

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

KAROLIS GULBINAS

NETIESIATARPIŲ PUSLAIDININKIŲ TiGaSe_2 IR SiC
FOTOELEKTRINIŲ IR OPTINIŲ
SAVYBIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

Vilnius, 2015

Disertacija rengta Vilniaus universitete Taikomųjų mokslų institute 2010 – 2014 metais.

Mokslinis vadovas – dr. Vytautas Grivickas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto medžiagų inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

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

Nariai:

Dr. Ramūnas Aleksiejūnas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T);

Prof. dr. Kerim R. Allahverdi (Marmara tyrimų centras, Turkijos mokslinių ir technologijos tyrimų taryba, medžiagų inžinerija - 08T);

Prof. dr. Daumantas Čiplys (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Dr. Karolis Kazlauskas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2015 m. kovo mėn. 20 d. 15 val. Nacionaliniame atviros prieigos mokslinės komunikacijos ir informacijos centre, A119 salėje. Adresas: Saulėtekio al. 5, LT-10222, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2015 m. vasario 20. d.

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

VILNIUS UNIVERSITY
CENTRE FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

KAROLIS GULBINAS

PHOTOELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF
INDIRECT BANDGAP SEMICONDUCTORS
TiGaSe₂ AND SiC

Doctoral dissertation
Technological Sciences, Materials Science (08T)

Vilnius, 2015

The dissertation was prepared at the Institute of Applied Research, Vilnius University in 2010-2014.

Scientific supervisor: dr. Vytautas Grivickas (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Science – 08T).

Council of defense of the doctoral thesis on Materials Science at Vilnius University:

Chairman:

Doc. dr. Bonifacas Vengalis (Centre for Physical Science and Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr. Ramūnas Aleksiejūnas (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T);

Prof. dr. Kerim R. Allahverdi (Marmara Research Center, Turkish Scientific and Technological Research Council, Materials Engineering – 08T);

Prof. dr. Daumantas Čiplys (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P);

Dr. Karolis Kazlauskas (Vilnius University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended under open consideration in the Council of Materials Science on the 20th of March, 2015, 3 p. m. at the National Open Access Scholarly Communication and Information Centre, room A119. Address: Saulėtekio ave. 5, LT-10222, Vilnius, Lithuania.

The Summary of the dissertation has been distributed on the 20 of February, 2015.

The dissertation is available at Vilnius University library, at the library of Centre for Physical Sciences and Technology and on the Vilnius University website: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius.

Padėka

Dėkoju darbo vadovui dr. Vytautui Grivickui už vadovavimą ir palaikymą studijų metu.

Nuoširdžią padėką reiškiu prof. Jan Linnros už per stažuotes Karališkajame technikos institute Stokholme suteiktas sąlygas atlikti mokslinius tyrimus.

Dėkoju publikacijų bendraautoriams už puikų komandinį darbą bei bendradarbiavimą atliekant tyrimus ir rengiant publikacijas.

Nuoširdžiai dėkoju šeimai už palaikymą.

Šį darbą rėmė Lietuvos Valstybinis mokslo ir studijų fondas, Lietuvos mokslo taryba bei Švedijos institutas.

Įvadas

Elektronikai ir optoelektronikai plėtotis nuolat reikia naujų medžiagų, nes jos atveria naujas taikymo galimybes ir padeda spręsti nuolat kylančias technines problemas. Pageidaujama plačiatarpių puslaidininkių su modifikuojamomis ir lengvai valdomomis savybėmis. Dabar žinomus puslaidininkius siekiama tobulinti ir nuodugnai tirti. Šiame darbe buvo nagrinėjamas sluoksniuotasis TlGaSe_2 puslaidininkis ir keli SiC politipai: 6H, 4H ir 3C. Šios medžiagos yra netiesiatarpiai draustinės energijos puslaidininkiai, pasižymintys ilga krūvininkų gyvavimo trukme, stipria elektron-fononine sąveika, iš dalies silpna krašto liuminescencija.

TlGaSe_2 sumaišius su kitais sluoksniuotais chalkogenidais galima modifikuoti draustinį juostos tarpą 0.6 – 2.4 eV srityje. Tl turintys metalo chalkogenidai dėl didelio masės tankio yra perspektyvūs radiacijos detektoriai. TlGaSe_2 yra gerai žinomas kaip izoliuojantis *p*-tipo fotolaidininkas, žemų temperatūrų srityje pasižymintis specifiniais faziniais virsmis. Fazinių virsmų temperatūroje jo savybės jautriai priklauso nuo elektrinio lauko, šviesos poveikio, bet nėra pakankamai išaiškintos. Šiuo darbu siekiama paaiškinti krūvio pernašos, rekombinacijos, optines ir fotoelektrines TlGaSe_2 savybes.

SiC puslaidininkiai pasižymi ypač dideliu draustinių energijos tarpu, aukštu pramušimo elektriniu lauku, dideliu terminiu laidumu ir kietumu. Šios savybės tinkamos didelės galios prietaisams, nes SiC politipai atlaiko aukštą įtampą, temperatūrą, yra

stabilūs radiacinėje aplinkoje. Kiekvienas SiC politipas turi specifinių privalumų, tinkančių konkrečiam taikymo atvejui.

6H-SiC, kuriame daug donorų ir akceptorų, gali būti naudojamas kaip regimosios šviesos perspinduliuotojas (konverteris) naujo tipo baltos šviesos šviestukams gaminti. Deja, konversijos sąlygos ir tinkamas priemaišų balansas bei pernašos mechanizmas nėra iki galo aiškūs.

Homoepiktasinis 4H-SiC auginimas leidžia tiksliai kontroliuoti epitaksinio sluoksnio storį ir priemaišų koncentraciją, tačiau plonuose (nuo kelių iki keliolikos mikronų storio) prietaisuose paviršių ir sandūrų įtaka tampa ribojančiu veiksniu. Čia buvo tirti dviem būdais pasyvuoti ploni 4H-SiC sluoksniai, atsižvelgiant į jų atsparumą radiacijai.

Nors kubinis 3C politipas neturi mikroiaurymių defektų, būdingų heksagoniniams SiC politipams, epitaksinio sluoksnio kokybė nėra aukšta dėl kitų defektų susidarymo. Neseniai išbandytas 3C-SiC auginimas ant banguoto Si padėklo mažina defektų kiekį, tačiau, atskyrus nuo padėklo, lieka epitaksinio sluoksnio deformacijų, kurios turi įtakos krūvininkų gyvavimo trukmei ir parametrams.

Darbo tikslas

Pagrindinis tikslas - įgyti naujų žinių apie netiesiatarpių puslaidininkų TlGaSe₂ ir SiC politipų 6H, 4H ir 3C optines savybes ir krūvio pernašos mechanizmą.

Pagrindiniai uždaviniai:

1. Tirti TlGaSe₂ optiniais metodais ir paaiškinti optines, fotoelektrines ir krūvio pernašos savybes bei nustatyti galimą optinę anizotropiją.
2. Įvertinti legiravimo sąlygų įtaką stipriai N ir B priemaišomis legiruotame 6H-SiC, užaugintame greitosios sublimacijos būdu, spindulinės reemisijos efektyvumui, tiriant krūvio pernašos ir rekombinacijos mechanizmus.
3. Palyginti 4H-SiC plonų epitaksinių sluoksnių pasyvavimą SiO₂ ir Al₂O₃ oksidais ir jų atsparumą radiacijai.
4. Įvertinti ant banguoto Si padėklo užauginto bei nuo padėklo atskirto 3C-SiC liekamųjų deformacijų įtaką krūvininkų gyvavimo trukmei ir optinės sugerties kraštui.

Naujumas ir aktualumas

Taikytas fotoakustinio atsako (PAR) metodas (statmenoje žadinimo-zondavimo geometrijoje) leido ištirti TlGaSe₂ sugerties krašto spektrines savybes. Šis metodas TlGaSe₂ pasižymi dideliu jautriu bei gali būti taikomas kitiems sluoksniuotiems puslaidininkiams tirti. Tokie puslaidininkiai gali būti naudojami šviesos impulsams valdyti taikant panaudotą PAR detektavimo schemą.

Pirmą kartą kambario temperatūroje aptikta sugerties krašto fotoluminescencija TlGaSe₂ ir izostruktūriniame TlInS₂. Naudojant konfokalinę mikroskopiją, nustatytos luminescencijos poliarizacinės sužadinimo ir perspinduliavimo priklausomybės. Emisija yra jautri struktūros bei paviršinio sluoksnio savybėms. Žemos temperatūros feroelektrinėje fazėje aptikta sugerties spektro anizotropija, atsirandanti sluoksnio plokštumoje (dviašis anizotropiškumas). Ji aiškinama tarp sluoksnių Tl katijonų grupavimosi poslinkiu. Sukurtas krūvininkų rekombinacijos mechanizmo modelis, apimantis greitą rekombinacijos kanalą dėl tarp sluoksninės difuzijos padidėjimo aukštų sužadinimų srityje ir nepagrindinių krūvininkų prilipimą sanglaudos defektuose žemų sužadinimų srityje. Ištirta geležies priemaišos įtaka priemaišinės optinės sugerties ir optinio krašto charakteristikai.

Fluorescuojančiame 6H-SiC buvo atlikti išsamūs matavimai, siekiant nustatyti krūvio pernašos ir rekombinacijos mechanizmą, leidžiantį paaiškinti DAP luminescencijos efektyvumo didėjimą dėl konkuruojančių spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos mechanizmų.

