkų gyvavimo trukmės įvertinimui ir technologinių procesų kontrolei. Medžiagos bei detektorių parametrų kaitai kontroliuoti apšvitos metu, buvo sukurta nuotoliniu būdu valdomas įrenginys ir instaliuotas į tandeminio greitintuvo apšvitos kamerą. Silicyje buvo nustatyta krūvininkų gyvavimo trukmės tiesinė prieklausa nuo skvarbiųjų hadronų įtėkio, nepriklausanti nuo Si auginimo technologijos, suformuotų struktūrų ir dalelių energijos. Pastaroji prieklausa gali būti pritaikyta apšvitos dozimetrijai.

Ginamieji teiginiai:

1. Nesąlytinė fotojonizacijos skerspjūvio ir foto-sužadintų krūvininkų gyvavimo trukmės suderinta ir vienalaikė spektroskopija, pagrįsta fotolaidumo kinetikų zondavimu mikrobangomis, yra jautrus metodas giliųjų lygmenų, priskirtinų technologiniams ir radiaciniams defektams, tyrimui temperatūroje, artimoje prietaisų veikimo aplinkai.
2. Rekombinacijos trukmės tiesinė prieklausa nuo skvarbiųjų hadronų įtėkio silicyje, nepriklausanti nuo Si auginimo technologijos ir hadronų energijos, yra sąlygota išplitusių, klasterių tipo defektų, tuo tarpu taškiniai radiaciniai defektai sąlygoja prilipimo trukmės temperatūrinius bei iškaitinimų nulemtus kitimus.
3. Krūvininkų rekombinacijos trukmės matavimas nesąlytine metodika apšvitinimo hadronais metu įgalina kontroliuoti radiacinių defektų susidarymą bei evoliuciją silicio medžiagoje ir dalelių detektoriuose.
4. Dislokacijų tinklas Si-Ge ir plonuose GaN dariniuose susiformavęs auginimo bei technologinių procesų metu sąlygoja multi-komponentinę krūvininkų relaksaciją, kur pradinė greitoji komponentė koreliuoja su fotoluminescencijos procesais mikrokristalituose, tuo tarpu asimptotinis, išžėstos eksponentės krūvininkų relaksacijos pobūdis yra nulemtas krūvininkų prilipimo bei atsitiktinio klaidžiojimo didelio dislokacijų tankio tinkluose tarpkristalitinėje srityje.

Disertacijoje pateiktų rezultatų publikavimas

Disertacijoje pateikti rezultatai yra publikuoti kartu su bendraautoriais 20 mokslinių publikacijų: 5 straipsniai išspausdinti Lietuvos fizikos žurnale, 3 straipsniai išspausdinti

žurnale Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2 straipsniai žurnale Materials Science in Semiconductor Processing, po 1 straipsnį išspausdinta Applied Physics Letters, Review of Scientific Instruments, Material Science and Engineering B, Superlattices and Microstructures, Physica B ir Acta Physica Polonica A žurnaluose, bei 4 straipsniai išspausdinti konferencijų darbuose. Tyrimų rezultatai buvo pristatyti 30 pranešimų tarptautinėse (E-MRS, GADEST, CERN RD50 ir kt.) ir nacionalinėse (LNFK36-39) konferencijose.

Disertacijos struktūra

Disertacija yra sudaryta iš aštuonių skyrių. Pirmajame skyriuje pateiktas įvadas. Antrajame skyriuje apžvelgiami kontaktiniai ir nesąlytiniai metodai giliųjų lygmenų parametrų ir puslaidininkinių medžiagų būdingųjų dydžių įvertinimui. Trečiajame skyriuje pateikti krūvininkų gyvavimo trukmės matavimo principai bei aprašyti sukurti daugiafunkciniai prietaisai krūvininkų gyvavimo trukmių skersiniam ir planariniam pasiskirstymui bandinyje tirti. Ketvirtajame skyriuje aprašyta šiame darbe išvystyta nesąlytinė, laike išskirtosios giliųjų lygmenų spektroskopijos metodika ir Si bei Ge įvairių darinių giliųjų centrų fotojonizacijos spektroskopijos rezultatai. Penktajame skyriuje aprašytos radiacinių defektų silicyje charakteristikos, o šeštajame – radiacinių defektų evoliucijos apšvitos skvarbiaisiais ir stabdomais hadronais metu tyrimų rezultatai. Septintajame skyriuje aprašyti krūvininkų gyvavimo trukmės kitimai Ge, įtakoti legiravimo ir metalų implantacijos, bei rekombinacinių charakteristikų tyrimo įtempuose Si-Ge sluoksniuose rezultatai. Aštuntajame skyriuje aprašytos krūvininkų rekombinacijos charakteristikos GaN sluoksniuose, sąlygotos netvarkios dislokacinio tinklo struktūros. Disertacijos pabaigoje suformuluotos išvados ir pateiktas cituotos literatūros sąrašas.

DISERTACIJOS TURINYS

Įvade yra trumpai apžvelgiama tyrimų būklė disertacijos tema. Čia suformuluoti šio darbo tikslas ir uždaviniai, aptariamas darbo aktualumas, mokslinis naujumas ir tyrimų praktinė reikšmė. Įvade yra suformuluoti ginamieji teiginiai, autoriaus indėlis į vykdytus tyrimus ir pateikti autoriaus, kartu su bendraautoriais, publikacijų ir pranešimų konferencijose sąrašas.

II-ame skyriuje aptariami kontaktiniai bei nesąlytiniai metodai defektų puslaidininkinėse struktūrose įvertinimui. Aprašomi giliųjų lygmenų spektroskopijos principai, kontaktinių metodų privalumai bei parametų įvertinimo ribos. Čia smulkiau aptartas radiacinių defektų parametų įvertinimas puslaidininkiniuose detektoriuose, esant dideliam apšvitos įtėkiui. Aptariami metodai defektų pasiskirstymo puslaidininkinio darinio gylyje įvertinimui. Palyginamos nesąlytinės kvazistacionarios ir kinetinės metodikos krūvininkų tankio relaksacijoms registruoti ir krūvininkų gyvavimo trukmių įvertinimui.

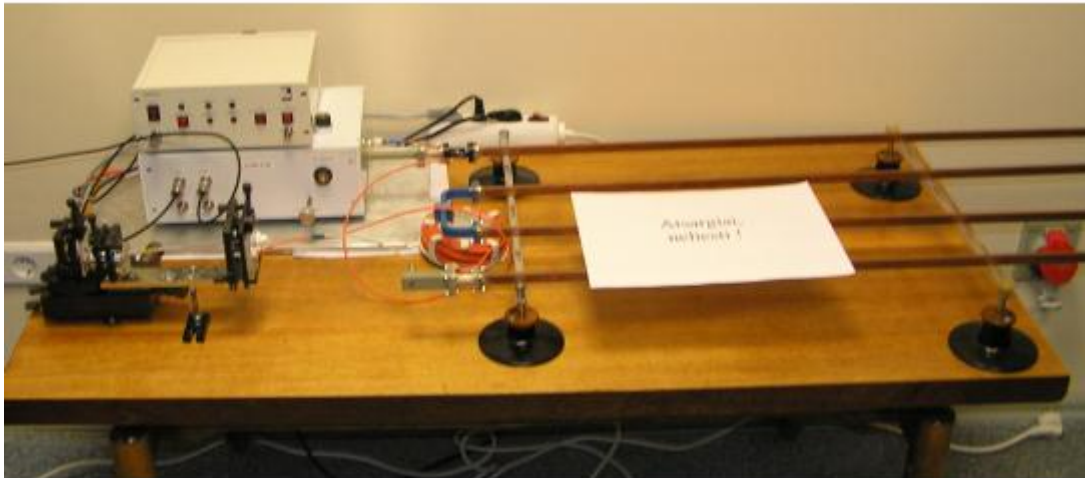
III-ame skyriuje aptartos krūvininkų rekombinacijos parametų įvertinimo metodikos. Išsamiai aprašoma šiame darbe naudota nesąlytinė mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų matavimo metodika, kuria galima įvertinti krūvininkų gyvavimo trukmes tik santykinai mažo sužadavimo atveju. Tiesinis matavimo režimas išlaikomas, kai nepusiausvirųjų krūvininkų tankis (Δn) neviršija pusiausvirųjų krūvininkų koncentracijos (n_0), t.y. $\Delta\sigma/\sigma_0 \sim \Delta n(t)/n_0 < 1$, kur σ_0 – medžiagos elektrinis laidumas, $\Delta\sigma$ – fotosužadintų krūvininkų sąlygotas laidumas. Medžiagos rekombinacinių parametų pasiskirstymo kontrolei buvo pritaikyta mikrobangų adatinė antena, veikianti artimo lauko režime.

Laisvakrūvė sugertis, kai zondavimui pasitelkiama infraraudonoji spinduliuotė, yra pritaikyta krūvininkų relaksacijos procesams registruoti aukšto sužadavimo sąlygomis. Ši metodika buvo pritaikyta Ože koeficiento įvertinimui didelės savitosios varžos germanyje.

Trečiajame skyriuje taip pat aptariami rekombinacijos parametų įvertinimo teoriniai modeliai, aprašyti krūvininkų rekombinacijos ir prilipimo procesų eksperimentiniai išskyrimo būdai. Čia aptarta rekombinacijos trukmės kaita aukšto sužadavimo sąlygomis bei esant dideliame giliųjų lygmenų tankiui. Pateikta metodika paviršinės rekombinacijos parametų įvertinimui iš rekombinacijos charakteristikų paskirstytųjų parametų sistemoje. Paviršinės rekombinacijos greitį galima įvertinti aprašant eksperimentines krūvininkų relaksacijos kinetikas teoriniu modeliu, analizuojant krūvininkų tankio profilio kitimus bandinio gylyje, matuojant rekombinacijos parametų priklausą nuo bandinio storio arba varijuojant nepusiausvirųjų krūvininkų pradinį pasiskirstymo profilį, keičiant žadinančiojo pluoštelio bangos ilgį. Paviršinės rekombinacijos principai šiame darbe buvo pritaikyti išskiriant rekombinacijos ypatumus plonuose įtempto Si sluoksniuose bei aprašyti rekombinacijai ant klasterių paviršių, susidariusių apšvitos hadronais metu.

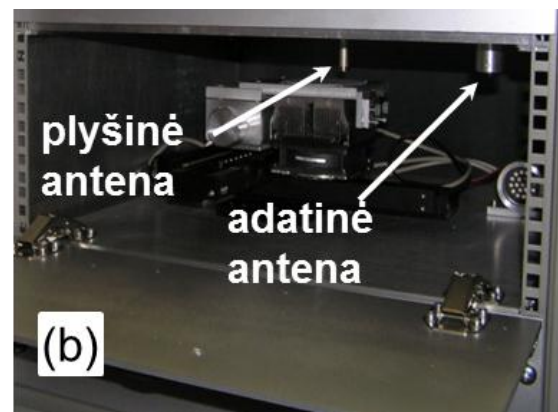
TMI laboratorijoje buvo sukonstruotas nešiojamas krūvininkų gyvavimo trukmės matuoklis VUTEG-3 (1 pav.), kurio veikimas paremtas mikrobangų atspindžio priklausą nuo nepusiausvirųjų krūvininkų tankio. Šiuo prietaisu galima vykdyti matavimus nuotoliniu būdu, todėl šio prietaiso zondai buvo įdiegti į tandeminio dalelių

greitintuvo apšvitos kamera, krūvininkų rekombinacijos trukmės kitimams apšvitos metu kontroliuoti.



1 pav. Nešiojamas rekombinacijos trukmės matuoklis VUTEG-3 skirtas *in situ* matavimams.

Taip pat sukurtas daugiavfunkcinis prietaisas VUTEG-4 (2 pav.) skirtas planarinei ir skersinei rekombinacijos trukmių žvalgai bandinyje, keičiant papildomo pašvietimo ir temperatūrinius režimus. Nepusiausvirųjų krūvininkų žadinimui yra pritaikytas mikrolustinis lazeris, kurio pluoštelio bangos ilgis 1062 nm ir impulso trukmė 500 ps. Šiame matuoklyje, priklausomai nuo matavimo režimo, yra naudojama plyšinė arba adatinė mikrobangų antena. Tiriamų bandinių pozicionavimui pritaikytas 3D motorizuotas staliukas bei instaliuota tiriamojo bandinio kontūrų atpažinimo sistema.

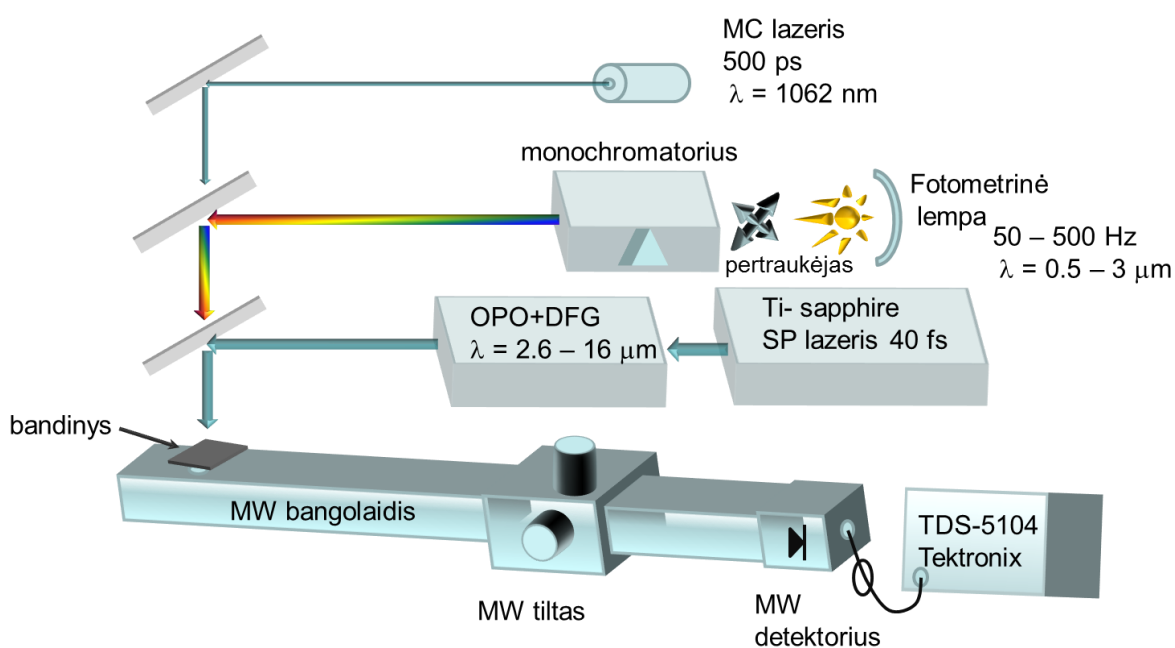


2 pav. Daugiavfunkcinis prietaisas planariniam ir skersiniam rekombinacijos trukmių pasiskirstymui matuoti.

IV-ame skyriuje aptarti nesąlytinės laike išskirtosios fotojonizacijos spektroskopijos, fotolaidumą zonduojant mikrobangomis, principai. Šis giliųjų lygmenų spektroskopijos metodas yra paremtas nesąlytiniu būdu mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų registravimu, kai nepusiausvirieji krūvininkai yra rezonansiškai sužadunami iš giliųjų lygmenų atitinkamos energijos šviesos kvantais. Fotolaidumo signalo amplitudė ir kitimai laike yra užrašomi taip:

$$U_{MW-PC}(t) = K(d, \mu, \kappa) * n_{ex}(t) = n_p \exp(-t/\tau_R) \quad (1)$$

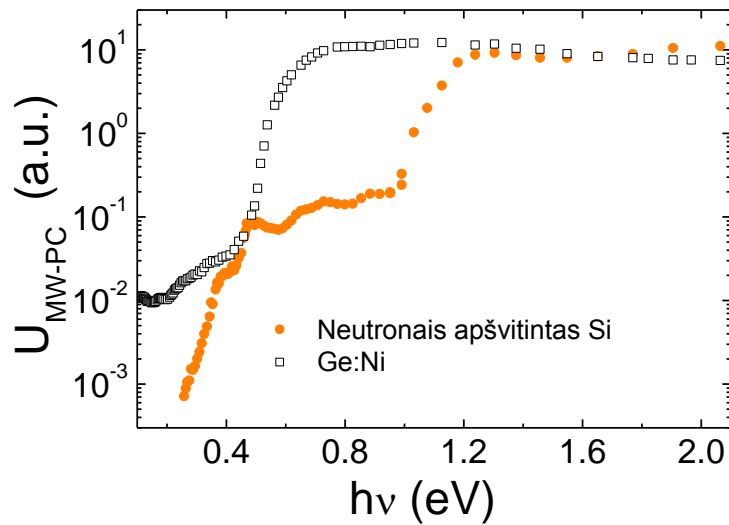
kur K – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo bandinio storio (d), medžiagos laidumo (μ) ir mikrobangų perdavimo funkcijos (κ). Atlikus kalibracinius matavimus ir suradus K vertę, pradiniu laiko momentu matuojamos kinetikos amplitudės vertė yra lygi sužadintų krūvininkų tankiui ($U_{MW-PC}(0)=n_p$). Savo ruožtu medžiagos sugerties koeficientas yra lygus sužadintų krūvininkų ir krintančių fotonų tankių santykiui ($\alpha = n_p/\Phi$). Keičiant sužadinimui naudojamo šviesos šaltinio bangos ilgį, yra galima nesąlytinė, mikrobangomis zonduojama fotojonizacijos spektroskopija, kurios schema yra pavaizduota 3 pav. Fotojonizacijos spektroskopija buvo įgyvendinta pasitelkiant kelis šviesos šaltinius: fotometrinę lempą, optinį parametrinį bei skirtuminių dažnių generatorius krūvininkų sužadinimui mažos sugerties srityje ir mikrolustinį 1062 nm bangos ilgio lazerį kalibraciniams matavimams atlikti, susiejant eksperimentines vertes su literatūroje žinomomis elektron-fotoninės sąveikos skerspjūvio vertėmis.



3 pav. Eksperimento struktūrinė schema fotolaidumo spektrinės priklausos tyrimui nesąlytiniu būdu.

Fotolaidumo kinetikos yra matuojamos nesąlytiniu būdu 22 GHz mikrobangų atspindžio režime. Matavimų sistemos jautrumui padidinti ir mikrobangų traktui suderinti yra naudojama plyšinė antena bei mikrobangų tiltas. Krūvininkų relaksacijos kinetikos yra registruojamos 1 GHz Tektronix TDS 5104 kompiuterizuotu oscilografu.

Šia metodika buvo ištirtos Si bei Ge medžiagos, kurių spektrai yra palyginti 4 pav. Skirtingų medžiagų fotojonizacijos spektruose (4 pav.) ryškiai išsiskiria tūrinės sugerties sritis, priklausanti nuo draustinių energijų tarpo. Germanyje sugerties kraštas yra ~ 0.65 eV, tuo tarpu silicyje sugerties kraštas prasideda nuo ~ 1.1 eV. Fotojonizacijos spektruose be krašto sugerties galima išskirti bestruktūrę savitojo laidumo sritį ($h\nu > E_g$) bei tūrinės sugerties sritį ($h\nu < E_g$), kuriai būdinga laiptelinė forma, sąlygota skirtingų lygmenų fotojonizacijos.



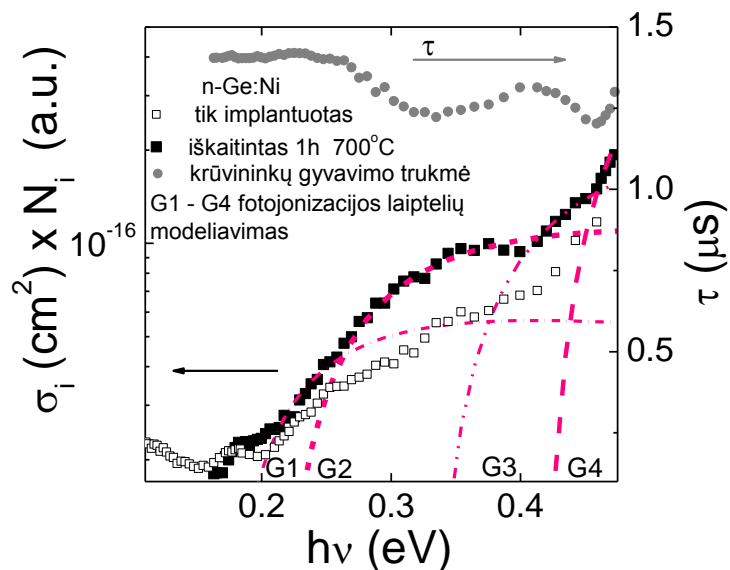
4 pav. Fotojonizacijos spektrai neutronais apšvitintame Si ir Ni implantuotame Ge.

Tūrinės sugerties srityje spektras yra laiptelių formos, atspindintis elektron-fotoninės sąveikos skerspjūvio spektrinę priklausą. Laipteliai šioje spektro dalyje yra sąlygoti skirtingų giliųjų lygmenų sugerties. Aktyvacijos energija, būdinga skirtingiems lygmenims, yra įvertinama pasitelkus Lucovsky'o modelį:

$$\sigma_i(h\nu) = AE_i^{1/2} (h\nu - E_i)^{3/2} / (h\nu)^3 \quad (2)$$

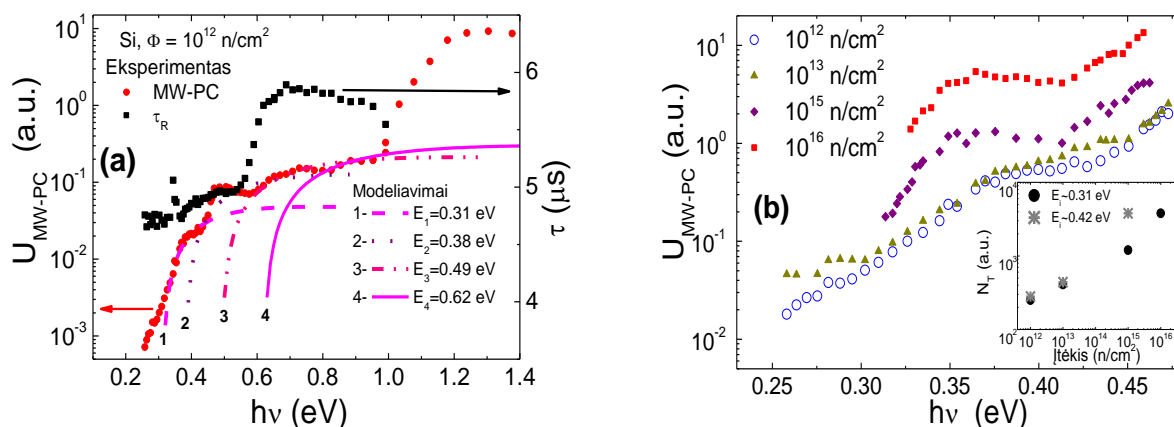
kur A yra laisvas daugiklis charakteringas kiekvienam lygmeniui. Šiame artinyje buvo sumodeliuoti laipteliai fotojonizacijos spektre ir įvertintos giliųjų lygmenų sugerties krašto energijos Ni implantuotame Ge, yra iliustruojami 5 pav. Kartu čia pateikti sinchroniškai išmatuoti krūvininkų rekombinacijos trukmės kitimai. Krūvininkų rekombinacijos trukmė priklauso nuo šiluminio greičio, gaudyklių tankio ir lygmeniui būdingo krūvininkų pagavimo skerspjūvio ($\tau_R = 1/(v_T\sigma_iN_i)$), kai tuo tarpu iš fotojonizacijos spektro galima išmatuoti lygmeniui būdingą elektron-fotoninės sąveikos skerspjūvį. Kartu analizuojant rekombinacijos trukmės ir fotojonizacijos laiptelių kitimus, galima įvertinti giliųjų lygmenų tankį, jų užpildą bei padėtį draustinių energijų tarpe.

Sukurta laike išskirtosios fotojonizacijos spektroskopijos metodika buvo panaudota giliųjų lygmenų, sukurtų silicyje apšvitos hadronais metu, charakterizavimui. Fotojonizacijos spektrai išmatuoti tik apšvitintose Si plokštelėse yra pavaizduoti 6 pav. Čia galima išskirti savitojo, sugerties krašto bei tūrinės sugerties sritis. Spektro dalyje, kai fotonų energija yra mažesnė už 0.8 eV, išskiriama laiptelinė spektro struktūra. Spektro laiptelius aproksimuojant Lucovsky modeliu buvo išskirti 4 lygmenys ir įvertintos jų aktyvacijos energijos.



5 pav. Fotojonizacijos spektrai bei sinchroniškai matuojami rekombinacijos trukmės kitimai. Giliųjų lygmenų fotojonizacijos spektro laipteliai, sumodeliuoti Lucovsky artinyje, ir fotojonizacijos raudonosios ribos energijos.

Neutronais apšvitintame Si įvertintos giliųjų lygmenų aktyvacijos energijos yra 0.31 ± 0.01 (1), 0.40 ± 0.02 (2), 0.51 ± 0.02 (3) ir 0.61 ± 0.02 eV (4). Šios vertės gerai dera su giliųjų lygmenų talpinės spektroskopijos (DLTS) bei šiluma skatinamųjų srovių (TSC) metodikomis surastomis vertėmis. Lygmuo, kurio aktyvacijos energija $E_C - 0.32$ eV yra priskirtinas VOH kompleksams, (2) $E_C - 0.42$ eV – di-vakansijai, (3) $E_C - 0.55$ eV (I – centrams, V_2O kompleksams) ir (4) $E_V + (0.55 - 0.66)$ eV (I – centrams, klasteriams).

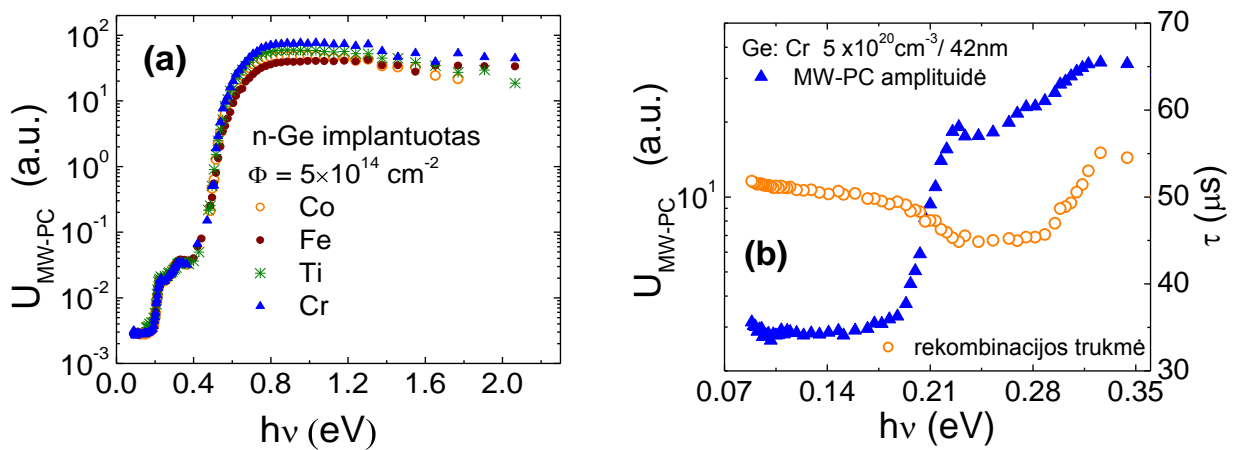


6 pav. Fotolaidumo amplitudės spektriniai kitimai neutronais apšvitintame MCz Si (a) ir fotojonizacijos spektrų kaita įvairiais neutronų įtekiais apšvitintame Si. Intarpe – skirtingų laiptelių amplitudžių kaita.

Didėjant neutronų įtekiui, laiptelių padėtis spektre, kaip matyti 6b pav., mažai keičiasi, bet didėja laiptelių aukštis, kuris yra proporcingas atitinkamų defektų tankiui. 6b pav. intarpe lyginama skirtingų defektų tankio kitimai nuo neutronų įtekio, ir

atskleista, kad skirtingų defektų įvedimo sparta, didėjant apšvitos įtėkiui, yra netiesinė. Vakansijoms priskirtini defektai, didėjant neutronų įtėkiui, jungiasi, sudarydami defektų aglomeratus. Tik apšvitintuose Si bandiniuose nepusiausvirųjų krūvininkų relaksacijos kinetikos yra vienkomponentės. Tai byloja, kad krūvininkų gyvavimo trukmė yra nulemta rekombinacijos per vieną dominuojantį centrą.

Fotojonizacijos spektrai, užregistruoti įvairiais metalais implantuoto Ge bandiniuose, yra pavaizduoti 7 pav., kur savitojo laidumo srityje spektrai sutampa bei galima išskirti tūrinės sugerties sritį.