Plonų 4H-SiC epitaksinių sluoksnių krūvininkų gyvavimo trukmei svarbi paviršiaus pasyvavimo įtaka. Buvo palygintos dvi technologijos - pasyvuojant su SiO₂ ir Al₂O₃ oksidais - bei bandinių atsparumas radiacijai.

Ištirta nuo padėklo atskirto 3C-SiC epitaksinio sluoksnio, užauginto ant banguoto Si padėklo liekamųjų deformacijų įtaka krūvininkų gyvavimo trukmei ir bandinio optinės sugerties krašto struktūrai.

Ginamieji teiginiai

1. Fotoakustinis atsakas (PAR) yra jautrus optinio sugerties krašto matavimo metodas sluoksniuotame TlGaSe₂ dėl didelės lūžio rodiklio priklausomybės nuo slėgio ir

mažos tarpjuostinės sugerties. PAR gali būti panaudotas optiniam impulsų perjungimui dėl jo didumo ir tiesiškumo.

2. Pirmą kartą kambario temperatūroje TlGaSe_2 aptikta jo optinio krašto liuminescencija, atsirandanti dėl tarpjuostinių optinių šuolių. Poliarizacinės liuminescencijos ir sugerties priklausomybės parodo tarp sluoksnių lokalizuoto eksitono rekombinaciją.
3. Aptikta sugerties krašto anizotropija žemos temperatūros feroelektrinėje fazėje, kuri parodo anksčiau teoriškai numatytą asimetrinę Tl atomų poslinkį tarp sluoksniuose.
4. Stipriai N donorais ir B akceptoriais legiruoto fluorescuojančio 6H-SiC šviesos emisijos našumas didėja, esant santykiui $N > B$. Boro koncentracija mažina difuziją ir ilgina rekombinacijos laiką. Liuminescencijos spektras susideda iš dviejų persiklojančių juostų dėl šuolių iš laidumo juostos į gilų boro lygmenį (CB-to-dB) ir dėl šuolių iš azoto į gilų boro lygmenį (N-to-dB).
5. Po $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ ir $\text{Al}_2\text{O}_3/4\text{H-SiC}$ sandūrų gadinimo apšaudant 50 keV Ar^+ jonais nustatyta, kad pasyvavimas Al_2O_3 oksidu yra atsparesnis tokio tipo radiacijai.
6. Ant banguoto Si padėklo užaugintame ir nuo padėklo atskirto 3C-SiC epitaksiniam sluoksnyje išilgai augimo krypties aptinkamos liekamosios deformacijos. Sluoksniu viduryje lieka nedeformuota sritis, pasižyminti ilga krūvininkų gyvavimo trukme ir būdinguoju sugerties kraštu.

Disertacijos santrauka

1. TlGaSe₂ ir SiC savybių apžvalga

TlMX₂ (M = Ga, In; X = Se, S, Te) darinių šeima sudaro sluoksniuotą arba grandininę struktūrą. Labiausiai tyrinėtus yra TlGaSe₂, jis pasižymi dideliu jautrumu nedideliems tarp sluoksnių pokyčiams, jame stebimi faziniai virsmai žemose temperatūrose, tačiau ir kiti izostruktūriniai sluoksniuoti puslaidininkiai pasižymi panašiomis savybėmis [1]. TlGaSe₂ junginyje buvo užregistruotas optinis perjungimas dėl neigiamos diferencialinės varžos [2], antros harmonikos generacija [3], didelis fotoakustinis atsakas [4]. Neįprastos savybės dėl fazinių virsmų yra itin dažnai tiriamos dėl atsirandančio neigiamo susispaudimo sluoksnių plokštumoje [5, 6], dėl didelio jautrio išoriniam elektriniam laukui ir šviesai [7]. Stebima indukuota optinė atmintis, kai junginys atkaitinamas fazinių virsmų srityje [8]. Daug šių ypatybių yra aiškinamos nevienareikšmiškai [1].

SiC politipai yra plačiatarpiai puslaidininkiai, pasižymintys dideliu atsparumu elektriniam laukui, aukštai temperatūrai, radiacijai bei geru terminiu laidumu [9].

2006 metais buvo suvokta, kad 6H-SiC gali būti panaudotas kaip aktyvus konverteris iš monochromatinės UV šviesos į baltą šviesą [10, 11]. Stipriai legiravus N donorais su B arba su Al akceptoriais galima ženkliai padidinti donor-akceptorinių porų (DAP) juostų liuminescenciją. Tokia DAP liuminescencija SiC tarp N-B yra geltonos/raudonos spalvos, o DAP tarp N-Al – mėlynos spalvos, kurias tinkamai sumaišius gaunama balta šviesa. UV šviesą generuoja GaN šviestukas, kurį technologiškai galima užauginti ant SiC padėklo. Todėl šviestuko struktūra SiC padėklu gali pasiekti ne tik aukštą spalvinės atgavos indeksą, bet ir didelį šviesinį našumą. Šviestukas būtų ilgaamžiškas dėl monolitinės struktūros, turėtų gerą terminį laidumą. Struktūrai nereikėtų naudoti retųjų žemių metalų, kurie yra įprastuose fosforiniuose konverteriuose. Tačiau išlieka apribojimų, dėl SiC ir GaN auginimo sąlygų ant 1.4° nuo ašies pakreiptų padėklų. Kol kas nėra galutinai atskleistos ir fizikinės priežastys leidžiančios paaiškinti DAP liuminescencijos didėjimą. Šiame darbe tirtos labiausiai komplikuoti B ir N legiruoto sluoksnių savybės, siekiant paaiškinti šviesos konversijos mechanizmą.

Dielektriko ir SiC sandūros patikimumo problema yra svarbi kalbant apie plonų sluoksnių 4H-SiC prietaisus, kurių paviršius ar sandūrą nulemia prietaiso perjungimo charakteristikas [12]. Bipolinės jungties tranzistoriuose (BJT), dėl sandūros defektų, emiterio-bazės sandūra degraduoja dėl paviršinės rekombinacijos. Degradacija sumažina jaudrį, gyvavimo trukmę bei sąlygoja nuotėkio sroves [13, 14]. Tinkamai pasyvuoti paviršiai gali mažinti paviršinę rekombinaciją. Palygintas pasyvavimas su įprastu SiO₂ oksidu ir alternatyviu Al₂O₃ oksidu, kurio pramušimo elektrinis laukas yra didelis rodo atsparumą radiacijai [15].

3C- yra kubinis SiC politipas, kuriame nėra mikrokaurymių defektų būdingų heksagoniniams politipams. Dėl mažesnio draustinio juostų tarpo, paviršinės būsenos SiO₂/SiC patenka į laidumo juostą, dėl to paviršiaus pasyvacija yra geresnė [16]. Išnaudojus šiuos 3C privalumus, galima tikėtis geresnio laidumo kanalo. Deja, 3C epitaksinių sluoksnių auginimo technologijos netobulos, aptinkama daug defektų: deformuoti sluoksniai, kitų politipų intarpai, dvigubi domenai (DPB) ir kt. [17]. Dėl to tiriamos įvairios auginimo technologijos kaip ant banguoto Si padėklo, kur tikimasi, kad priešingos krypties domenai suauga pradiniame 50 μm sluoksnyje, o epitaksinis sluoksnis gali būti auginamas kelių šimtų mikronų storio [18]. Nuėsdinus padėklą, deja, stebimas sluoksnio išlinkimas ir atsiranda liekamosios deformacijos. Taigi mes bandėme įvertinti liekamųjų deformacijų įtaką epitaksinio sluoksnio kokybei.

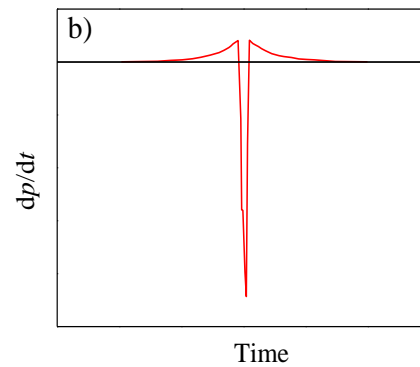
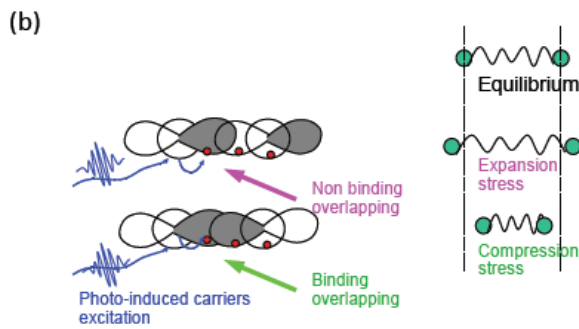
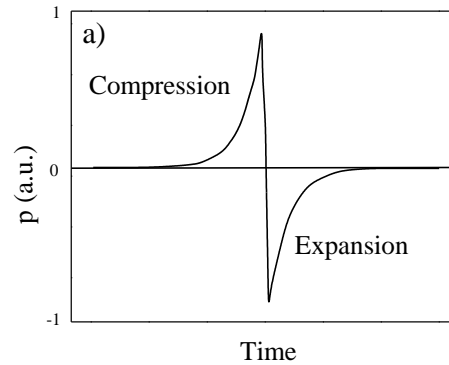
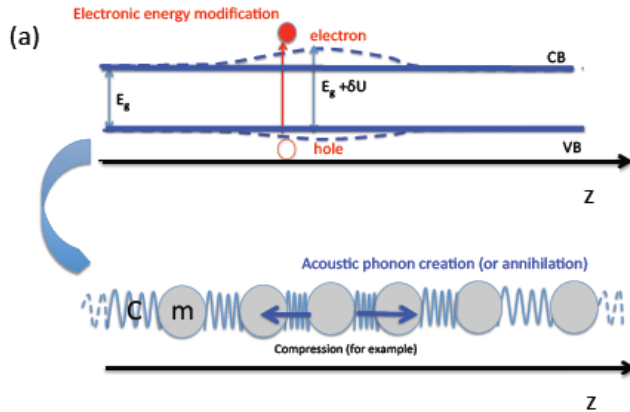
2. Laisvagrūvė sugertis ir fotoakustinis atsakas

Svarbiausieji eksperimentai buvo atlikti remiantis dinaminiais laisvagrūvės sugerties (FCA) ir fotoakustinio atsako (PAR) matavimo principais.