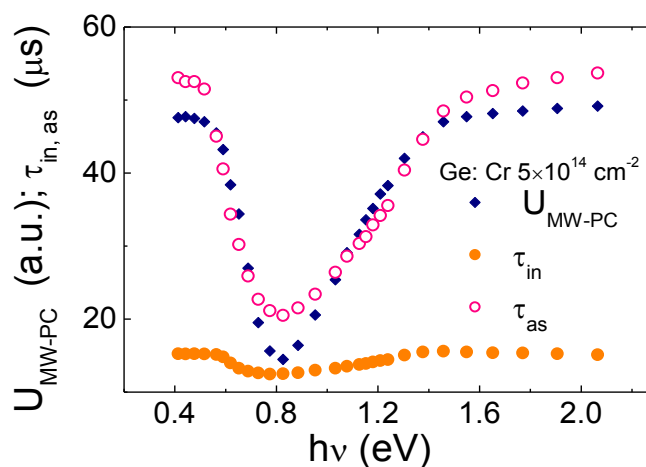
7 pav. Fotolaidumo amplitudės pradiniu laiko momentu kitimai tūrinio bei paviršinio sužadavimo atveju įvairiais metalais implantuotame Ge (a). Krūvininkų gyvavimo trukmės ir fotolaidumo amplitudės spektrinių kitimų koreliacija Cr implantuotame Ge.

Fotolaidumo kinetikos amplitudės ir krūvininkų gyvavimo trukmės spektriniai kitimai sinchroniškai išmatuoti Cr implantuotame Ge yra palyginti 7b pav. Čia matosi, jog gilieji lygmenys fotosužadavimo metu yra užpildyti plačiame spektro diapazone. Laipteliai rekombinacijos spektre, derantys su MW-PC kitimais, indikuoja aktyvius rekombinacijos kanalus. Analizuojant laiptelius, buvo išskirta iki 3 lygmenų. Įvairiais metalais implantuotuose Ge bandiniuose, fotojonizacijos spektroskopijos metodika įvertintos defektų aktyvacijos energijos yra palygintos 1 lentelėje su DLTS išmatuotomis vertėmis. Lygmenys, kurių aktyvacijos energija nepriklauso nuo implantuotų metalų rūšies, yra priskirtini technologiniams defektams, atsiradusiems metalų implantacijos arba kristalo auginimo metu.

Lentelė 1. Rekombinacinių centrų aktyvacijos energijos, įvertintos iš rekombinacijos trukmės priklausos nuo sužadavimo intensyvumo (ΔE_R), fotojonizacijos spektroskopijos (MW-PCS) ir giliųjų lygmenų talpine metodika (DLTS).

Implantas	$\Delta E_R = E_C - E_R$ (eV)	MW-PCS E_i (eV)	DLTS (eV)	
Fe	0.35	$E_1=0.175$, $E_2=0.250$, $E_3=0.385$	$E_V + 0.34$	$E_C - 0.27$ $E_C - 0.36$
Co	0.32	$E_1=0.10$, $E_2=0.18$, $E_3=0.23$	$E_V + 0.09$ $E_V + 0.25$	$E_C - 0.31$
Ti	0.39	$E_1=0.175$, $E_2=0.225$, $E_3=0.410$		$E_C - 0.22$
Cr	0.34	$E_1 = 0.179$, $E_2 = 0.20$, $E_3 = 0.22$, $E_4 = 0.365$	$E_V + 0.07$ $E_V + 0.12$	$E_C - 0.37$
Ni	0.34	$E_1 = 0.17$, $E_2 = 0.21$, $E_3 = 0.33$, $E_4 = 0.42$	$E_V + 0.22$ $E_V + 0.42$	$E_C - 0.16$ $E_C - 0.30$

Komplikuotas savitųjų ir technologinių defektų pasireiškimas sąlygoja sudėtingus rekombinacijos procesus metalais implantuotame germanyje. Pastaruosiuose bandiniuose buvo aptiktas fotolaidumo gesinimo reiškinys (PCQ), kai didinant stacionaraus pašvietimo intensyvumą, tiek medžiagos laidumas, tiek ir krūvininkų rekombinacijos trukmė mažėja. Visuose skirtingais metalais implantuotuose Ge bandiniuose PCQ pasireiškia gana plačiame papildomo pašvietimo spektre. Fotolaidumo spektriniai kitimai Cr implantuotame Ge yra pateikti 8 pav., kur galima įvertinti PCQ sąlygojančio lygmens aktyvacijos energiją.



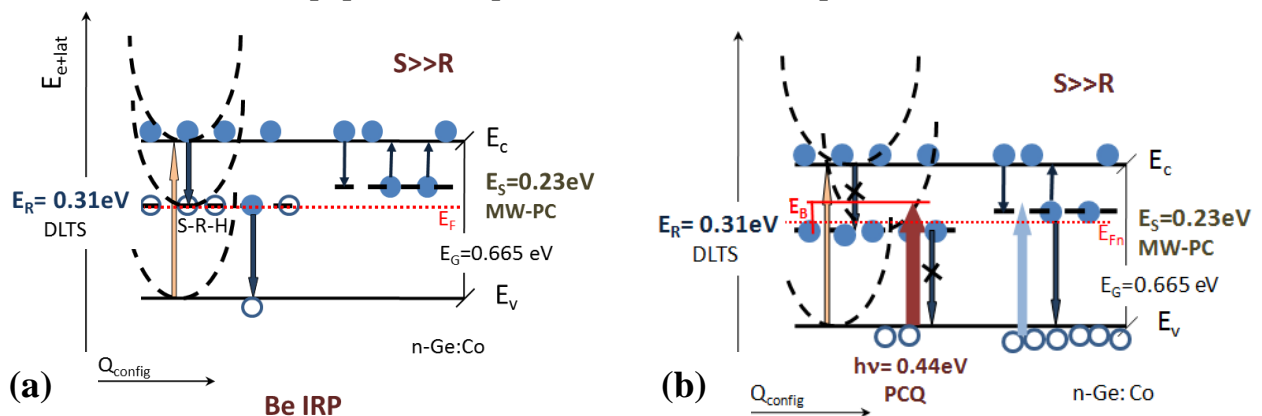
8 pav. Mikrobangomis zonduojamo impulsinio fotolaidumo kinetikos ir nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmių kitimai Cr implantuotame Ge, varijuojant stacionaraus papildomo pašvietimo spektrą.

Atlikus spektrinius fotolaidumo gesinimo matavimus iš skirtuminio PCQ spektro, pasitelkus Lucovsky modelį, įvertintas fotolaidumo gesinimą sąlygojantis lygmuo skirtingais metalais implantuotame Ge, kurių vertės pateiktos 2 lentelėje.

Lentelė 2. Metalais implantuotame Ge giliųjų lygmenų aktyvacijos energijos, įvertintos iš fotolaidumo gesinimo spektrinių kitimų.

Co	Fe	Ti	Cr
0.330 eV	0.530 eV	0.550 eV	0.465 eV
0.440 eV			0.545 eV

Apibendrinant fotojonizacijos bei fotolaidumo gesinimo spektrinius kitimus ir derinant įvertintas giliųjų lygmenų aktyvacijos energijas, buvo pasiūlytas dviejų konkuruojančių centrų modelis fotolaidumo gesinimui paaikškinti. Konfigūracinė diagrama ir juostų struktūra Co implantuotame Ge yra pateikta 9 pav., kur pavaizduoti elektronų šuoliai esant papildomam pašvietimui (IRP) ir be pašvietimo.

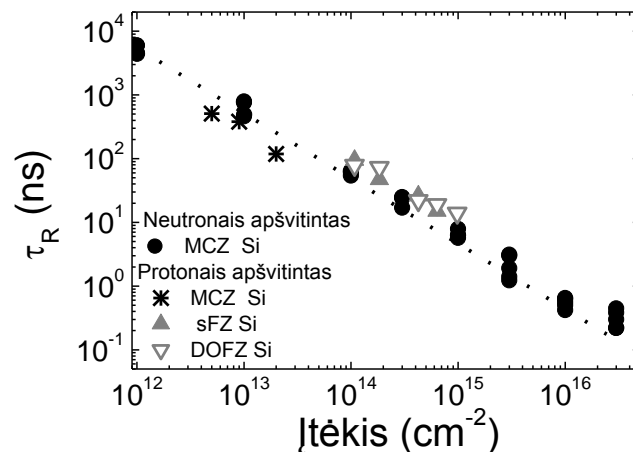


9 pav. Rekombinacijos srautai Co implantuotame Ge be (a) ir esant (b) papildomam stacionaram pašvietimui.

Be papildomo pašvietimo (9a pav.), „greitosios“ elektronų gaudyklės (S), kurioms būdinga elektronų ir skylių pagavimo skerspjūvio asimetrija, yra sparčiai užpildomos pagrindiniais krūvininkais, ir pasiekiamas pagavimo bei terminės emisijos srautų dinaminis balansas. S lygmenyje pagautiems elektronams yra didesnė tikimybė būti termiškai išmestiems į laidumo juostą, nei rekombinuoti, todėl be papildomo pašvietimo jis pasireiškia kaip pagrindinių krūvininkų prilipimo centras. Šio S lygmens aktyvacijos energija, įvertinta iš mikrobangomis zondojuojamo fotolaidumo spektrinių prieklausų yra 0.23 eV. Impulsiškai sužadintiems krūvininkams pagrindinis rekombinacijos kanalas yra R centras, kurio energetinė padėtis, įvertinta DLTS metodu, yra $E_R = 0.31$ eV bei patvirtinta MW-PC spektroskopiniais matavimais. Apšviečiant bandinį stacionaria infraraudonąja spinduliuote, į R rekombinacijos centrus optiškai yra sužadunami elektronai iš valentinės juostos (9b pav.) Dėl R centro užpildymo, jis menkai gaudo elektronus iš laidumo juostos, tuo pačiu dėl stacionaraus pašvietimo, skylių koncentracija valentinėje juostoje žymiai išauga. Todėl Fermi kvazilygmuo skylėms nusileidžia link valentinės juostos ir išauga S lygmens užpildymas skylėmis. Didėjant IRP intensyvumui, auga skylių koncentracija valentinėje juostoje, todėl atitinkamai

didėja rekombinacijos srautas per S rekombinacijos kanalą, kuris tampa dominuojančiu rekombinacijos centru.

V-ame skyriuje yra nagrinėjama krūvininkų gyvavimo trukmės silicyje kitimai priklausantys nuo apšvitinimo hadronais įtėkio. Rekombinacijos trukmių kaita buvo tirta įvairiais metodais, – Čochralskio metodu pridėjus magnetinį lauką (MCz), zoniniu lydymu (FZ) ir difuzijos būdu deguonimi prisotintame FZ metodu (DOFZ), užaugintuose Si kristaluose. Taip pat buvo ištirtos ir *pin* diodinės struktūros, tarnaujančios kaip standartiniai CERN dalelių detektoriai. Tirti bandiniai buvo apšvitinti 50 MeV – 24 GeV/c energijos protonais bei reaktoriaus, 1 MeV energijos ekvivalento, neutronais, kurių įtėkis variavo nuo 10^{12} iki 3×10^{16} cm^{-2} . Rekombinacijos trukmės prieklausa po Si padėklų apšvitos neutronais yra pavaizduota 10 pav. Vienkomponentės fotolaidumo, zonduojamo mikrobangomis, kinetikos indikuoja tūrinės rekombinacijos pasireiškimą visame įtėkių intervale bei dominuojantį vieną rekombinacijos centrą, kurio tankis yra proporcingas apšvitos įtėkiui. VUTEG-4 prietaisu buvo išmatuoti krūvininkų gyvavimo trukmės kitimai struktūrų storyje ir įvertinta, kad skvarbiaisiais hadronais apšvitintuose bandiniuose defektai yra pasiskirstę tolygiai bandinio storyje.

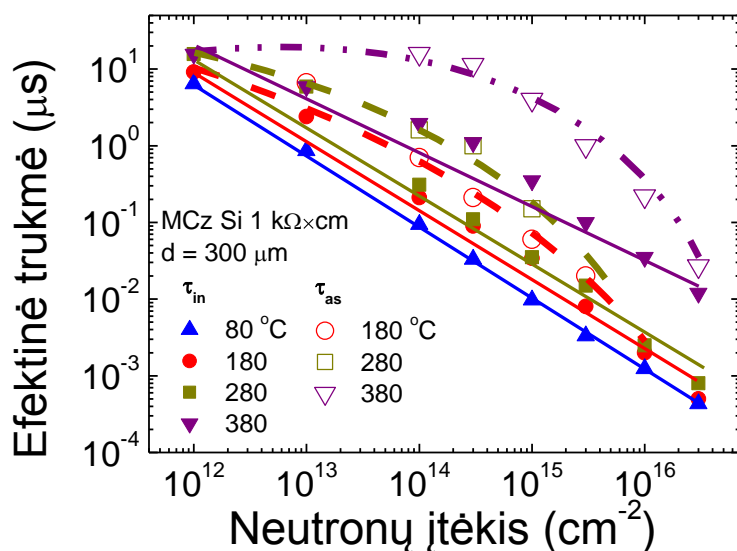


10 pav. Rekombinacijos trukmės Si struktūrose prieklausa nuo hadronų įtėkio.

Nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijos trukmės prieklausa nuo neutronų įtėkio, išmatuota MCz Si padėkluose ir detektorių struktūrose, yra artimos vertėms, gautoms FZ ir DOFZ Si dioduose, apšvitintuose protonais. Rekombinacijos trukmės Si struktūrose, apšvitintose skvarbiaisiais protonais ir neutronais, yra sąlygotos to paties tipo rekombinacinio centro ir nepriklauso nuo skvarbiųjų dalelių energijos bei kristalų auginimo būdų. Log-log skalėje rekombinacijos trukmė mažėja tiesiškai nuo hadronų įtėkio ir pasiekia sub-nanosekundines vertes esant $>10^{16}$ cm^{-2} įtėkiui. Toks gyvavimo trukmės kitimas yra būdingas krūvininkų rekombinacijai per vieną lygmenį su dideliu krūvininkų pagavimo skerspjūviu. Didelis krūvininkų pagavimo skerspjūvis yra būdingas klasterio tipo defektams.

Neutronais apšvitinti bandiniai buvo izochroniškai, po 24h, iškaitinami 80 – 380 °C temperatūrų intervale, keičiant iškaitinimo temperatūrą kas 100 °C. Po kiekvieno iškaitinimo žingsnio buvo matuojamos fotolaidumo kinetikos, iš kurių buvo įvertintos efektingos bei krūvininkų prilipimo/generacinės trukmės. Krūvininkų prilipimą

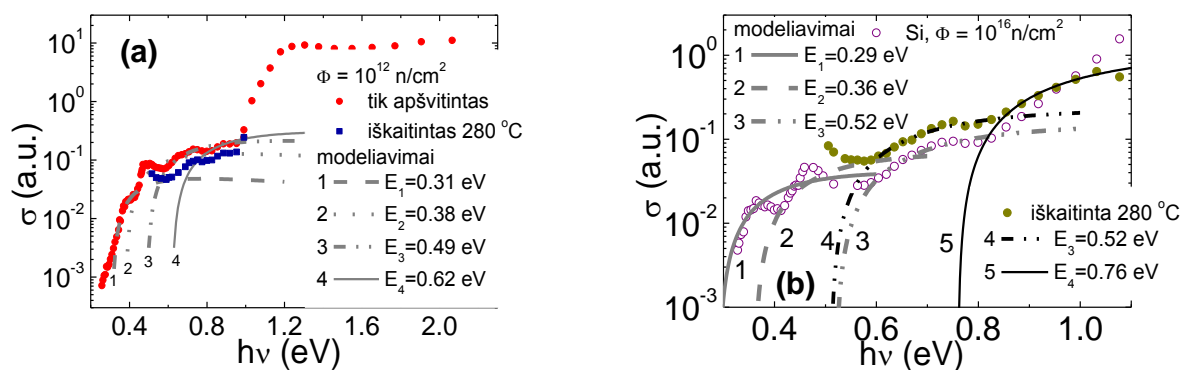
sąlygojančių centrų pasireiškimą, didėjant iškaitinimo temperatūrai, patvirtina dvikomponentės krūvininkų relaksacijos kinetikos, kurios indikuoja mažiausiai dviejų konkuruojančių centrų pasireiškimą. Efektinės krūvininkų gyvavimo trukmės, įvertintos iš pradinių ir asimptotinių krūvininkų relaksacijos kinetikos dalių, yra pavaizduotos 11 pav. Čia matosi, kad efektyvių trukmių priklausa nuo iškaitinimo temperatūros skiriasi įvairiais įtėkais apšvitintuose dariniuose.



11 pav. Krūvininkų rekombinacijos ir prilipimo trukmių priklausa nuo neutronų įtėkio esant skirtingai izochroninio iškaitinimo temperatūrai.

Esant 10^{12} cm^{-2} neutronų įtėkiui, nepriklausomai nuo iškaitinimo temperatūros, vyrauja vienkomentė krūvininkų relaksacija, tuo tarpu didėjant įtėkiui, ryškėja asimptotinė komponentė, rodanti sudėtingą taškinių defektų transformaciją, priklausančią nuo apšvitos įtėkio.

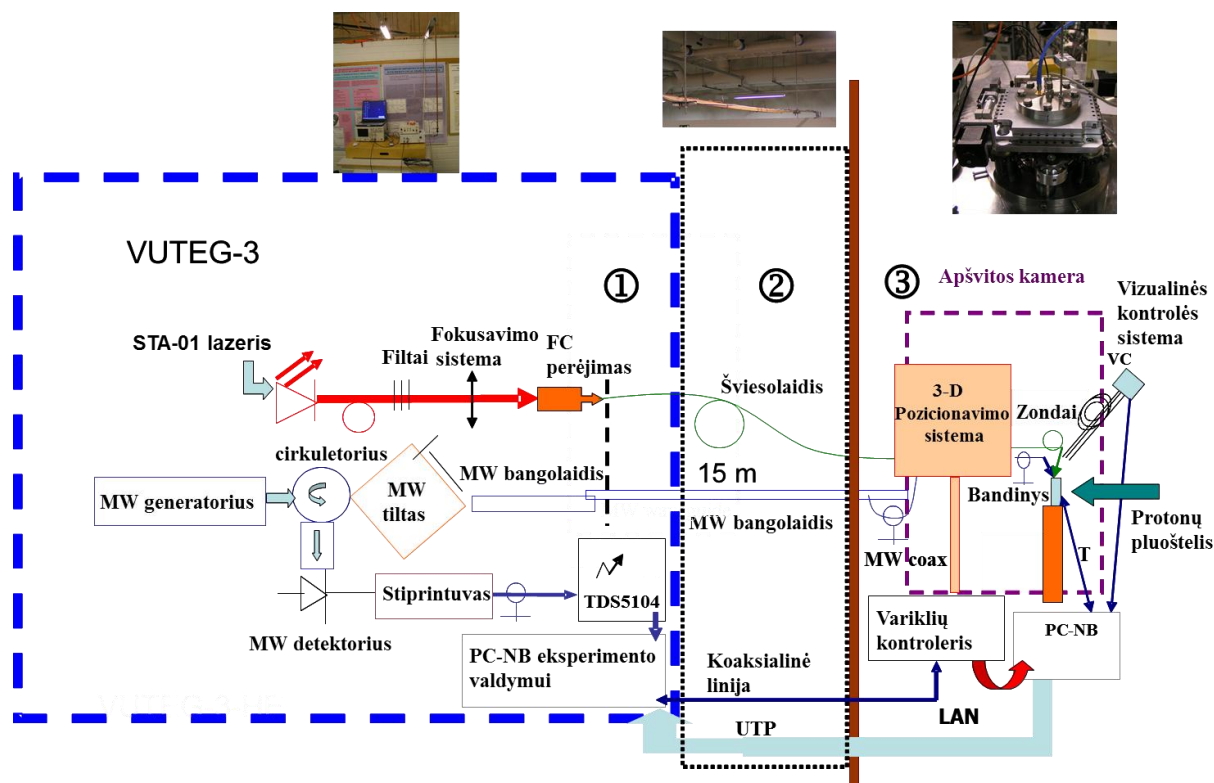
Radiacinių defektų parametrus įvertinti po izochroninio iškaitinimo buvo pasitelkta fotojonizacijos spektroskopija. Fotojonizacijos spektrai yra pateikti 12 pav. Po iškaitinimo giliųjų lygmenų tankis, bandiniuose apšvitintuose 10^{12} cm^{-2} neutronų įtėkiu, sumažėjo lyginant su prieš iškaitinimą buvusiu tankiu. Tuo tarpu bandiniuose, apšvitintuose 10^{16} cm^{-2} neutronų įtėkiu, po iškaitinimo centrų tankis išaugo.



12 pav. Fotojonizacijos spektrai prieš ir po izochroninio iškaitinimo 10^{12} cm^{-2} (a) ir 10^{16} cm^{-2} (b) neutronų įtėkais apšvitintame MCz Si.

Siekiant detaliau įvertinti gaudyklių, priskirtinų prilipimo centrams, aktyvacijos energijas po iškaitinimo, buvo išmatuota pradinės ir asimptotinės relaksacijos trukmių kitimai varijuojant bandinio temperatūrą. Generacinių lygmenų aktyvacijos energijos, įvertintos iš asimptotinės kinetikos dalies temperatūrinių kitimų, varijuoja nuo 0.17 iki 0.35 eV, priklausomai nuo apšvitos įtėkio. Tokia aktyvacijos energijos priklausoma rodo, kad dominuojantis centras, sąlygojantis prilipimą, priklauso nuo apšvitos įtėkio ir iškaitinimo temperatūros.

VI-ame skyriuje nagrinėjama radiacinių defektų kaita apšvitos skvarbiaisiais bei stabdomais protonais metu. Defektų evoliucijos apšvitos metu kontrolei buvo pasitelkta nesąlytinė mikrobangomis zondojuamo fotolaidumo metodika. Buvo matuojama krūvininkų gyvavimo trukmė apšvitos metu. Aptikta, kad krūvininkų gyvavimo trukmė yra atvirkščiai proporcinga defektų tankiui. *In situ* eksperimento sąranga yra pateikta 13 pav. Ši matavimų sąranga buvo įdiegta Helsinkio universiteto greitintuvų laboratorijoje bei Fizikinių ir technologinių mokslų centre Vilniuje.

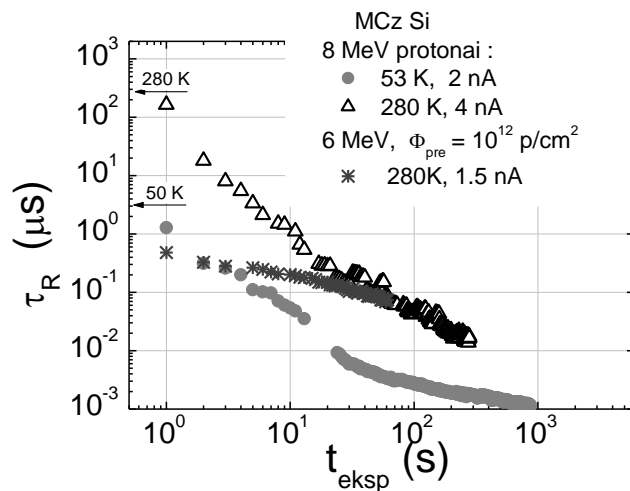


13 pav. Įranga fotolaidumo kinetikoms apšvitos metu registruoti.

Eksperimentų įrenginys buvo sudarytas iš matuoklio VUTEG-3, signalų perdavimo linijų ir zondų įvestų į apšvitos kamerą, kuriuos galima valdyti nuotoliniu būdu, apšvitos metu esant saugioje zonoje. Eksperimentas buvo kontroliuojamas nuotoliniu būdu esant saugioje zonoje už ~15 m nuo apšvitos kameros. Mikrobangų signalo perdavimui dideliu atstumu panaudotas mažo slopinimo stačiakampis bangolaidis. Prie apšvitos kameros, yra padaryta sąsaja tarp stačiakampio bangolaidžio ir koaksialinio trakto. Mikrobangos (MW) yra įvedamos į koaksialinį kabelį ir per vakuuminį MW perėjimą zondojuantysis signalas įvedimas į apšvitos kamerą. Nepusiausvirųjų krūvininkų sužadinimui pasitelkiamas 1062 nm bangos ilgio, 500 ps impulso trukmės lazerinis pluoštelis arba

antros harmonikos 531 nm spinduliuotė krūvininkų sužadanimui priepaviršiniame sluoksnyje. Lazerio pluoštelis iki bandinio, esančio apšvitos kameroje, perduodamas šviesolaidžiu. Kinetikos apšvitos metu yra registruojamos kas 10 milisekundžių 1 GHz Agilent Technologies DSO6102A oscilografu, ir duomenys persiunčiami į kompiuterį. Tiriamas bandinys yra įtaisomas ant kontroliuojamos temperatūros padėklo, kur temperatūrą galima patikimai stabilizuoti 40 – 300 K intervale.

MCz Si plokštelės, pasyvuotos terminiu oksidu, buvo apšvitintos 2 – 9 MeV energijos protonų pluošteliu įvairiose temperatūrose. Tūrinė krūvininkų rekombinacijos trukmė apšvitos metu buvo įvertinta iš pradinės nepusiausvirųjų krūvininkų kinetikos dalies, kai paviršinės rekombinacijos įtaka, gerai pasyvuotuose bandiniuose, yra neženkli. Rekombinacijos trukmių kaita nuo apšvitos protonais ekspozicijos yra pavaizduota 14 pav. *In situ* išmatuotų rekombinacijos trukmių kaita silicyje priklauso nuo prieš apšvitinimą medžiagoje esančių defektų tankio ir bandinio temperatūros apšvitos metu. Krūvininkų gyvavimo trukmės prieklausoje nuo apšvitos ekspozicijos galima išskirti du polinkius, kurie indikuoja krūvininkų pagavimo skerspjūvio kitimus, priklausančius nuo apšvitos įtekio, kai defektų tankis yra proporcingas ekspozicijos trukmei.



14 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės MCz Si plokštelėse kaita apšvitos protonais metu.

Tikslesni rekombinacijos trukmės nuo ekspozicijos matavimai buvo atlikti varijuojant 8 MeV energijos protonų pluoštelio srovę, siekiant įvertinti rekombinacijos trukmės pokyčius plačiose protonų įteklių ribose, kaip pavaizduota 15 pav. Gauti du polinkiai ekspozicijos kreivėse. Rekombinacijos trukmių ekspozicinių kitimų spartos paaiškinimui yra pasiūlytas modelis, apibūdinantis klasterio susidarymo ir jo parametrų įtaką krūvininkų rekombinacijai apšvitos metu. Rekombinacijos trukmė dėl krūvininkų rekombinacijos ant klasterio priklauso nuo terminio krūvininkų greičio (v_T), klasterį supančios Cottrell'io sferos skerspjūvio (σ_{cl}), defektų tankio bandinyje prieš apšvitą ($N_{cl,0}$) ir apšvitos metu sukurtų klasterių tankio ($N_{cl}(\Phi)$) ir išreiškiama taip:

$$\tau_{R,cluster} = \frac{1}{v_T \sigma_{cl} N_{cl}} = \frac{1}{v_T \sigma_{cl}(\Phi)(N_{cl,0} + N_{cl}(\Phi))} \quad (1)$$

Laikoma, kad krūvininkų gaudymo skerspjūvis σ_{cl} priklauso nuo apšvitos įtekio

$$\sigma_{cl} = \sigma_0 \exp(eV_{b,cl} / kT) \quad (2)$$

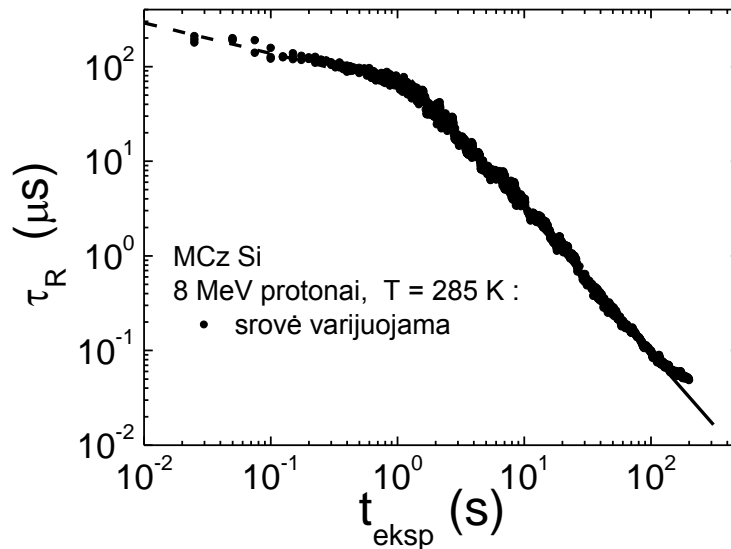
kur barjerinis potencialas aplink klasterį dėl apšvitos įtekio kinta taip:

$$\langle V_{b,cl}(\Phi) \rangle = \frac{kTc}{e} \ln \left[\frac{N_D}{n_i^2} \left(\sum_{n=1}^{V_n} N_A V_n \right) \right] \Big|_{N_A \sim \Phi} = \frac{kTc}{e} \ln \left[\frac{N_D}{n_i^2} \left(\sum_{n=1}^{V_n} \frac{\partial N_{A,n}}{\partial \Phi} \Phi \right) \right]. \quad (3)$$