Laisvagrūvė sugertis užregistruoja dinaminę sugerties pokytį, kuris atspindi perteklinių fotoinjektuotų (juosta-juosta ar priemaiša-juosta) nepusiausvyrų krūvininkų dinamiką ir jos ypatybes. Gautas signalas perskaičiuojamas į laisvųjų krūvininkų absorbcijos koeficientą $\Delta\alpha_{FCA}$. Iš $\Delta\alpha_{FCA}$ kinetikos galima įvertinti krūvininkų gyvavimo trukmę ir difuzijos įtaką, o pasiskirstymas į gylį atspindi tarpjuostinės sugerties koeficientą α_{bb} [19].

Dėl fotoinjektuotų laisvų krūvininkų sukeltos generacijos įvyksta gardelės deformacija - įtempimas arba suspaudimas. Deformacijos dydį ir indukuoto pakitimo

ženklą apsprendžia deformacinio potencialo dydis ir kryptis, kaip pavaizduota 2.1 pav. [20]. Dalis indukuotos energijos išspinduliuojama kristale fononais, kurie ties laisvu bandinio paviršiumi sugeneruoja išilginę akustinę bangą. Banga sklinda kristalu statmenai sužadintai paviršiaus plokštumai.



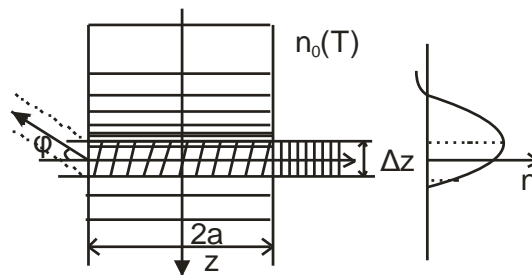
2.1 pav. Deformacinio potencialo veikimo schema pagal (a) juostų struktūros pakitimą ir (b) molekulinį atomų atvaizdavimą [20].

2.2 pav. Užregistruota akustinė banga (a) su pjezo davikliu ir (b) optiškai, naudojant bekontaktį zondo užlinkimo metodą [21].

Įprastai, akustinė banga registruojama su kalibruotu, prie galinio paviršiaus prispaudžiamu pjezoelektriniu davikliu. Detektorius registruoja bipolinį signalą su suspaudimo ir išsiplėtimo komponentėmis (2.2(a) pav.). Savo darbe panaudojome bekontaktį optinį fotoakustinės (PA) bangos detektavimą (*Schlieren* optinė schema), kai statmenai PA bangos sklidimo kryptčiai registruojamas trumpalaikis zondo spinduliuotės nukrypimas (deflekcija). Fotoakustinis atsakas (PAR) atkartoja slėgio bangos išvestinę pagal laiką (2.2(b) pav.).

Anksčiau *Schlieren* metodas buvo naudojamas PA signalams detektuoti skysčiuose [22]. Išilginė PA slėgio banga sukelia skersinį lūžio rodiklio gradientą (nuo laisvo bandinio paviršiaus sklinda spaudimo ir išsiplėtimo slėgio komponentės, 3.1 pav.).

Sklindantis lūžio rodiklio gradientas, kirsdamas zondo kelią, sukelia zondo spinduliuotės deflekciją. Naudojamos schemos privalumas yra bekontaktis registravimas, esant mažai akustinio signalo dispersijai ir galimybė užregistruoti PAR toliau nuo bandinio paviršiaus, gylje, kuriame nėra indukuotos laisvųjų krūvininkų sugerties. Nedidelė kelių barų absoliutinė slėgio vertė buvo nustatyta kalibruojant PAR pagal gerai ištirtą GaAs (100) puslaidininkį. PAR signalo atspindžiai nuo paviršių leidžia tiksliai išmatuoti akustinį greitį.



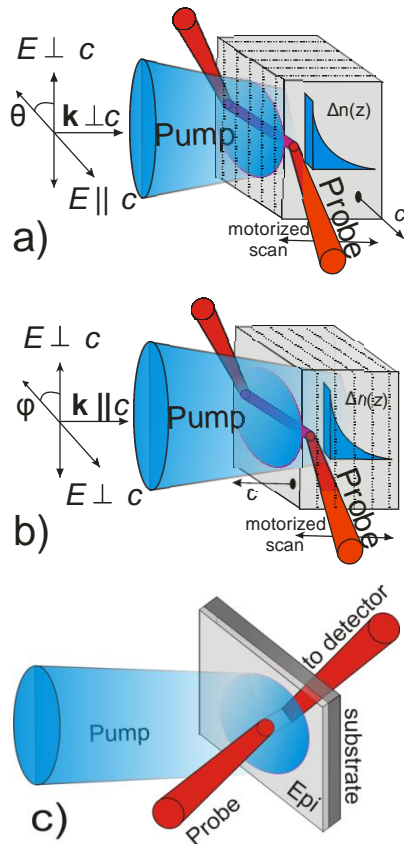
3.1 pav. Principinė schema rodanti kaip sklindantis lūžio rodiklio gradientas sukelia zondo deflekciją. $2a$ yra akustinės bangos diametras [22].

3. Matavimo metodika

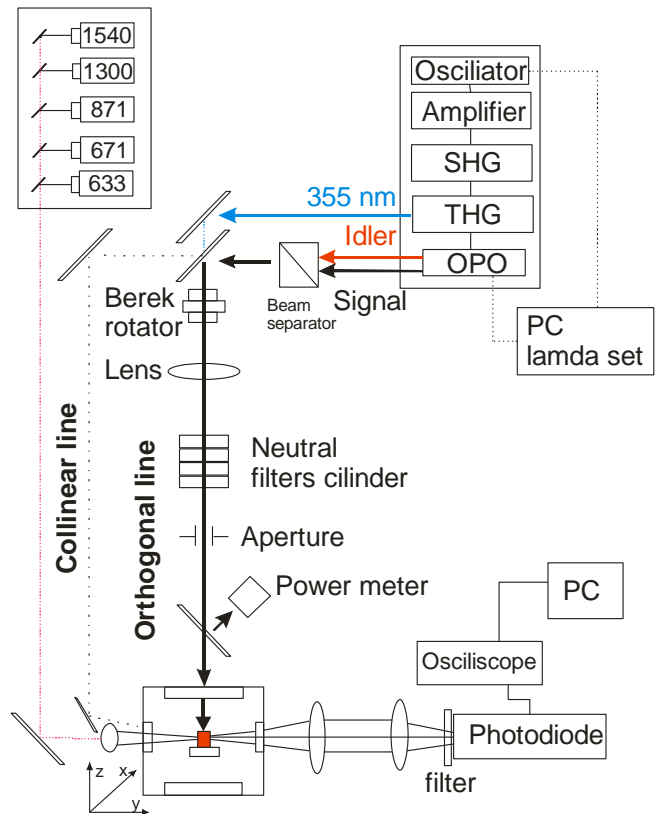
Žadinimo-zondavimo FCA metodika, priklausomai nuo spindulių susikirtimo geometrijos, yra skirstoma į statmeną ir lygiagrečiąją konfigūracijas (3.2 pav.). Statmenoje konfigūracijoje sužadinantis ir zonduojantis spinduliai kertasi statmenai. Pagal bandinio c -ašies orientaciją, galima išskirti dar du atvejus: kai žadinantis spindulys sklinda statmenai c -ašiai ($\mathbf{k} \perp c$) ir kai lygiagrečiai ($\mathbf{k} \parallel c$) (žr. 3.2 pav. (a) ir (b)). Papildomai pavaizduota ir elektrinio lauko poliarizacijos krypčių žymėjimai c -ašies atžvilgiu. Lygiagreti konfigūracija pavaizduota 3.2 pav. (c), kur spinduliai susikerta toje pačioje plokštumoje.