Priimama, kad klasterių tankis ir krūvininkų pagavimo klasteriais skerspjūvis priklauso nuo klasterių įvedimo spartos – $\partial N / \partial \Phi$. Švartuose bandiniuose krūvininkų rekombinacijos trukmės priklauso nuo įtekio išreiškama kaip :

$$\tau_{R,cluster} = \frac{1}{v_T \sigma_{cl} (N_{cl,0} + N_{cl}(\Phi))} = \frac{1}{v_T \sigma_0 \exp \left(\ln \left[\frac{N_D}{n_i^2} \sum_{n=1}^{V_n} \frac{\partial N_{A,n}}{\partial \Phi} \Phi \right]^c \right) \left(N_{cl,0} + \frac{\partial N_{cl}(\Phi)}{\partial \Phi} \Phi \right)} \quad (4)$$

$$\cong \frac{1}{v_T \sigma_0 \left[\frac{N_D}{n_i^2} \sum_{n=1}^{V_n} \frac{\partial N_{A,n}}{\partial \Phi} \Phi \right]^c \left(N_{cl,0} + \frac{\partial N_{cl}(\Phi)}{\partial \Phi} \Phi \right)} \propto \frac{1}{a\Phi^c + b\Phi^{c+1}}$$



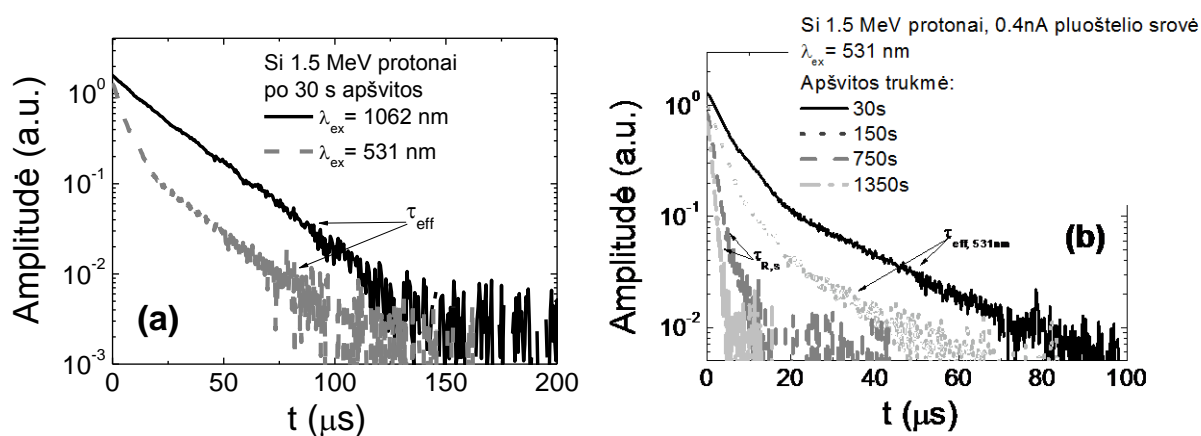
15 pav. Krūvininkų rekombinacijos trukmės kaita MCz Si apšvitos 8 MeV energijos protonais metu 285 K temperatūroje .

Apšvitos pradžioje, kol radiacinių defektų tankis yra sulyginamas su esamu kristalo augimo defektų tankiu, rekombinacijos trukmės kitimas nuo apšvitinimo ekspozicijos (trukmės) yra artimas tiesiniam (τ_R kitimų spartos log-log skalėje polinkis yra artimas vienetui). Didėjant ekspozicijos trukmei, sukurtų apšvitos metu defektų tankiui viršijant defektų tankį prieš apšvitą ($N_{cl,0}$), pradeda vyrauti priklauso nuo klasterių įvedimo spartos ir polinkis pasikeičia, kaip matyti 15 pav.

Apšvitos hadronais metu dalelių kelyje yra sukuriama nanometrinių matmenų klasterių pėdsakai, kurių paviršius charakterizuojamas paviršinės rekombinacijos sparta s . Rekombinacijos trukmės kaitai apšvitos metu aprašyti alternatyviai buvo taikomas paviršinės rekombinacijos ant klasterių paviršiaus modelis. Laikoma, kad atstumas tarp kaimyninių klasterių (L) priklauso nuo jų tankio, kuris yra proporcingas ekspozicijos

trukmei. Tokiu atveju L yra atvirkščiai proporcingas apšvitos trukmei. Efektinė rekombinacijos trukmė priklauso nuo tūrinės rekombinacijos tarpklasterinėje srityje bei rekombinacijos klasterių paviršiuje. Daroma prielaida, kad klasteriai yra pasiskirstę homogeniškai visoje apšvitintoje bandinio srityje. Paviršinės rekombinacijos trukmė yra išreiškiama taip $\tau_{s,l} = L/s + L^2/\pi^2 D$. Esant dideliui atstumui tarp klasterių, vyrauja difuzijos ribota paviršinė rekombinacija, kurios įtaka mažėja kartu su atstumu tarp klasterių ir pasireiškia paviršinės rekombinacijos ant klasterių paviršiaus įtaka. Varijuojant paviršinės rekombinacijos greitį ir priimant, kad difuzijos koeficientas priklauso nuo temperatūros, šiuo modeliu buvo aproksimuoti eksperimentiniai rezultatai, gauti esant skirtingai bandinio temperatūrai apšvitos metu bei pradiniam klasterių tankiams. Įvertintas paviršinės rekombinacijos greitis yra $\sim 10^5$ cm/s.

Skirtingai nuo skvarbiųjų hadronų, mažos energijos protonai yra sustabdomi medžiagoje, ir savo kelyje sukuria radiacinius defektus, kurių didžiausias tankis yra stabdymo siekyje. 1.5 MeV energijos protonai į Si įsiskverbia apie 40 μm sukurdami stabdymo kelyje nehomogenišką defektų pasiskirstymą, kurių didžiausias tankis stabdymo siekyje yra išplitęs ~ 10 μm . Defektų tankio evoliucijos apšvitos metu analizei buvo pasitelkta nesąlytinė krūvininkų gyvavimo trukmės matavimo metodika, kai nepusiausvirieji krūvininkai yra žadinami 531 nm bangos ilgio lazeriniu pluošteliu, kurio įsiskverbimo gylis silicyje yra apie 1 μm . Apšvita protonais buvo periodiškai sustabdoma ir išmatuojamos relaksacijos kinetikos tūrinio sužadavimo atveju ($\lambda_{\text{ex}} = 1062$ nm). Nepusiausvirųjų krūvininkų relaksacijos kinetikų kaita apšvitos metu yra iliustruojama 16 pav., kur palyginamos kinetikos tūrinio bei paviršinio žadinimo atvejais.

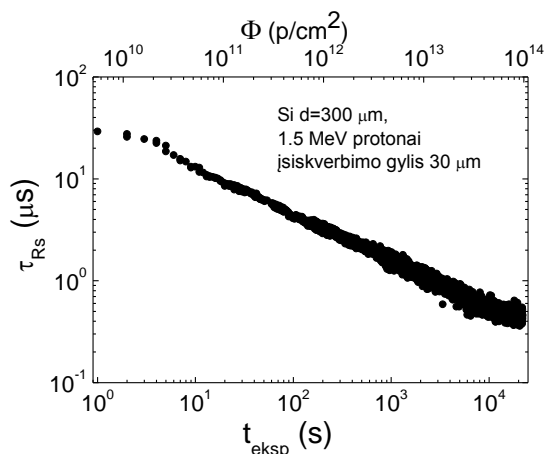


16 pav. Fotolaidumo kinetikų palyginimas tūrinio ir paviršinio sužadavimo atvejais (a). (b) – kinetikų kaita apšvitos 1.5 MeV energijos protonais metu paviršinio sužadavimo atveju.

Paviršinio sužadavimo atveju kinetikos yra dvisandės, kaip matyti 16a pav, sąlygotos paviršinės rekombinacijos. Didėjant ekspozicijos trukmei paviršinės rekombinacijos pagrindinės modos amplitudė mažėja (16b pav.), indikuojanti paviršinės rekombinacijos greičio padidėjimą dėl sukurtų defektų priepaviršiniame sluoksnyje. Toliau didėjant ekspozicijai, kinetika tampa vienkomponentė ($t_{\text{eksp}} > 1000$ s). Tai indikuoja, kad formuojasi dvisluoksnė struktūra su dideliu defektų tankiu paviršiniame sluoksnyje.

Krūvininkų rekombinacijos trukmė ($\tau_{R,s}$), įvertinta iš pradinio krūvininkų tankio relaksacijos sando, matuojant paviršinio sužadavimo režime, iliustruojama 17 pav., kaip $\tau_{R,s}$ priklausa nuo ekspozicijos trukmės, proporcingos protonų įtekui. Plačioje

ekspozicijų skalėje ($t_{eksp} = 10 - 20000$ s) rekombinacijos trukmės priklausa nuo įtėkio yra subtiesinė, aprašoma dėsnium $\tau_{Rs} \sim \Phi^{-1/2}$.



17 pav. Rekombinacijos trukmės kaita, apšvitos 1.5 MeV energijos protonais metu, įvertinta paviršinio sužadavimo režime.

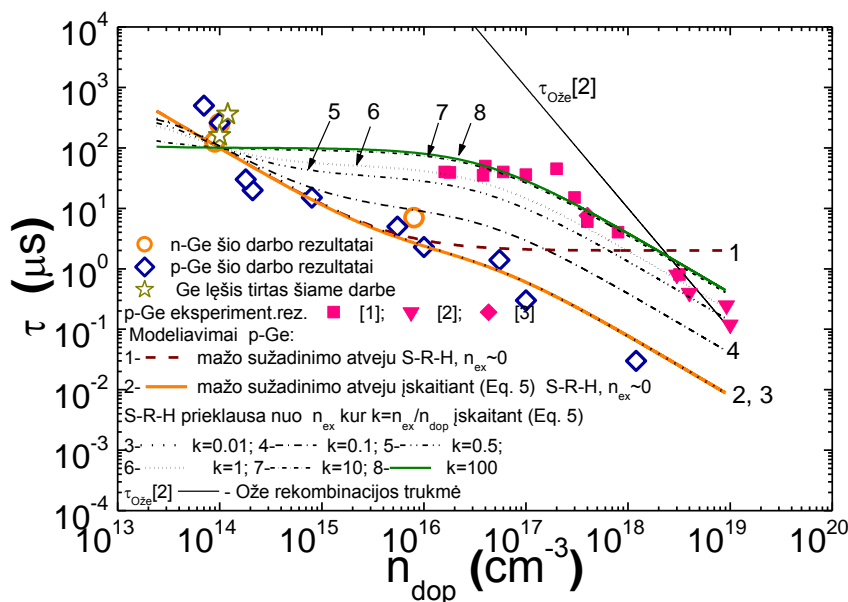
Defektai stabdomų protonų įsiskverbimo gylyje yra pasiskirstę netolygiai, todėl efektinė rekombinacijos trukmė atspindi vidutinę reikšmę žadinančio pluoštelio įsiskverbimo gylyje. Didėjant apšvitos protonais trukmei, tuo pačiu ir protonų įtėkiui, atstumas tarp defektų (L) mažėja ir apšvitos metu formuojasi dvisluoksnė struktūra su staigia defektų riba protonų siekyje, sąlygoja rekombinacijos trukmės priklausą – $\tau_{Rs} \sim 1/N_{cl} \sim L^2 \sim \Phi^{-1/2}$

VII-ame skyriuje pateikta legiravimo, metalų implantacijos ir apšvitos įtaka krūvininkų rekombinacijos parametrms Ge struktūrose. Taip pat aptariamos rekombinacijos charakteristikos plonose Si-Ge struktūrose, įvertintos nesąlytinais metodais.

Krūvininkų gyvavimo trukmės germanyje priklauso nuo kristalo auginimo technologijos. Ilgiausia efektinė rekombinacijos trukmė, siekianti 2 ms, yra didelės varžos FZ būdu užaugintame Ge kristale. Tirtų Cz metodu auginuose Ge kristaluose krūvininkų gyvavimo trukmė kinta 200 – 300 μs intervale sąlyginai grynose, didelės savitosios varžos medžiagose, tuo tarpu didelio laidumo bandiniuose krūvininkai rekombinuoja per keliasdešimt nanosekundžių.

Tūrinė rekombinacijos trukmė yra atvirkščiai proporcinga legirantų koncentracijai bei priklauso nuo nepusiausvirųjų krūvininkų tankio. Didinant žadinimo intensyvumą, krūvininkų efektinė gyvavimo trukmė didėja. Tokia priklausą pasireiškia kai nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija pasiekia arba viršija tam tikrą rekombinacijos centrų koncentraciją M . Krūvininkų rekombinacijos efektnių trukmių priklausą nuo legirantų koncentracijos yra pavaizduota 18 pav. ir palyginta su vertėmis, pateiktomis literatūroje. Gyvavimo trukmės kitimai nuo injekcijos lygio buvo modeliuojami remiantis Šoklio-Rydo-Holo rekombinacijos artiniu, siekiant suderinti mūsų eksperimento rezultatus su vertėmis pateiktomis literatūroje. Injekcijos lygis buvo laikomas pastoviu vienos kreivės skaičiavimuose, kintant legirantų koncentracijai, ir tai užduodama tiesiniu nepusiausvirųjų krūvininkų ir legiranto koncentracijos sąryšiu. Rekombinacijos trukmės mažo laidumo medžiagose buvo išmatuotos prie mažiausio

galimo sužadavimo bei, siekiant išvengti prilipimo reiškinio, buvo naudojamas papildomas pašvietimas. Didelio laidumo bandiniai buvo žadinami intensyvesne spinduliuote, kad sužadintų nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija būtų pakankama fotolaidumo pasireiškimui, kai yra žymi mikrobangų sugertis pusiausviraisiais krūvininkais.



18 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausa nuo pusiausvirųjų krūvininkų koncentracijos n ir p laidumo germanyje. Tuščiaviduriais apskritimais, rombais ir žvaigždute pateikti mūsų išmatuoti dydžiai, pilnaviduriai simboliai – pateikti literatūroje. (1,2) kreivės atitinka S-R-H modeliu apskaičiuotų verčių kitimą, esant mažam sužadimui. (3-8) kreivės iliustruoja krūvininkų gyvavimo trukmės priklausą nuo sužadavimo intensyvumo.

[1] A.A. Kopylov, and A.N. Pikhtin, Sov. Phys. Semicond. **10** (1976) 7, [2] K. Huang, and A. Rhys, Proc. RSA **204** (1950) 406, [3] A. Dargys, J. Kundrotas, *Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP* (Science and Encyclopedia Publishers, Vilnius, 1994).

Krūvininkų gyvavimo trukmių priklausa nuo legirantų koncentracijos kiekybiškai sutampa su teoriniais $\tau_{S-R-H} = f(n_{dop})$ tik kol legirantų koncentracija neviršija $n_{dop} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Didėjant legirantų koncentracijai daugėja ir rekombinacijos centrų, todėl, pradedant kritine legirantų koncentracija, kuri šiuo atveju yra $n_{kr} = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, krūvininkų gyvavimo trukmė mažėja didėjant legirantų tankiui. Tokia krūvininkų gyvavimo trukmės priklausa nuo legirantų koncentracijos gali būti apytikriai išreiškiama (5) sąryšiu:

$$\tau_R = \tau_{S-R-H} / (1 + n_{dop} / n_{thr}) . \quad (5)$$

Šoklio-Rydo-Holo artiniu apskaičiuota krūvininkų gyvavimo trukmės priklausa nuo legirantų koncentracijos, esant mažam sužadimui, atitinka 1 kreivę 18 pav., antra kreivė apskaičiuota įskaitant (5) priklausą – rekombinacijos centrų gausėjimą, didėjant legirantų koncentracijai. Kreivės 3 – 8 iliustruoja krūvininkų gyvavimo trukmės kitimą didėjant legirantų koncentracijai, įskaitant (5) priklausą ir keičiant nepusiausvirųjų krūvininkų tankį legirantų koncentracijos atžvilgiu taip: $n_{ex} = k \cdot n_{dop}$. Didinat injekcijos lygį, nusakomą proporcingumo koeficientu k , ir varijuojant pastarąjį parametą režiuose

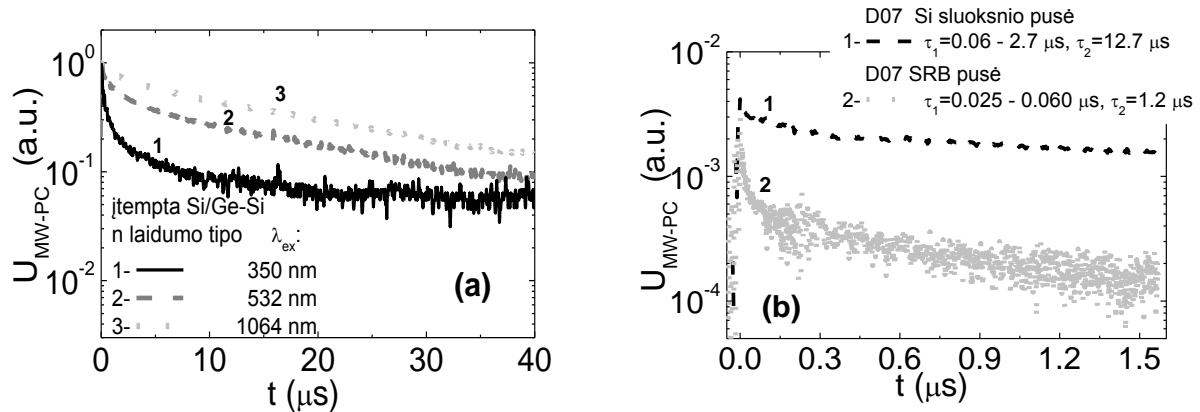
$k = 10 - 100$, apskaičiuota krūvininkų gyvavimo trukmės prieklausa nuo legirantų koncentracijos kiekybiškai sutampa su rezultatais, pateiktais literatūroje. Ože rekombinacijos įtaka krūvininkų gyvavimo trukmei, tirtame legirantų koncentracijos bei sužadavimo intensyvumų intervale, yra nežymi, kadangi Ože rekombinacijos koeficientas yra daug mažesnis už $10^{-30} \text{ cm}^{-6}/\text{s}$.

Elektroninio laidumo germanio bandiniai, implantuoti įvairiais metalais buvo ištirti nenuostoviosios mikrobangų sugerties metodika, nepusiausvirųjų krūvininkų žadinimui naudojant kietakūnio lazerio 1062 nm bangos ilgio spinduliuotę. Buvo ištirti dviem skirtingomis dozėmis ($5 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) ir skirtingais metalais implantuoti bandiniai. Aptikta, kad trumpiausios krūvininkų gyvavimo trukmės buvo gautos bandiniuose, implantuotuose kobaltu, o chromu ir nikeliu implantuotuose bandiniuose krūvininkų gyvavimo trukmė tik nežymiai skiriasi nuo išėties bandiniuose išmatuotų trukmių. Metalais implantuotame Ge krūvininkų gyvavimo trukmės didėja augant sužadavimo intensyvumui. Krūvininkų gyvavimo trukmių, išmatuotų didelio ir mažo sužadavimo sąlygomis, santykis yra proporcingas skylių ir elektronų pagavimo skerspjuvių santykiui. Iš pastarojo santykio buvo įvertinta, kad į germanį implantuoti metalai sukuria akceptorinius lygmenis.

Šiame darbe buvo ištirti seklių sandūrų metalizuoti ir nemetalizuoti sSi-SiGeSRB-Si diodiniai dariniai, sudaryti iš 8 nm storio įtempto silicio (sSi) sluoksnio, 300 arba 400 nm storio $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$ buferinio (SRB) sluoksnio, kurie buvo užauginti ant 600 μm Čochralskio metodu užauginto Si padėklo. Papildomam, buferinių sandarų parametru įvertinimui, buvo ištirti nemetalizuoti dariniai, kuriuose nebuvo viršutinio sSi sluoksnio.

Nepusiausvirieji krūvininkai skirtingose struktūrose buvo sužadami įvairiuose gyliuose bei varijuojant sužadavimo intensyvumą – žadinant 1064 nm bangos ilgio spinduliuote. Tūrinė rekombinacija dominavo Si padėkle žadinant 1064 nm bangos ilgio spinduliuote; 532 nm spinduliuote krūvininkai sužadami apie 1 μm gylyje; tuo tarpu 355 nm (UV) spinduliuotė į medžiagą įsiskverbia apie 100 nm.

MW-PC kinetika 250/350 nm SRB storio p⁺/n bandiniuose yra iliustruojama 19a pav. Žadinant 532 ir 355 nm bangos ilgio spinduliuote kinetikos yra dvikomponentės, tuo tarpu tūrinio sužadavimo metu kinetika yra vienkomentė arba asimptotinė dedamoji yra nežymi (19a pav.). Asimptotinė dedamoji, atitinkanti paviršinę rekombinaciją n-laidumo tipo bandiniuose, yra beveik vienoda tiek tūrinio sužadavimo (1064 nm), tiek ir priepaviršinės foto-injekcijos (532 nm) atvejais. Kai krūvininkai yra sužadami paviršiniame SRB-Si sluoksnyje (355 nm), krūvininkų relaksacijos kinetika įgyja hiperbolinę formą (19a pav.) bei asimptotinės relaksacijos sparta žymiai skiriasi nuo tūrinio sužadavimo. Iš krūvininkų relaksacijos kinetikų nustatyta, kad rekombinacijos greitis priklauso nuo laidumo tipo: p-tipo bandiniuose krūvininkai rekombinuoja lėčiau, negu n-tipo medžiagose. Tai sietina su nepagrindinių krūvininkų rekombinacija ir judriu.

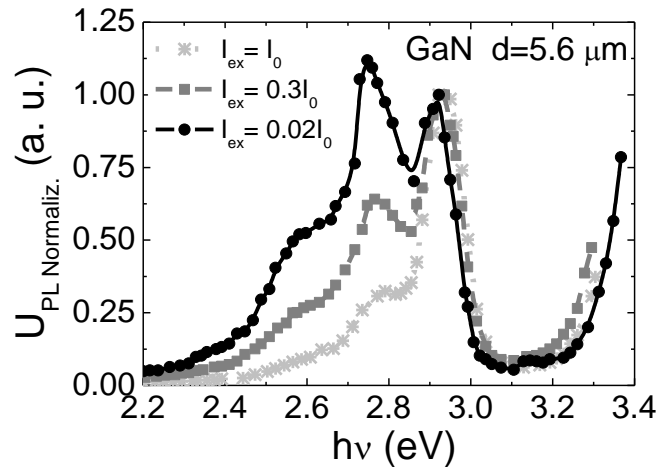


19 pav. Fotolaidumo kinetikos daugiasluoksnėse sSi-SiGe-Si struktūrose žadinant skirtingais bangos ilgiais (a). MW-PC kinetikos SRB sluoksnyje ir Si padėkle nepusiausvuruosius krūvininkus žadinant 355 nm bangos ilgio lazerine spinduliuote (b).

Nemetalizuotuose dariniuose krūvininkų rekombinacijos kinetikos, išmatuotos Si padėkle (1 kinetika - D07 bandinyje) ir buferiniame sluoksnyje (2 kinetika), esant UV sužadimui, ryškiai skiriasi (19b pav.). MW-PC kinetikoms, išmatuotoms SRB sluoksnyje, būdinga hiperbolinė forma, kuri indikuoja ištęstosios eksponentės modeliu aprašomus relaksacinius procesus, sąlygotus netvarkios struktūros. Nepusiausvirųjų krūvininkų relaksacijos pobūdis priklauso nuo žadinimo UV spinduliuote intensyvumo. Pradinė MW-PC kinetikos komponentė trumpėja, didėjant sužadimo intensyvumui, o asimptotinė dalis ilgėja. Tuo tarpu Si padėklo pusėje kinetikų pobūdis nepriklauso nuo sužadimo intensyvumo. Tokią krūvininkų relaksaciją SRB sluoksnyje sąlygoja difuzijos ribotas krūvininkų prilipimas netvarkioje struktūroje. Asimptotinę krūvininkų relaksacijos komponentę sąlygoja daugkartinis krūvininkų pagavimas gaudyklėse, priskirtinose siūlinėms dislokacijoms.

VIII-ame skyriuje pateikta būdingųjų dydžių kaita GaN, priklausanti nuo apšvitos hadronais bei sluoksnių auginimo technologinių režimų.

Krūvininkų relaksacijos procesai GaN buvo ištirti vienu metu registruojant fotolaidumo, zondojuojamo mikrobangomis, ir fotoluminescencijos (PL) kinetikas skirtingose liuminescencijos spektro srityse. Šia eksperimentų sąranga leidžia vienu metu įvertinti krūvininkų rekombinacijos procesus tiek per spindulinius, tiek ir per nespindulinius kanalus. MW-PC ir PL signalai yra sinchroniškai matuojami, registruojant signalus iš tos pačios bandinio srities, sužadintos 354 nm bangos ilgio, 500 ps impulso trukmės lazerio pluoštelio. Tai svarbu, kai netvarkaus darinio struktūra gali kisti plokštumoje. Fotoluminescencijos spektrai GaN, keičiant sužadimo intensyvumą, yra pavaizduoti 20 pav. Fotoluminescencijos intensyvumas čia buvo matuojamas registruojant fotoluminescencijos kinetikos amplitudinę vertę.

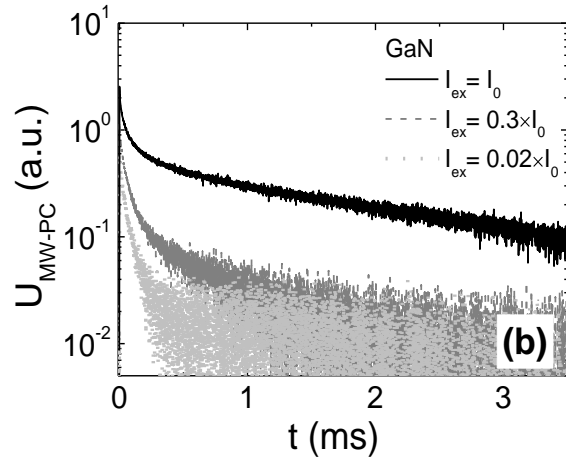
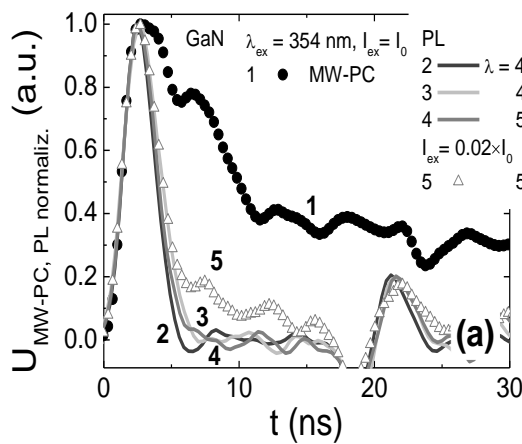


20 pav. Fotoluminescencijos kinetikos amplitudės spektrinė kaita epitaksiniame GaN esant skirtingam sužadinimo intensyvumui.

Spektre galima išskirti eksitoninę liuminescencijos juostą ties $h\nu > 3.2$ eV (UV-PL), mėlynąją juostą: $2.5 < h\nu < 3.0$ eV (B-PL) ir geltonąją liuminescencijos juostą: $h\nu < 2.4$ eV (Y-PL). Varijuojant sužadinimo intensyvumą, GaN fotoluminescencijos spektre UV-PL smailės amplitudė yra proporcinga sužadinimo intensyvumui, tuo tarpu santykinis Y-PL juostos intensyvumas didėja, mažėjant sužadinimui. Tokia Y-PL eiga indikuoja, kad ši liuminescencijos juosta sietina su krūvininkų prilipimo centrais.