Matavimo schema pavaizduota 3.3 pav. Sužadinimo kelias $\mathbf{k} \perp c$ konfigūracijai pavaizduotas ištisine linija, o $\mathbf{k} \parallel c$ – punktyrine. Žadinantysis didelės energijos 2 ns impulsas sugeneruotas Nd:YAG lazerio. Pasikartojimų dažnis 40 Hz. Fundamentinė pirmoji harmonika paverčiama į antrąją ir į trečiąją - 355 nm spinduliuotę, kuri naudojama 4H- ir 6H-SiC politipams sužadinti. Toliau 355 nm spinduliuotė OPO kristale buvo verčiama į derinamą bangą nuo 430 iki 1500 nm. Zondo kelias pavaizduotas raudona linija. Spinduliai susikerta bandinyje, kuris yra talpinamas kriostate, tiksliai pozicionuojamame trimis kryptimis. Preciziškas padėties nustatymas į gylį pasiekiamas 1 μm tikslumu. Zondas praėjęs bandinį ir dvigubą lęšių sistemą registruojamas

fotodetektoriumi, kurio atsako laikas yra 0.5 ns. Laisvųjų krūvininkų ir PAR signalai matuojami 1 GHz oscilografu ir perduodami į kompiuterį.



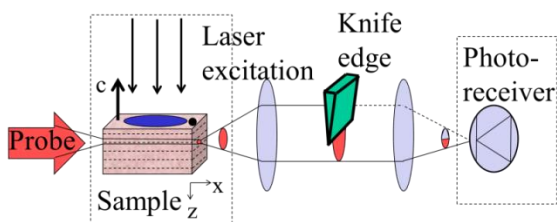
3.2 pav. Statmena žadinimo zondavimo konfigūracija, kai žadinama (a) statmenai c -ašies atžvilgiu ($k \perp c$) ir (b) lygiagrečiai ($k \parallel c$). (c) Lygiagreti žadinimo-zondavimo konfigūracija.



3.3 pav. Žadinimo zondavimo matavimo schema. Statmena konfigūracija parodyta ištisine linija, o lygiagreti – taškine linija. Zondavimui naudoti pastovios veikos lazeriai.

Fotoakustinio atsako (PAR) užregistravimui reikia modifikuoti zondo surinkimo dalį, uždengiant pusę spindulio, kaip parodyta 3.3 pav. Blokuojamoji juostelė labai padidina matavimo jautrumą. PAR dydis įvertinamas procentais imant signalo amplitudės santykį su signalo lygiu:

$$PAR = \frac{\Delta I}{I_0} \times 100 \% \quad (3.1)$$



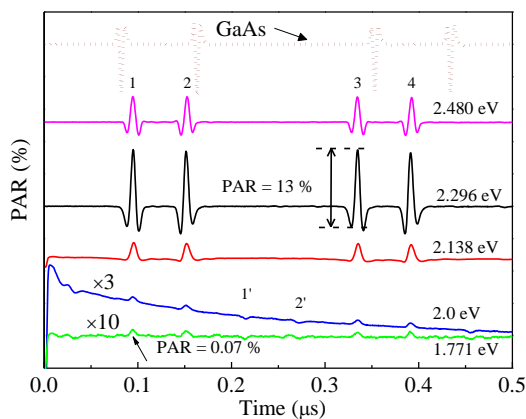
3.4 pav. Fotoakustinės bangos detektavimo principinė schema. Žadinimo impulsas sukuria slėgio bangą, kuri atlenkia zondą.

4. TlGaSe₂ rezultatai ir aptarimas

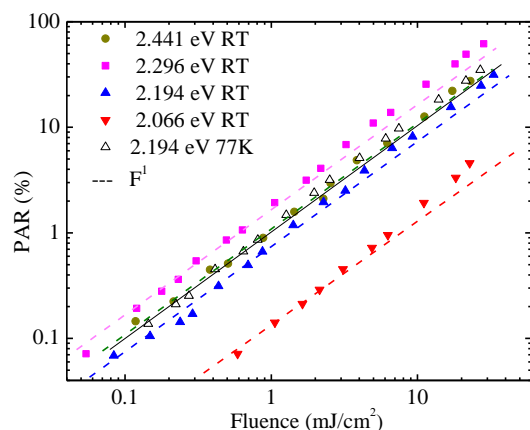
4.1. Fotoakustinis atsakas TlGaSe₂

Fotoakustinio atsako metodika tinka išmatuoti optinį sugerties kraštą mažo sugerties koeficiento medžiagose ($< 2000 \text{ cm}^{-1}$) kaip TlGaSe₂ ir kituose sluoksniuotuose puslaidininkiuose. PAR signalai, išmatuoti TlGaSe₂ $k \parallel c$ kryptimi, yra pavaizduoti 4.1 pav. Pirmasis (1) yra sugeneruotas PAR prie priekinio paviršiaus, antrasis (2) yra atspindys nuo galinio paviršiaus, trečiasis (3) yra atspindys nuo priekinio paviršiaus ir ketvirtasis (4) - atspindys nuo galinio paviršiaus. Atstumai tarp PAR atspindžių priklauso nuo akustinio greičio ir bandinio storio. Neiškreipta PAR forma rodo mažą akustinę dispersiją, amplitudė lėtai gęsta kelių μs trukmės intervale.

Esant mažai kvanto energijai, kai sugerties gylis yra mažas, kartu su PAR matomas ir laisvagrūvės sugerties kinetika (mėlyna ir žalia kreivės, 4.1 pav.). Kai kvantas yra dar mažesnis, jo užtenka prasiskverbti per kelių šimtų mikronų bandinį ir stebimas PAR papildomai generuojamas nuo galinio paviršiaus, kuris sklinda į priešingą pusę (pažymėta (1') ir (2')) 4.1 pav.). Nuo galinio paviršiaus suformuoti PAR yra priešingo poliarumo, nes PA registravimo eiliškumas blokuojančios juostelės atžvilgiu yra priešingas. Taip pat atgalinis PAR yra mažesnės amplitudės, nes šviesos intensyvumas yra mažesnis. Svarbu parinkti tinkamą zondavimo gylį, kad PAR nuo priekinio ir galinio paviršių nesusiliėtų zonduojamame taške ir signalai neiškraipytų vienas kito.

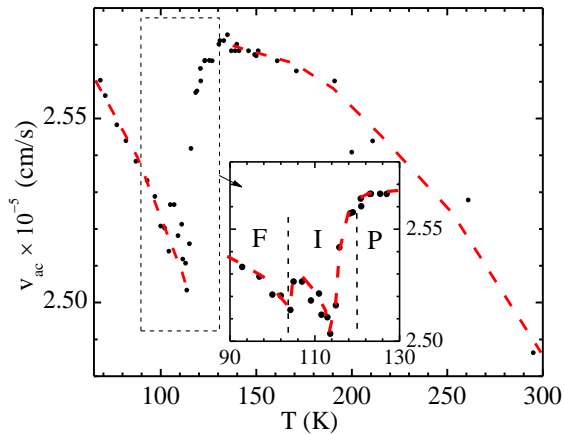


4.1 pav. Fotoakustinis atsakas TlGaSe₂ esant skirtingoms žadinimo energijoms. Atspindėjęs kelis kartus signalas išlaiko tą pačią formą. GaAs PAR poliarumas yra priešingas. [A4].



4.2 pav. PAR priklausomybė nuo energijos srauto 295 K ir 77 K temperatūroje. Plačioje sužadinimų srityje PAR išlaiko tiesinį augimą [A4].

PAR TlGaSe₂ plačiame spektriniame ruože 1.75 – 2.7 eV auga tiesiškai iki optinio pramušimo lygio (35 mJ/cm²) (4.2. pav.). Nedidelė supertiesinė dalis atsiranda dėl termoelastinio išsiplėtimo. Atsakas pasiekia netgi 70 % dydį ir nerodo įsisotinimo ženklų. Tuo tarpu GaAs puslaidininkyje PAR sotinasi kambario temperatūroje sužaditimui pasiekus ~5 mJ/cm², o 77 K temperatūroje - ~1 mJ/cm² ir amplitudė pasiekia tik 2 %.



4.3 pav. Akustinio greičio priklausomybė nuo temperatūros išmatuota naudojant PAR, kuri rodo fazinių virsmų P-I-F perėjimus.

generuojami TlGaSe₂ dėl didelės dn/dp vertės, bet ne dėl didelio deformacinio potencialo.

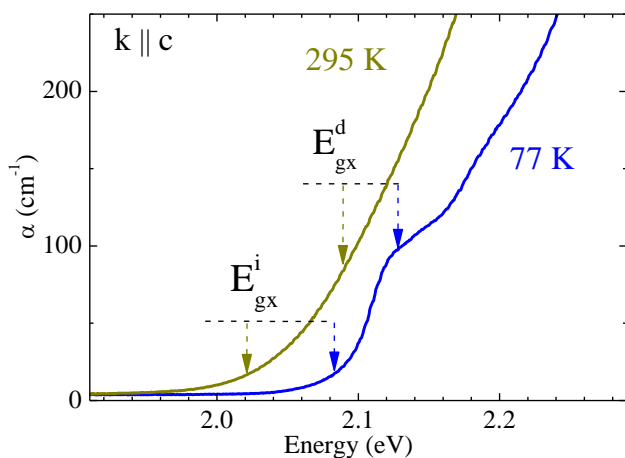
Naudojant PAR galima išmatuoti akustinį greitį, kurio temperatūrinės priklausomybės parodė gerai žinomas garso greičio anomalijas, pereinant iš paraelektrinės (P) per neapibrėžtą (I) į feroelektrinę (F) fazę 105 - 120 K srityje (4.2 pav.). P-I-F perėjimų struktūra labai gerai sutampa su literatūriniais duomenimis [25].