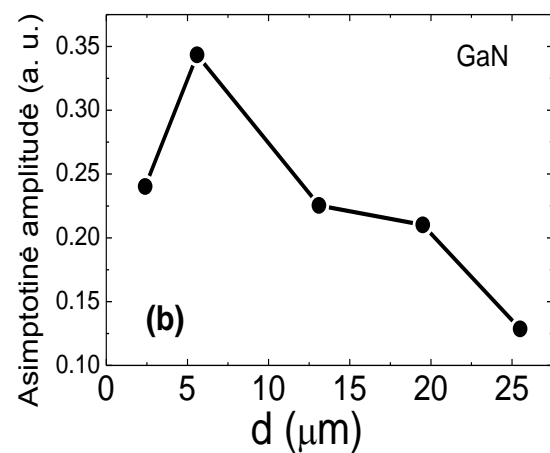
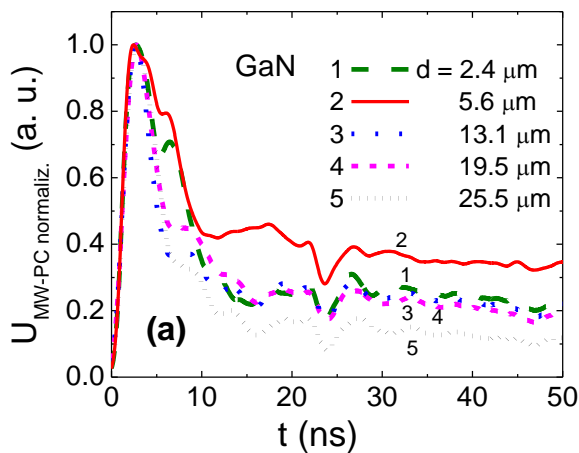
Sinchroniškai išmatuotos fotolaidumo bei fotoluminescencijos kinetikos epitaksiniuose GaN sluoksniuose yra pavaizduotos 21 pav. Fotolaidumo kinetikoms GaN sluoksniuose būdinga dvikomponentė relaksacija, su greitu pradiniu bei ilgu, kelių milisekundžių trukmės, asimptotiniu sandais. Pradinė fotolaidumo kinetikos komponentė, nanosekundžių skalėje gerai dera su spindulinės rekombinacijos kinetika iš mikrokristalinių GaN salelių. Lėtasis MW-PC sandas yra sąlygotas krūvininkų rekombinacijos netvarkioje, tarpkristalitinėje GaN srityje, kur yra išplitęs dislokacinis tinklas. Nepusiausvirieji krūvininkai, esantys netvarkioje struktūroje, yra išskiriami erdvėje aplink dislokacijos kamieną, Cottrelio sferoje, esančio erdvinio krūvio lauko, ir krūvininkų rekombinacija yra sąlygojama difuzijos dėl nepusiausvirųjų krūvininkų gradiento.

Epitaksiniuose GaN bandiniuose MW-PC kinetikos pradinė komponentė yra panašios trukmės, kaip ir PL kinetikos, išmatuotos skirtingose liuminescencijos spektro srityse, esant santykinai dideliame sužadinimo intensyvumui (21a pav., kreivės 1 – 4). Mažinant sužadinimo intensyvumą, MW-PC kinetikos, pavaizduotos 21b pav., pradinis sandas trumpėja bei mažėja asimptotinės kinetikos dalies santykinė amplitudė. Tuo tarpu Y-PL liuminescencijos kinetikoje, mažėjant sužadinimo intensyvumui, ryškėja asimptotinė relaksacijos dedamoji, kaip matosi 21a pav., 5-oje kinetikoje. Tokia PL ir MW-PC kinetikų eiga yra sietina su liuminescencijos GaN mikrokristalituose mažėjimu proporcingai sužadinimo intensyvumui bei rekombinacijos srautų tarpkristalitinėje srityje mažėjimu. Santykinis asimptotinio sando Y-PL liuminescencijos kinetikoje didėjimas ir asimptotinės trukmės ilgėjimas, mažinant sužadinimo intensyvumą, yra sietinas su krūvininkų difuzija iš kristalinių GaN sričių į netvarkias tarpkristalines sritis.



21 pav. a - Pradinė MW-PC kinetikos dalis (1) palyginama su PL kinetikomis išmatuotomis skirtingose spektro srityse (2-4) esant tam pačiam UV žadinimo intensyvumui ir 525 nm PL kinetika esant 50 kartų mažesniai sužadintiui. b – MW-PC kinetika kaita varijuojant sužadintiui intensyvumą.

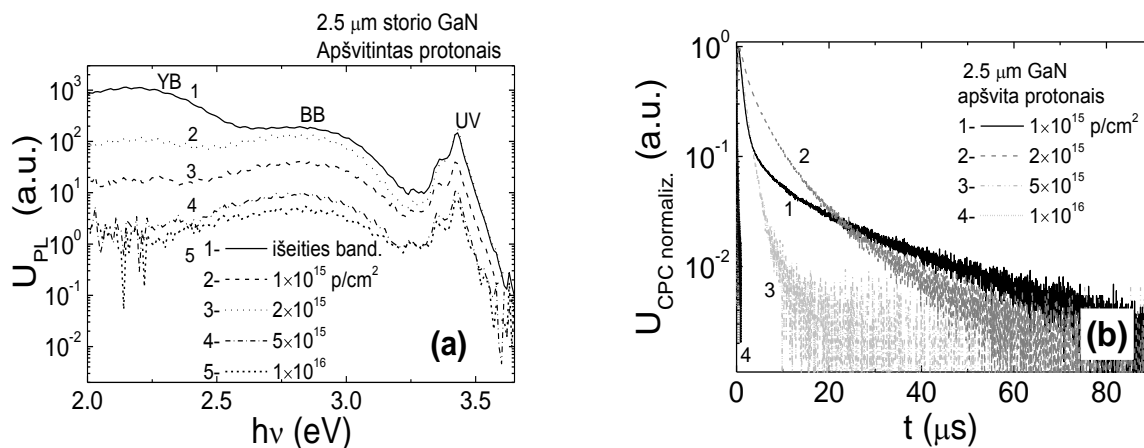
Mikrokristalų GaN tūrio didėjimas yra sietinas su epitaksinio sluoksnio storiumi, dėl mikrokristalų koalescencijos auginimo metu ir dislokacinių sričių mažėjimo. Fotolaidumo kinetika, išmatuota skirtingo storio epitaksinio GaN bandiniuose, yra pavaizduota 22a pav. Šiose kinetikose galima išskirti dvi komponentes. Lyginant sunormuotą MW-PC kinetiką, matosi, kad santykinė asimptotinio sando amplitudė, kuri yra proporcinga nespindulinės rekombinacijos intensyvumui dislokacijų tinkluose, yra atvirkščiai proporcinga GaN storiui (22b pav.).



22 pav. a- MW-PC kinetika išmatuota skirtingo storio MOCVD metodu užaugintuose GaN sluoksniuose. b- asimptotinės MW-PC kinetikos dalies santykinė amplitudė skirtingo storio epitaksinio GaN bandiniuose.

GaN dėl plataus draustinių energijų tarpo yra patraukli medžiaga radiacijai atsparių detektorių gamybai. Hadronais apšvitintame GaN fotoluminescencijos spektre, išmatuotame kambario temperatūroje, vyrauja trys juostos. Tačiau smailių amplitudės

priklauso nuo apšvitos hadronais įtėkio. Liuinescencijos juostų nykimo sparta didėjant apšvitai yra nevienoda, – Y-PL juosta nyksta sparčiausiai ir išnyksta esant 10^{15} cm^{-2} įtėkiui, kaip matosi 23a pav.



23 pav. PL spektrų (a) ir fotolaidumo kinetikų (b) kaita GaN apšvitinus skirtingu reaktoriaus neutronų įtėkiu.

Fotolaidumo kinetikoms yra būdinga hiperbolinė forma išėities medžiagoje ir nedideliu protonų įtėkiu apšvitintuose GaN bandiniuose. Tuo tarpu krūvininkų prilipimo sąlygota ilgoji kinetikos komponentė ženkliai trumpėja didėjant protonų įtėkiui. Krūvininkų rekombinacijos srautai persiskirsto didėjant apšvitos įtėkiui, ir, esant 10^{16} cm^{-2} , kinetika tampa vienkompone. Apšvitos metu yra sukuriami radiaciniai defektai tiek mikrokristalituose, tiek ir netvarkiose GaN srityse, kurie veikia kaip spartūs rekombinacijos centrai. Didėjant radiacinių defektų tankiui, kuris yra proporcingas apšvitos įtėkiui, krūvininkų rekombinacijos srautai persiskirsto ir ima dominuoti sparčiausias rekombinacijos kanalas.

Išvados

1. Sukurti nesąlytiniai metodai, pagrįsti nepusiausvirųjų krūvininkų tankio kitimų kinetikų zondavimu, registruojant mikrobangų bei IR spinduliuotės sugertį. Šie metodai buvo pritaikyti krūvininkų rekombinacijos parametrų įvertinimui plačiame ($10^{11} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) sužadinimų intervale. Buvo sukurtos metodikos paviršinės ir tūrinės rekombinacijos parametrų eksperimentiniam išskyrimui, rekombinacijos bei prilipimo procesų įvertinimui ir rekombinacijos trukmių profiliavimui. Sukurti nešiojami prietaisai VUTEG-3 bei VUTEG-4 ir pritaikyti radiacinių bei technologinių defektų tyrimams.
2. Pasiūlyta fotojonizacijos bei fotolaidumo gesinimo reiškinių tyrimo metodika, pagrįsta nesąlytiniais metodais, ir pritaikyta giliųjų lygmenų analizei Si bei Ge struktūrose. Laike išskirtosios spektroskopijos metodu įvertintos radiacinių defektų aktyvacijos energijos gerai dera su vertėmis, identifikuotomis giliųjų lygmenų talpinės spektroskopijos metodika.
3. Fotolaidumo gesinimą sąlygojanti giliųjų lygmenų sistema buvo nustatyta derinant fotojonizacijos ir fotolaidumo gesinimo spektrus. Akceptorinio tipo centrams priskiriami gilieji lygmenys sąlygoja lėtą rekombinaciją, tuo tarpu donorinio pobūdžio defektai veikia kaip greitieji rekombinacijos centrai.
4. Tūrinės rekombinacijos trukmės tiesinė mažėjimo priklausoma, didėjant hadronų įtėkiui, nepriklauso nuo Si auginimo technologijos bei suformuotos struktūros.
5. Rekombinacijos trukmės pasiskirstymo matavimai bandinio gylyje atskleidė homogeninį radiacinių defektų pasiskirstymą bandiniuose apšvitintuose skvarbiaisiais hadronais. Rekombinacijos trukmių pasiskirstymas bandinio plokštumoje ir tūryje atitinka protonų pluoštelio kontūrus bei gerai dera su stabdomų protonų įsiskverbimo profiliu.
6. Asimptotinių rekombinacijos trukmių temperatūriniai kitimai atskleidžia klasterių tipo defektų formavimąsi apšvitinimo metu. Rekombinacijos bei prilipimo charakteristikos, sąlygotos klasterių tipo defektų, yra nulemtos atstumo tarp klasterių mažėjimo didėjant hadronų įtėkiui.
7. Fotolaidumo kinetikų, zonduojamų mikrobangomis, metodika buvo pritaikyta defektų evoliucijos apšvitos hadronais metu kontrolei. Sukurta eksperimentų sąranga ir prietaisai defektų evoliucijos *in situ* kontrolei buvo įdiegti Helsinkio universitete bei Fizikinių ir technologinių mokslų centre, Vilniuje.
8. Skirtinga dominuojančių rekombinacijos centrų kūrimo sparta buvo aptikta švitinimo skvarbiaisiais protonais metu, kuri priklauso nuo temperatūros švitinimo metu bei prieš švitinimą esančių defektų silicyje tankio. Pasiūlyti modeliai, apibūdinantys klasterių formavimosi įtaką krūvininkų gyvavimo trukmės kitimams apšvitos metu bei rekombinaciją klasterių paviršiuje. Klasteriai

veikia kaip rekombinacijos centrai, tuo tarpu klasterį supantis erdvinis krūvio sritis sąlygoja krūvininkų prilipimą.

9. Parodyta, kad stabdomų protonų implantacijos metu rekombinacijos trukmė mažėja $\tau_{RS} \sim \Phi^{-1/2}$ dėsnio, kuris grindžiamas išplitusių defektų tankio didėjimu stabdymo kelyje. Didėjantis radiacinių defektų tankis sąlygoja atstumo (L) tarp defektų mažėjimą, kuris proporcingas rekombinacijos trukmei $\tau_{RS} \sim 1/N_{cl} \sim L^2 \sim \Phi^{-1/2}$.
10. Nesąlytiniai mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo kinetikų bei dinaminių atspindžio gardelių metodai buvo panaudoti rekombinacijos ir transporto charakteristikų įvertinimui plonose Si-Ge struktūrose. Išmatuotos rekombinacijos trukmės kinta nuo dešimčių iki šimtų nanosekundžių priklausomai nuo dislokacijų tankio buferiniame sluoksnyje. Aptiktos hiperbolinio pobūdžio krūvininkų relaksacijos kinetikos, kurias sąlygoja daugkartinis krūvininkų prilipimas, apibūdinamas prilipimo koeficientu $K_n > 10$, yra nulemtas dislokacijų tinklo. Stochastinė krūvininkų pernaša, būdinga netvarkioms struktūroms, sąlygoja mažą difuzijos koeficientą $D_a \leq 0.13 \text{ cm}^2/\text{s}$.
11. Išmatuota krūvininkų gyvavimo trukmės Ge prieklausa nuo legiravimo laipsnio, aukšto ir žemo sužadinimo sąlygomis. Rekombinacijos trukmės prieklausa iki $n_{thr} = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ legirantų koncentracijos gali būti aproksimuojama S-R-H modeliu, tuo tarpu gyvavimo trukmė tiesiškai mažėja ($1/n_{dop}$) viršijus šią n_{thr} vertę. Tokią prieklausą gali sąlygoti rekombinacinių centrų įvedimas technologinių legiravimo procesų metu, kurių tankis yra proporcingas legirantų koncentracijai.
12. Pasiūlyta metodika vienalaikiam mikrobangomis zonduojamo fotolaidumo, liuminescencijos spektrų ir liuminescencijos kinetikų matavimui.
13. Epitaksiniuose GaN sluoksniuose greitai, kelių nanosekundžių trukmės, pradinė komponentė nepusiausvirujų krūvininkų relaksacijos kinetikose priklauso nuo sužadinimo intensyvumo. Pradinio fotolaidumo relaksacijos sando trukmė, išmatuota MW-PC kinetikose, yra artima fotoliuminescencijos relaksacijos trukmėms. Tuo tarpu ilgoji komponentė fotolaidumo relaksacijos kinetikose yra sietina su krūvininkų prilipimo procesais dislokacijų tinkluose.
14. GaN sluoksniuose krūvininkų relaksacijos kinetikos ilgoji komponentė trumpėja didėjant apšvitinimo hadronais įtėkiui dėl spartėjančios rekombinacijos per radiacinių defektų sąlygotus lygmenis. Asimptotinė dalis nebeišskiriama esant 10^{16} cm^{-2} įtėkiui. Ištestos eksponentės rodiklis MCVD GaN kinta nuo 0.7 iki 0.3, atitinkamai, nešvitintuose ir hadronais apšvitintuose bandiniuose.