4.2. Sugerties spektrai

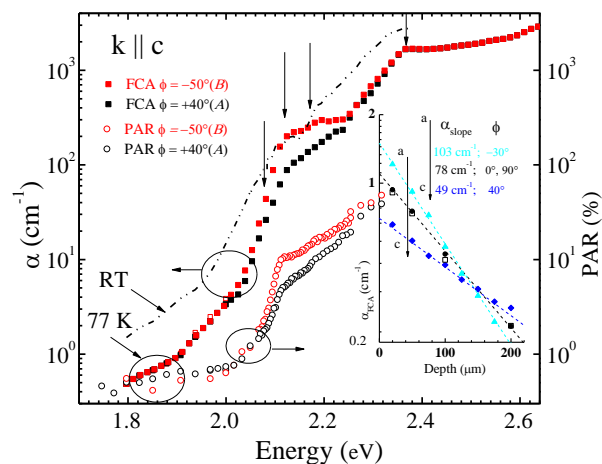
Optinė sugertis gauta su nepoliarizuota šviesa apšviečiant slukšnio plokštumą ($\mathbf{k} \parallel c$) yra parodyta 4.4 pav. 295 ir 77 K temperatūrose. Rodyklėmis pavaizduoti tiesiatarpio eksitono E_{gx}^d ir netiesiatarpio eksitono E_{gx}^i juostų tarpai. Energetinės padėtys buvo nustatytos modeliuojant rezultatus pagal 15 K temperatūros spektrą [26]. Matome, kad optinė sugertis yra maža palyginus su tiesiatarpiaisiais puslaidininkiais, kuriuose ji siekia dešimtis tūkstančių cm⁻¹. Maža sugertis yra būdinga ir kitiems slukšniuotiems puslaidininkiams, kur tiesiniai perėjimai yra iš dalies uždrausti dėl simetrijos taisyklių.

Perdavimo funkcijos dn/dp ženklas TlGaSe₂ yra teigiamas, kaip ir kituose 2D ir amorfiniuose puslaidininkiuose, tuo tarpu ženklas GaAs yra neigiamas ($dn/dp = -0.005$), būdingas 3D kristaliniams puslaidininkiniams [23]. Laikydami, kad dn/dp yra kaip slukšniuotuose InSe ir GaSe ($dn/dp = 0.045$) [24], mes įvertinome deformacinį potencialą TlGaSe₂ $d_{eh} = 3$ eV, kuris yra tris kartus mažesnis negu GaAs $d_{eh} = 10$ eV [9]. Taigi dideli PAR yra

Nustatyta ryšio energija yra 23.5 meV tiesiatarpiui eksitonui ir 100 meV netiesiatarpiui eksitonui. Gauti spektrai rodo, kad kristalas kambario temperatūroje yra optiškai vienašis ir jam yra būdingos tūrinio kristalo savybės.

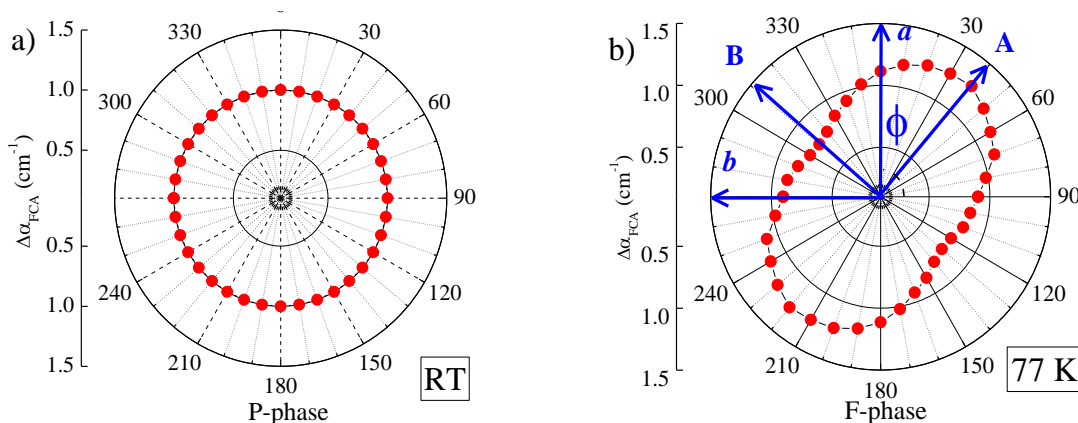


4.4 pav. Optinės sugerties spektrai nelegiruotame TlGaSe₂ išmatuoti nepolarizuotoje šviesoje 295 ir 77 K temperatūrose. Tiesiatarpio E_{gx}^d ir netiesiatarpio E_{gx}^i eksitonų energijos pavaizduotos rodyklėmis [A2].



4.5 pav. Sugerties spektrai polarizuotoje šviesoje 77 K temperatūroje iš FCA (pilnaviduriai tašk.) ir iš PAR (tuščiaviduriai skrit.) matavimų. Vertikalios rodyklės žymi kritines energijas. Punktyrine linija pavaizduota 295 K sugertis. Įterpinyje pavaizduoti FCA pasiskirstymo į gylį profiliai ($h\nu = 2.1$ eV) [A5].

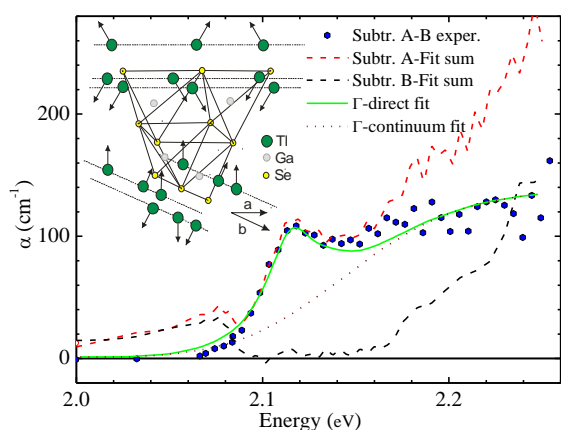
Žemoje temperatūroje kristalas transformuojasi į F -fazę, kur žadinant $k \parallel c$ kryptimi sugerties spektrai (FCA ir PAR) polarizuotoje šviesoje atskleidė papildomą sugerties anizotropiją (4.5 pav.). Sugerties anizotropija 77 K temperatūroje pasireiškia



4.6 pav. Sugerties polarizacinės priklausomybės esant 2.12 eV sužadimui (a) RT P -fazėje ir (b) 77 K F -fazėje. a ir b žymi kristalografines kryptis, o A ir B maksimumo/minimumo kryptis 77 K temperatūroje [A5].

plačioje srityje 2.06 - 2.26 eV. Eksponentiniai FCA pasiskirstymo į gylį profiliai (4.5 pav. įterpinyje) rodo, kad sugerties anizotropija yra tūrinė - pasireiškia per visą bandinio storį, o ne tik tam tikroje srityje. Poliarizacinės diagramos ties eksitono smaile ($h\nu = 2.12$) kambario (P -fazėje) ir 77 K temperatūroje (F -fazėje) pavaizduotos 4.6 pav. Spektrų anizotropiškumas atsiranda A ir B kryptimis nesutampantiomis su a ir b kristalografinėmis kryptimis. Šis reiškinys aiškinamas neekvivalentiniais Tl^+ katijonų postūmiais tarpsluoksnyje, kurie sukelia F -fazę $TlGaSe_2$. Jis buvo numatytas teoriškai [27, 28].

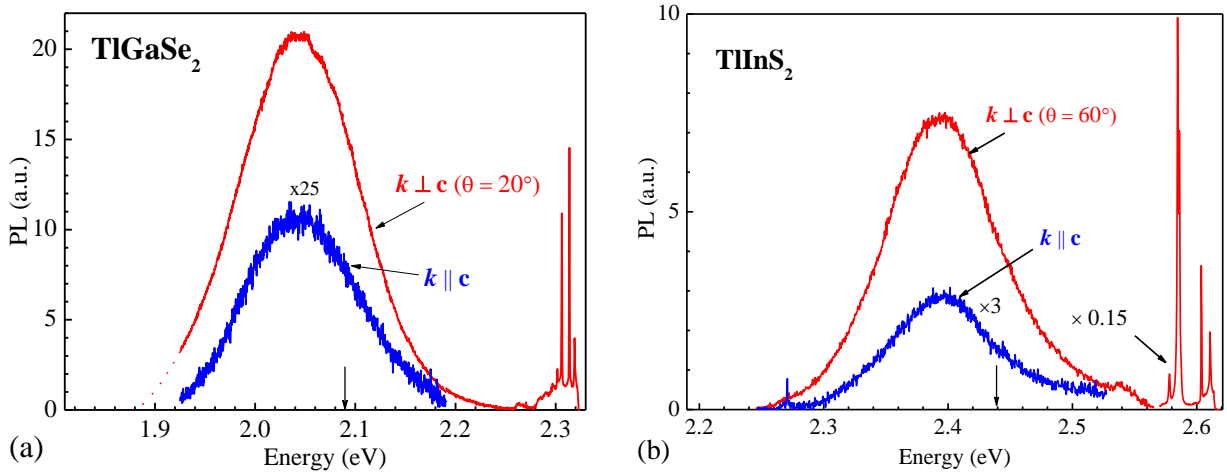
Atėmus minimumo spektrą iš maksimumo spektro ($A-B$) buvo gautas tiesiatarpio leidžiamo eksitono spektras 4.7 pav. Eksitonui aproksimuoti reikėjo jo osciliatoriaus stiprumą sumažinti 100 kartų kontinuumo atžvilgiu. Eksitono kontinuumas pavaizduotas taškine linija. Pritaikytas eksitono spektras buvo atimtas iš eksperimentinių sugerties kreivių ir gauti spektrai pavaizduoti punktyrinėmis linijomis. Matome, kad poliarizacinė priklausomybė yra būdinga tik eksitono aplinkoje, o žemiau juostos krašto ir aukščiau eksitono poliarizacinės priklausomybės nėra. Taigi silpni tiesiatarpia eksitoniniai perėjimai F -fazėje yra leidžiami tik A kryptimi. Galimi Tl atomų postūmiai aplink Ga_4Se_{10} tetraedrą tarp a ir b ašių yra pavaizduoti 4.7 pav. įterpinyje.



4.7 pav. Pavaizduotas A ir B spektrų atėminys (apskritimai), kuriam priderintas tiesiatarpio eksitono modelis (ištinė linija). Kontinuumo būsenos pavaizduotos taškine kreive, brūkšninės kreivės yra eksperimento ir aproksimacijos skirtuminės dalys, kurios nepriklauso nuo šviesos poliarizacijos [A5].

4.3. Liuminescencija ir sustiprinta sugertis

Mes atskleidėme kambario temperatūroje tarpjuostinė fotoluminescenciją (PL) $TlGaSe_2$ ir izostrukūriniame $TlInS_2$ konfokalinės mikroskopijos pagalba. Buvo tirti vienas nelegiruotas $TlInS_2$ ir devynios partijos $TlGaSe_2$ kristalų: penki nelegiruoti ir keturi legiruoti su Fe, Tb, B ir Al, įdedant 0.1-0.5 % priemaišų į lydalą. Žadinimui naudojome pastovios veikos 532 ir 473 nm bangos 60 μJ energijos lazerius sufokusuotus

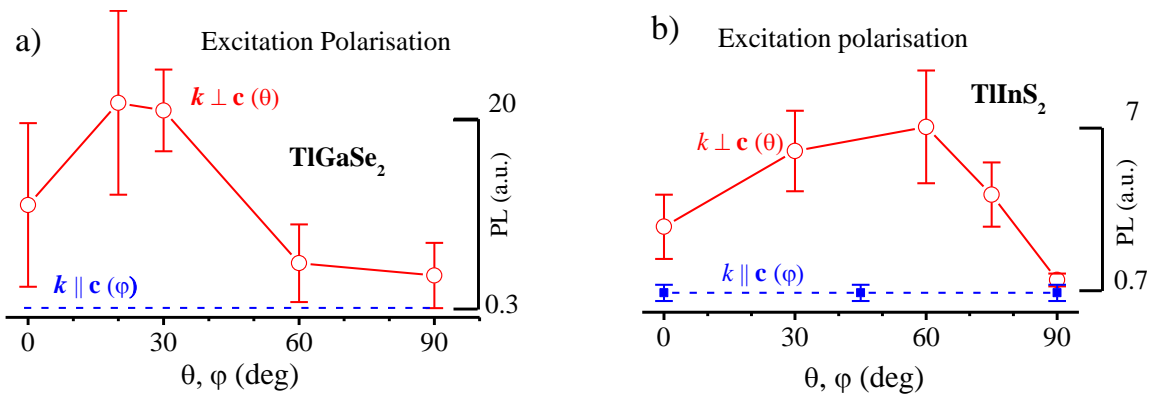


4.8 pav. Fotoluminescencijos ir Ramano spektrai išmatuoti ab plokštumoje (mėlyna) ir skersai sluoksniui (raudona) (a) TiGaSe_2 (žadinant $h\nu = 2.33$ eV) ir, (b) TIInS_2 (žadinant $h\nu = 2.62$ eV). Aštrios linijos yra Ramano sklaidos linijos [A3].

į ~ 0.2 μm dėmę. Taip pat buvo atlikti sugerties krašto matavimai kambario ir 77 K temperatūroje, panaudojant statmeną žadinimo zondavimo metodiką, statmenai ($\mathbf{k} \perp c$) ir lygiagrečiai ($\mathbf{k} \parallel c$) c -ašies atžvilgiu.

PL matavimai poliarizuotoje šviesoje atlikti TiGaSe_2 ir TIInS_2 bandiniuose yra pavaizduoti 4.8 pav., poliarizacinės priklausomybės pateiktos 4.9 pav. Rodyklės žymi eksitonų padėtis. PL spektrai buvo aproksimuoti Gausinėmis kreivėmis, kurių smailių energijos padėtys yra 2.042 ± 0.01 eV (TiGaSe_2) ir 2.395 eV (TIInS_2). Paklaida TiGaSe_2 šiuo atveju parodo variaciją skirtinguose bandinių grupėse. Kadangi bandiniuose su skirtingomis priemaišomis PL yra beveik vienoda, galima teigti, kad krašto liuminescencija silpnai priklauso nuo sanglaudos defektų, dažnai aptinkamų TiGaSe_2 .

$\mathbf{k} \parallel c$ kryptimi aptikta tik labai silpna liuminescencija, kuri nepriklauso nuo



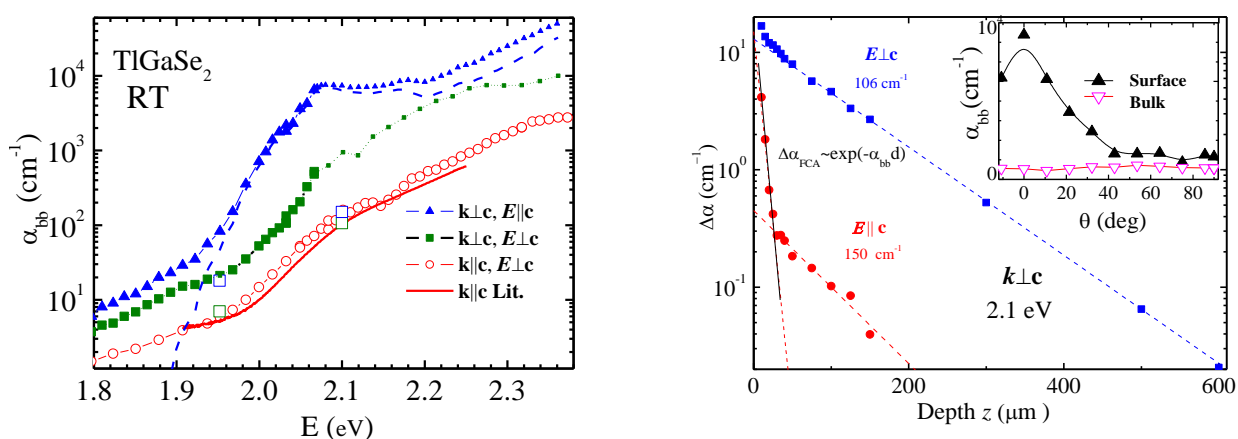
4.9 pav. Liuminescencijos priklausomybė nuo žadinančio spindulio poliarizacijos kampo, esant $\mathbf{k} \parallel c$ ir $\mathbf{k} \perp c$ konfigūracijoms a) TiGaSe_2 ir b) TIInS_2 [A3].

žadinančio spindulio poliarizacijos kampo abiejuose bandiniuose (4.9 pav.). Šia kryptimi TlGaSe₂ PL aptikta tik nelegiruotame bandinyje ir tik vienoje vietoje. PL $k \perp c$ kryptimi yra ženkliai didesnė negu $k \parallel c$ ir varijuoja priklausomai nuo matavimo vietos bandinyje (parodyta paklaidų žymėmis), ji yra stipresnė 7 kartus $\theta \approx 60^\circ$ (TlGaSe₂) ir >50 kartų $\theta \approx 20^\circ$ (TlInS₂).

PAR ir FCA matavimai $k \perp c$ ir $k \parallel c$ kryptimis TlGaSe₂ pavaizduoti 4.10 pav. (a). Žadinant $k \parallel c$ kryptimi kambario temperatūroje poliarizacinės priklausomybės nėra ir išmatuotas spektras puikiai sutapo su įprastais sugerties matavimais nepoliarizuotoje šviesoje [26].

Žadinant $k \perp c$ kryptimi aptikta smarki poliarizacinė priklausomybė plačioje spektrinėje srityje tarp $E \perp c$ ir $E \parallel c$ (E – elektrinio lauko vektorius) orientacijos. Abu $k \perp c$ sugerties spektrai yra didesni nei $k \parallel c$ spektrai, kai $E \perp c$: ties 1.9 eV - 4 kartus, ties 2.0 eV - 4 kartus ir ties 2.1 eV - 7 kartus; kai $E \parallel c$ sugerties padidėjimas yra dar didesnis: ties 1.9 eV - 8 kartus, ties 2.0 eV - 47 kartus, ties 2.1 eV - 100 kartų. Sugerties padidėjimas, kai $E \parallel c$, yra neįprastas, nes parodo, kad padidėja ne tik Γ -taško sugertis, o taip pat ir netiesiatarpiai optiniai šuoliai.