Publikacijų sąrašas

- A1. E. Gaubas, P. Pobedinskas, J. Vaitkus, **A. Uleckas**, A. Žukauskas, A. Blue, M. Rahman, K.M. Smith, E. Aujol, B. Beaumont, J.-P. Faurie, and P. Gibart. *Defect attributed variations of the photoconductivity and photoluminescence in the HVPE and MOCVD as-grown and irradiated GaN structures*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **552** (2005) 82.
- A2. E. Gaubas, A. Aleknavičius, M. Bauža, and **A. Uleckas**. *Excess carrier decay peculiarities caused by disorder in dislocation-rich SiGe and GaN layered structures*. Lithuanian Journal of Physics **45** (2005) 497.
- A3. E. Gaubas, **A. Uleckas**, and E. Simoen. *Excess carrier dynamics in SiGe ultra-thin layers*. Lithuanian Journal of Physics **45** (2005) 377.
- A4. E. Gaubas, M. Bauža, **A. Uleckas**, and J. Vanhellemont. *Carrier lifetime studies in Ge using microwave and infrared light techniques*. Materials Science in Semiconductor Processing **9** (2006) 781.
- A5. M. Bauža, E. Gaubas, J. Vaitkus, **A. Uleckas**. *Carrier recombination and trapping characteristics in the heavy irradiated high resistivity silicon*. Proc. International conference “Radiation interaction with material and its use in technologies 2006”, Kaunas (2006) 126.
- A6. **A. Uleckas**, M. Bauža, E. Gaubas, J. Grant, K. Kazlauskas, and J. Vaitkus. *Recombination characteristics in the proton and neutron irradiated GaN structures*. Proc. International conference “Radiation interaction with material and its use in technologies 2006”, Kaunas (2006) 228.
- A7. E. Gaubas, **A. Uleckas**, J. Vanhellemont, and A. Theuwis. *Recombination peculiarities in doped Ge*. Lithuanian Journal of Physics **47** (2007) 303.
- A8. E. Gaubas, **A. Uleckas**, and J. Vishniakov. *Dose dependent variations of carrier recombination in silicon irradiated by high energy electrons*. Lithuanian Journal of Physics **47** (2007) 457.
- A9. E. Gaubas, A. Kadys, **A. Uleckas**, and J. Vaitkus. *Investigation of carrier recombination in Si heavily irradiated by neutrons*. Acta Phys. Polonica A **113** (2008) 829.
- A10. E. Gaubas, **A. Uleckas**, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, and J. Vanhellemont. *Microwave probed photoconductivity spectroscopy of deep levels in Ni doped Ge*. Applied Physics Letters **92** (2008) 222102.
- A11. E. Gaubas, **A. Uleckas**, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, and J. Vanhellemont. *Spectroscopy of metal related levels in Ge by transient infrared and microwave absorption techniques*. Materials Science and Engineering B **154-155** (2008) 172.
- A12. E. Gaubas, **A. Uleckas**, J. Vanhellemont, and W. Geens. *Metal implants dependent carrier recombination characteristics in Ge*. Materials Science in Semiconductor Processing **11** Iss. 5-6 (2008) 291.
- A13. E. Gaubas, **A. Uleckas**, J. Vanhellemont. *Pulsed photo-conductivity and carrier recombination lifetime spectroscopy of metal doped germanium*. Superlattices and Microstructures **45** Iss. 4-5 (2009) 256.
- A14. E. Gaubas, **A. Uleckas**, and J. Vaitkus. *Spectroscopy of neutron irradiation induced deep levels in silicon by microwave probed photoconductivity transients*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **607** (2009) 92.

- A15. E. Gaubas, T. Čeponis, **A. Uleckas**, and J. Vaitkus. *Anneal dependent variations of recombination and generation lifetime in neutron irradiated MCZ Si*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **612** (2010) 563.
- A16. E. Gaubas, **A. Uleckas**, J. Vaitkus, J. Raisanen, and P. Tikkanen. *Instrumentation for the in situ control of carrier recombination characteristics during irradiation by protons*. Review of Scientific Instruments **81** (2010) 053303.
- A17. E. Gaubas, T. Čeponis, **A. Uleckas**, J. Vaitkus, K. Žilinskas, V. Kovalevskij, M. Gaspariūnas, and V. Remeikis. *In situ analysis of the carrier lifetime in silicon during implantation of 1.5 MeV protons*. Lithuanian Journal of Physics **50** (2010) 427.
- A18. **A. Uleckas**, E. Gaubas, T. Čeponis, K. Žilinskas, R. Grigonis, V. Sirutkaitis, and J. Vanhellefont. *Analysis of Auger recombination characteristics in high resistivity Si and Ge*. Solid State Phenomena **178-179** (2011) 427.
- A19. **A. Uleckas**, E. Gaubas, J.M. Rafi, J. Chen, D. Yang, H. Ohyama, E. Simoen, and J. Vanhellefont. *Carrier lifetime studies in diode structures on Si substrates with and without Ge doping*. Solid State Phenomena **178-179** (2011) 347.
- A20. E. Gaubas, **A. Uleckas**, J.M. Rafi, J. Chen, D. Yang, and J. Vanhellefont. *Study of irradiation induced changes of electrical and functional characteristics in Ge doped Si diodes*. Physica B **407** (2012) 2998.

Summary

Electrically active defects are one of the main obstacles to produce high efficiency semiconductor based devices. Deep levels determine the non-radiative recombination processes and deteriorate efficiency of light emitting diodes, charge collection efficiency of radiation detectors and determine high power dissipation of the power devices. Technology of complementary metal-oxide-semiconductor based on shrinking of the geometrical parameters is facing with fundamental limits of the silicon properties. An integration material with different lattice constant is a new trend for Si based technology development. The necessity of materials with higher dielectric constant to replace SiO₂ as gate insulator implies opportunity to incorporate semiconductors with higher carrier mobility, such as Ge, on Si wafers. Generation of misfit and unwanted threading dislocations is inevitable while growing materials with different lattice constant one on the other.

Dislocations network also plays an essential role in performance of GaN based optoelectronic and electronic devices. GaN and III-V compounds related wide band-gap semiconductors are usually grown on sapphire or on silicon carbide substrates, therefore edge and screw dislocations are hardly avoidable due to mismatch of materials lattices and thermal coefficients. The same problem is facing while integrating GaN on Si substrates. Dislocations introduce electronic states in forbidden energy gap and act as the non-radiative recombination or charge trapping centres which deteriorate parameters such as luminescence efficiency or breakdown voltage of the devices. Therefore, identification of the defects is essential to develop and to modify the conditions of layers growth and to improve the quality of these layers.

Semiconductor radiation detectors are widely applied in Large Hadron Collider (LHC) experiments for detection and tracking of particles. Standard Si based pin diodes operate reliably at fluences $< 10^{15}$ particle/cm², while detector hardness up to fluences of $>10^{16}$ cm⁻² is required for the up-grade of LHC. Several technologies are employed to improve radiation tolerance of Si sensors, namely the material growth, doping, defects engineering and device structure engineering. Magnetic Czochralski grown silicon (MCz) is a promising material relatively to other traditional Cz and float zone (FZ) Si materials for high energy physics applications. Also development of material fabrication technology provides possibility to apply the wide band-gap materials like diamond, GaN and SiC, with attractive features such as low leakage current, excellent mechanical characteristics for radiation hard environment.

To improve understanding of the influence of modern material growth and doping techniques and to develop advanced modes in defects and device structure engineering, the deeper insight should be reached concerning introduction and interactions of defects. Also their role in modifications of the most important characteristics of material, as carrier recombination and transport parameters, should be better understood. To improve instrumentation of defects detection resolution, the contactless techniques for comprehensive characterization of defects containing materials are desirable, despite large variety of existing defects control methods. Deeper understanding is necessary in the fields of radiation defects creation, migration, evolution and transforms during irradiation in order to clarify their role in detector operation features. Development of new methods is desirable for advanced control of defects within material. The multifunctional instruments are required for fast contactless evaluation of the most

important parameters characterizing defects and defects containing materials. The methodologies of combined and synchronous measurements may be a basis for advanced, fast and comprehensive evaluation of material characteristics in real time during device operating and processing of new device structures.

The aim of this work is addressed to material science and development of new measurement technologies for defects characterization and identification within modern structures of Si, Ge and GaN by developing the non-destructive techniques. The main objectives were concentrated on: i) development of contactless time resolved spectroscopy of deep levels at room temperature; ii) development of microwave probed contactless technique and instrumentation for lateral and cross-sectional scans of carrier lifetime profiles within inhomogeneous and irradiated structures; iii) the *in situ* control of recombination lifetime in Si structures during penetrative and stopped protons irradiation, and examination of evolution of radiation defects; iv) separation and examination of recombination parameters attributed to different layers within strained thin-layered SiGe structures; v) study of doping, metal implantation and irradiation dependent characteristics in Ge structures; vi) study of growth and radiation induced defects within epitaxial GaN structures.

Relevance and scientific novelty of these investigations consist of development of contactless time resolved techniques for deep levels spectroscopy. This technique has been approved for evaluation of defects parameters within irradiated Si and implanted Ge structures. The methodology and instrumentation for the *in situ* control of recombination parameters during irradiations by penetrative and stopped protons have been proposed, designed and approved. Evolution of densities and of species of the radiation defects during irradiation has been examined and models for fluence dependent variations of density of extended defects are proposed. An impact of dislocation networks ascribed disorder on recombination properties has been revealed within strained thin-layered SiGe structures and epitaxial GaN layers. The models for explanation of the interplay of defects in these structures have been proposed. The methodologies and experimental arrangements for the combined time and spectral resolved measurements, based on photo-ionization, photo-luminescence, free-carrier absorption and photoconductivity transient effects have been proposed and approved.

Fast and contactless time resolved spectroscopy techniques suitable for identification of deep levels parameters at room temperature have been designed. These techniques allow identifying of traps activation energy and of carrier recombination lifetime changes synchronously. The instruments for contactless microwave probed photoconductivity transients direct control have been designed, fabricated and calibrated for monitoring of the material recombination characteristics within research laboratory and industrial facilities, for the evaluation of quality of the technological procedures. The remote measurement arrangements for the *in situ* control of radiation induced changes of the material and radiation detector characteristics have been proposed, designed, fabricated, approved and installed for operation within harsh areas of the tandem-type particle accelerators. The revealed linear dependence of carrier lifetime in silicon on penetrative hadrons irradiation fluence, irrespective of Si material growth technology and particles energy, is prospective to be applied for the design of Si based sensors for irradiation dosimetry.

The main results of this research can be summarized as follows: i) the portable instruments VUTEG-3 and VUTEG-4 have been manufactured, calibrated and employed in multi-functional contactless applications for monitoring of technological and radiation defects. ii) The techniques of time resolved spectroscopy of deep levels, based on photo-ionization and photoconductivity quenching effects, have been proposed and approved for characterization of deep levels in Si and Ge structures, ascribed to growth and radiation induced defects. It has been shown that time resolved spectroscopy technique enables one to correlate spectral steps with carrier lifetime changes, and thereby to identify the most recombination active centres. iii) The linear bulk recombination lifetime decrease with enhancement of hadrons irradiation fluence has been revealed irrespective of particles type and energy. This lifetime characteristic shows the same absolute values of carrier lifetime ascribed to definite irradiation fluence values, irrespective to material growth technology and structure, nearly the same for wafer samples and particle detectors. iv) The temperature and anneal dependent variations of trapping lifetime enable us to reveal fluence governed formation of cluster defects. The clusters related recombination and trapping centres cause complicated changes of the recombination-trapping characteristics. These changes of recombination-trapping characteristics can be explained by variation of distance d between clusters, dependent on irradiation fluence. v) A comprehensive instrument based on MW probed photoconductivity transients control has been designed, fabricated and approved for the remote and *in situ* monitoring of defects evolution during irradiation by protons. The decrease of recombination lifetime during penetrative protons irradiation has been identified. The different rates of the production of the dominant recombination centres have been clarified. The defect production rate has been found to be dependent on irradiation temperature and on the pre-irradiation conditions of Si material. The models of cluster formation impact on the carrier lifetime reduction rate during irradiation and of surface recombination on cluster boundary have been proposed. These models have been employed to prove the prevailing of the radiation induced cluster defects, acting as the dominant carrier recombination centres, while cluster surrounding space charge sphere determines carrier trapping effects. vi) Contactless techniques have been combined and approved for direct measurements of the carrier recombination and transport characteristics in ultra-thin layered structures. Recombination lifetimes from tens to hundreds of nanoseconds were determined in the $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$ layers containing different density of dislocations. A hyperbolic-like excess carrier relaxation within asymptotic carrier decay part has been unveiled in $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$ layers, and this carrier density relaxation behaviour is ascribed to multi-trapping processes characterized by trapping coefficient $K_{tr} > 10$, which is attributed to disorder caused by dislocation network. vii) The excess-carrier decays, revealed in the MW-PC transients of the as-grown material contain also an initial stage with a fast component of a few nanoseconds dependent on the excitation density. The initial instantaneous lifetimes of the MW-PC decays are close to that estimated from the time-resolved photoluminescence signal relaxation rate. The long tail component is ascribed to excess carrier trapping processes at dislocations, those comprise disordered network within epi-layer. Trapping caused long tail component in GaN layers is shortened most significantly with hadrons irradiation fluence, and for large fluence of hadrons irradiation in the range of 10^{16} cm^{-2} the asymptotic decay component is non-resolvable. This has been explained by the enhancement of the recombination rate within crystalline material with increase of the radiation defects density.

Informacija apie autorių

Vardas Pavardė		Aurimas Uleckas
Gimimo data ir vieta		1983 m. rugsėjo 16 d., Marijampolė, Lietuva
Adresas		Saulėtekio al. 41-4, Vilnius, Lietuva
Elektroninis paštas		aurimas.uleckas@ff.stud.vu.lt
Išsilavinimas	2002	Marijampolės Rygiškių Jono gimnazija
	2002-2006	Vilniaus universitete, Fizikos fakultete įgytas bakalauro laipsnis
	2006-2008	Vilniaus universitete, Fizikos fakultete įgytas magistro laipsnis
	2008-2012	Vilniaus universitete, Fizikos fakultete doktorantūros studijos
Darbo patirtis	2003-2005	Vilniaus Universitetas, Taikomųjų mokslų institutas; technikas
	2005-2010	Vilniaus Universitetas, Taikomųjų mokslų institutas; inžinierius
	2010-2012	Vilniaus Universitetas, Taikomųjų mokslų institutas; jaunesnysis mokslo darbuotojas
Specializacija		Puslaidininkų ir jų darinių charakterizavimas nesąlytiniais metodais; krūvininkų gyvavimo trukmės matavimai, nesąlytinė fotojonizacijos spektroskopija, radiacinių ir savitųjų defektų charakterizavimas
Publikacijos		30 straipsnių, įtrauktų į ISI duomenų bazę, 30 pranešimų konferencijose