Atlikti sugerties pasiskirstymo į gylį matavimai parodė, kad sugerties padidėjimas yra aptinkamas tik paviršiniame sluoksnyje (4.9 pav. (b)). Matomi du eksponentiniai



4.10 pav. (a) Sugerties spektrai TlGaSe₂ skirtingose sužadavimo geometrijose išmatuoti su FCA (dideli simboliai) ir PAR (maži simboliai). Atviri kvadratai parodo sugerties koeficientus iš sugerties profilio į gylį, o linija – nepoliarizuotos šviesos matavimus [26]. Brūkšniuota linija rodo sugerties kreivę naudota PL aproksimacijai [A3]. (b) Laisvagrūvės sugerties pasiskirstymo į gylį profiliai $k \perp c$ kryptimi. Įterpinyje pavaizduotos paviršinės ir tūrinės sugerties poliarizacinės priklausomybės ($h\nu = 2.1$ eV) [A3].

sugerties profiliai. Tūrinėje srityje sugerties koeficientas atitinka įprastą sugerties vertę, kurios poliarziacinė priklausomybė nežymi. Visi padidėjusios sugerties efektai stebimi tik prie paviršiaus. Paviršinio sluoksnio storis įvertintas dviejuose šlifuojuose bandiniuose varijuoja tarp 40 – 100 μm . Tikėtina, kad apdirbant šoninį paviršių sluoksnis keičia mikroskopinę struktūrą ir pasikeičia sluoksnio optinės savybės.

Liuminescencijos spektras buvo aproksimuotas pagal sugerties spektro skaičiavimus (4.10 pav. (a) punktyrinė kreivė). Nustatyta, kad PL spektro forma gali būti paaiškinama tarpjuostiniais šuoliais, kai tiesiatarpio eksitono stiprumas juostos kontinuumo atžvilgiu mažinamas 100 kartų.

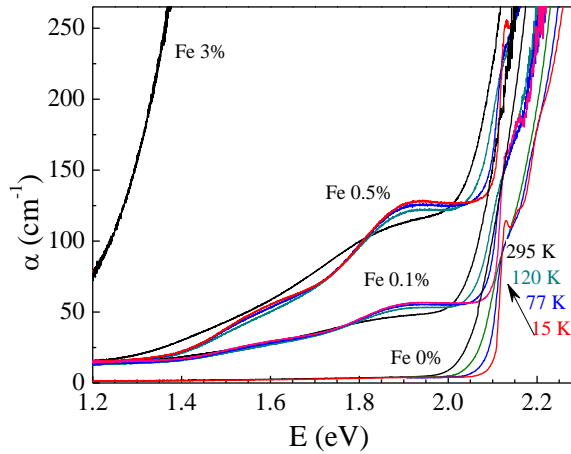
4.4. TlGaSe₂ legiruotas Fe priemaiša

Legiruotuose geležimi (Fe) bandiniuose aptikta priemaišinė sugertis, kuri didėja augant Fe koncentracijai (4.11 pav.). Galima išskirti persiklojančias tris juostas:, kurios didėjant temperatūrai plėtėja ir nežymiai slenka į mažesnių energijų sritį. Bandiniui su Fe = 3 % sugertis viršija detektavimo ribą. Kadangi TlGaSe₂ yra *p*-tipo puslaidininkis, tai priemaišinės sugerties padėtis rodo, kad Fe priemaišos lygmenys yra viršutinėje draustinių juostų tarpo dalyje, t.y. sukuria donorinius lygmenis. Optiniai šuoliai vyksta iš valentinės juostos į priemaišinės būsenas.

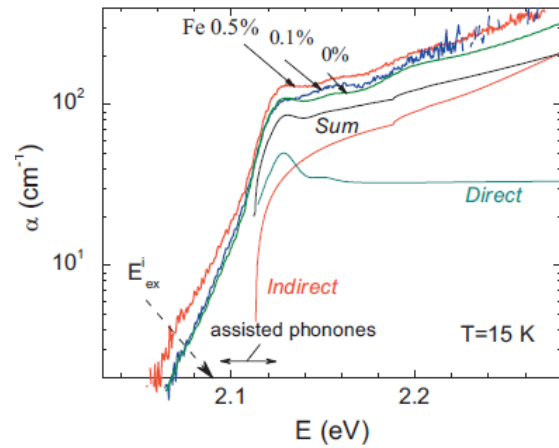
Sugertis buvo aproksimuota trimis giliais donoriniais lygmenimis (DL1, DL2, DL3) naudojant Lukovskio modelį ir pritaikant terminį bei struktūrinį lygmenų išplitimus. Nustatytos lygmenų padėtis $E(\text{DL1}) = 1.26 \text{ eV}$, $E(\text{DL2}) = 1.465 \text{ eV}$, $E(\text{DL3}) = 1.725 \text{ eV}$. Suskaičiuota priemaišinė sugertis buvo atimta iš spektrų 15 K temperatūroje, kaip pavaizduota 4.12 pav. Papildomai pavaizduotas suskaičiuotas spektras ir jo komponentės nelegiruotame TlGaSe₂ [26]. Matome, kad iš esmės Fe priemaiša sugerties krašto nepakeičia (iki 0.5% Fe). Likutinė sugertis priskirta nežinomoms seklioms priemaišoms, esančioms 60 meV žemiau krašto.

Priemaišų viršutinė koncentracijos riba buvo įvertinta laikant, kad Fe keičia Ga atomus baziniame tetraedre pagal jų valentingumą. Jeigu atomų yra $1.35 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, Fe priemaišų yra ne daugiau kaip $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Tikėtina, kad tik nedidelė Fe atomų dalis keičia Ga atomus.

Elektroninio parametrinio rezonanso (EPR) matavimais buvo užfiksuoti keturi Fe priemaišų vidiniai EPR rezonansai [29, 30]. Santykinai mažas Ga:4s elektronų indėlis



4.11 pav. Sugerties spektrai išmatuoti TiGaSe₂:Fe legiruotuose su 0.1, 0.5 ir 3 % priemaišų koncentracija keturiose temperatūrose [A1].



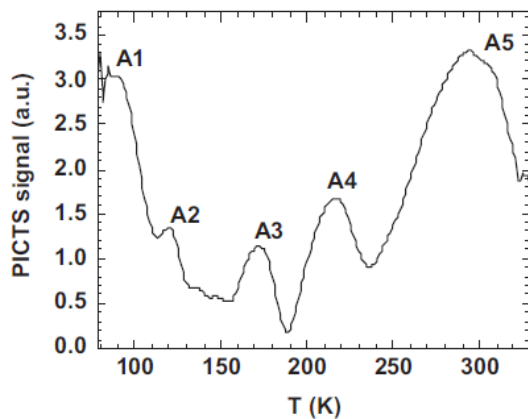
4.12 pav. Sugerties kraštas TiGaSe₂ po simuliuotos priemaišinės Fe sugerties atėmimo bandiniuose su Fe = 0.1 ir 0.5 % palygintas su nelegiruotu spektru 15 K temperatūroje [A1].

(~21 %) į Γ -taško laidumo juostos formavimą buvo apskaičiuotas teoriškai [31]. Taigi, spektriniais matavimais mes patvirtinome jog nedidelė Fe atomų įtaka, keičiant Ga atomus neįtakoja optinės sugerties krašto.

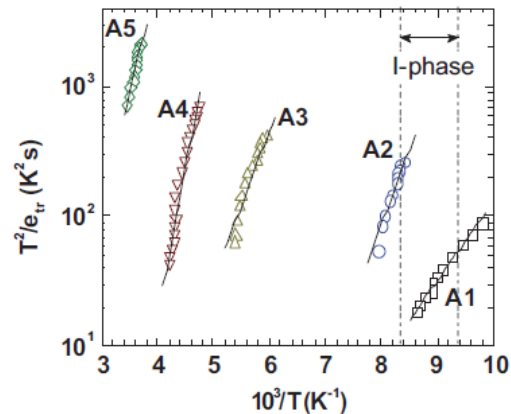
4.5. Krūvininkų pagavimas ir rekombinacija

Krūvininkų pagavimo ir rekombinacijos dinamika ištirta laisvagrūvės sugerties (FCA) metodais nelegiruotame TiGaSe₂ bandinyje ir lyginta su foto-indukuotos srovės dinamikos spektroskopijos (PICTS) prilipimo lygmenų matavimais.

PICTS kreivės pavaizduotos 4.13 pav. Smailės A1 – A5 parodo emisiją iš prilipimo



4.13 pav. PICTS spektras, kuris parodo pagrindinius penkis (A1 – A5) pagavimo centrus [A2].



4.14 pav. Arenijaus kreivės, iš kurių polinkio nustatytos pagavimo centrų aktyvacijos energijos [A2].

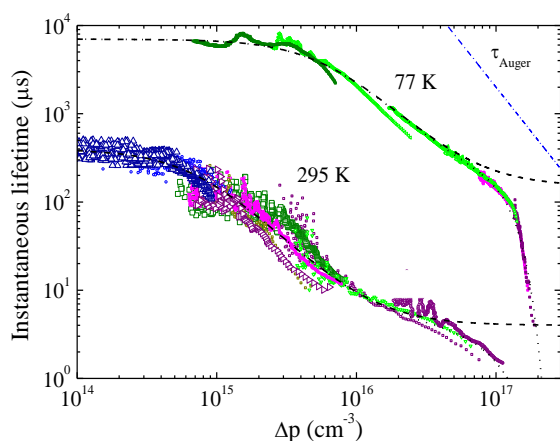
lygmenų. Arenijaus kreivės parodytos 4.14 pav., iš kurių polinkių nustatytos prilipimo lygmenų aktyvacijos energijos ir skerspjūviai atidėti 1 lentelėje. Prilipimo lygmenų tipas nustatytas netiesiogiai iš foto srovės temperatūrinio gesimo ar aktyvacijos. A1, A3 ir A5 lygmenys priskiriami akceptoriams, o A2 ir A4 prisikirti donoras, nes jų aktyvacijos srityje stacionari srovė gesinama. Donoriniai lygmenys 0.23 eV ir 0.45 eV pasižymi labai dideliu pagavimo skerspjūviu. Suminė pagavimo lygmenų koncentracija nustatyta iš FCA yra apie $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Mes priskiriame šiuos prilipimo lygmenis sanglaudos defektams.

1 lentelė. Prilipimo lygmenų parametrai TlGaSe_2 .

Lygmuo	T (K)	E_t (eV)	σ (cm^2)	tipas	n_t (PICTS) palyg.	N_t (cm^{-3})
A1	100-110	0.12	$1 \cdot 10^{-17}$	akceptorius	0.44	$2 \cdot 10^{15}$
A2	120-130	0.23	$4 \cdot 10^{-14}$	donoras	0.19	$5.3 \cdot 10^{15}$
A3	170-190	0.225	$2 \cdot 10^{-17}$	akceptorius	0.18	$1 \cdot 10^{15}$
A4	210-240	0.45	$1 \cdot 10^{-13}$	akceptorius	0.27	$7 \cdot 10^{14}$
A5	270-290	0.35	$2 \cdot 10^{-18}$	donoras	1	$4 \cdot 10^{15}$

Absoliutinė atskirų prilipimo lygmenų koncentracija buvo nustatyta iš akimirksnių gyvavimo trukmių matavimų, esant skirtingai temperatūrai (4.15 pav.), kurių koncentracijos N_t yra pateiktos 1 lentelėje.

Esant vidutiniam sužadanimui iš FCA pasiskirstymo į gylį profilių nestebima paviršinės rekombinacijos profilių. Galime teigti, kad krūvininkų difuzija yra mažesnė nei $0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$. Tačiau stiprus krūvininkų gyvavimo trukmės kritimas atsiranda esant dideliems sužadanimams tiek kambario, tiek 77 K temperatūrose (4.15 pav.). Šio kritimo negalima paaiškinti Ože rekombinacijos indėliu (brūkšniuota mėlyna linija). Gyvavimo trukmės priklausomybės aproksimuotos logistinėmis funkcijomis. Manome, kad didėjant krūvininkų injekcijai, staigiai padidėja krūvininkų difuzijos šuoliai tarp sluoksnių. Šis



4.15 pav. Akimirksninės nepusiausvyrų laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo sužadavimo 295 K ir 77 K temperatūrose. Aproksimacija atlikta logistinėmis funkcijomis (punktyrinės linijos). Ože rekombinacija pavaizduota taškine-punktyrine linija [A2].

padidėjimas sukelia elektronų ir skylių rekombinacijos sumažėjimą iki submikrosekundinės trukmės.

5. Fluorescuojantis 6H-SiC

6H-SiC bandiniai buvo užauginti greitos sublimacijos būdu ant 2 colių 6H-SiC (0001) padėklų su orientacijos kampu 1.40° link $[11\bar{2}0]$ krypties. Auginimo šaltinis buvo specialiai paruošto polikristalinio SiC padėklas, smarkiai legiruotas N ir B priemaisomis. Auginant azoto atmosferoje ir didinant slėgį galima papildomai įterpti N atomų. Priemaišų koncentracijos, nustatytos iš antrinių jonų masės spektroskopijos (SIMS) matavimo, kurios kartu su kitais bandinių parametrais parodytos 2 lentelėje. Keletas bandinių buvo supjaustyti į 5-7 mm ilgio juosteles su skerspjūviu $\approx(200 \times 500) \mu\text{m}^2$, kurių šoniniai paviršiai nušlifuoti, kad būtų tinkami statmenos žadinimo-zondavimo geometrijos matavimams.

Bandiniuose ELS111-118 fotoluminescencijos (PL) matavimai sužadinant 377 nm lazeriniu diodu parodė, kad *n*-tipo bandiniai liuminescuoja daug geriau negu *p*-tipo, t.y. donorų ir akceptorių koncentracijų skirtumas ($N_D - N_A$) didžiausias (žr. palyginimą 2 lentelėje). Didžiausias aptiktas kvantinis našumas yra 7 %. Gyvavimo trukmės matavimai $k \parallel c$ sužadavimo kryptimi vidutinio sužadavimo sąlygomis parodė, kad ilgiausios mikrosekundinės gyvavimo trukmės yra *n*-tipo ELS118 ir ELS117 bandiniuose (5.1 pav.). Mažėjant $N_D - N_A$ skirtumui gyvavimo trukmė ir liuminescencija akivaizdžiai mažėja. Taigi toliau nagrinėjami buvo tik *n*-tipo bandiniai.

Laisvagrūvės sugerties pasiskirstymas į gylį parodė tarpjuostinį sugerties koeficientą $\alpha_{bb} = 900 \text{ cm}^{-1}$ (5.2 pav.), kuris yra artimas nelegiruoto 6H-SiC koeficientui

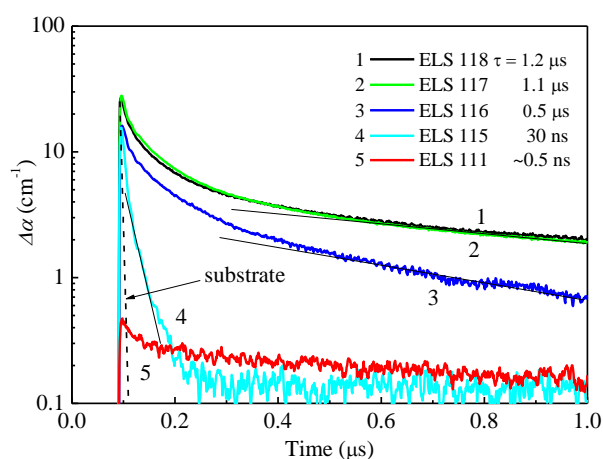
2 lentelė. Epitaksinių sluoksnių. *a) anglies inkluzija; *b) polikristalinė inkluzija.

Bandinys	storis (μm)	N (cm^{-3})	B (cm^{-3})	$N_D - N_A$ (cm^{-3})	PL palygin. intensyv.	Defektai (cm^{-2})
ELS 111	60	4.0×10^{18}	8.0×10^{18}	-4.0×10^{18}	0.0 %	
ELS 115	50	3.2×10^{18}	6.9×10^{18}	-3.7×10^{18}	6.6 %	
ELS 116	45	6.0×10^{18}	6.9×10^{18}	-0.9×10^{18}	8.3 %	
ELS 117	45	9.0×10^{18}	4.4×10^{18}	4.6×10^{18}	100.0 %	-
ELS 118	45	9.2×10^{18}	5.2×10^{18}	4.0×10^{18}	77.1 %	-
ELS 296	200	1.3×10^{19}	2.1×10^{18}	$\sim 1.1 \times 10^{19}$		10^1 *a)
ELS 297	200	1.1×10^{19}	4.0×10^{16}	$\sim 1.1 \times 10^{19}$		10^6 *a)
RF 18	130	4×10^{18}	2.5×10^{18}	1.5×10^{18}		10^1 - 10^2 *b)
RF 04	110	8×10^{18}	2.2×10^{18}	5.8×10^{18}		10^5 *b)

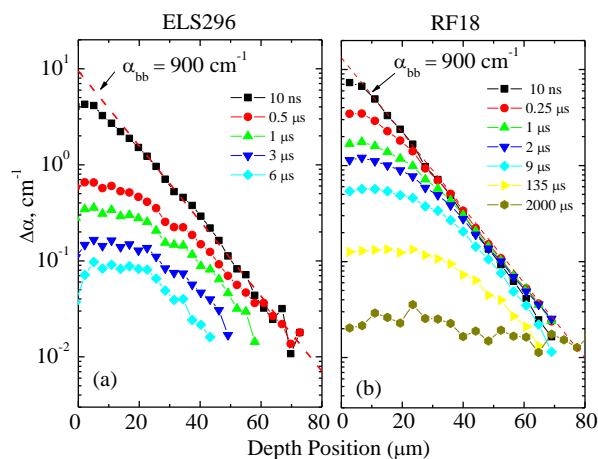
- $\alpha_{bb} \cong 1000 \text{ cm}^{-1}$. FCA profilis ties paviršiumi 5.2 pav. rodo, kad paviršinė rekombinacijos ir difuzijos įtaka yra maža ($S_{\text{eff}} < 10 \text{ cm/s}$). Tuo tarpu nelegiruotame 6H-SiC, ambipolinio sužadinimo režime profilių dinaminis užlinkimas ties paviršiumi rodo didelę paviršinės rekombinacijos įtaką [32].

Fotoindukuotų krūvininkų irimo kinetika aprašoma konkuruojančių procesų indėliais. Sugeneravus elektronų ir skylių porą, skylės sugaudoamos neigiamai įkrautais akceptoriais. Elektronai gaudomi N lygmenimis, tačiau dalinai išlieka laidumo juostoje. Dėl skylių reemisijos iš gaudyklių, atsiranda ilgos irimo kinetikos dedamosios, kurių indėlis priklauso nuo temperatūros. Nagrinėjant temperatūrines FCA kinetikas ($\ln(T_0/T) = \Delta\alpha d$) buvo išskirtos trys charakteringos τ_1 , τ_2 ir τ_3 trukmės ELS118 bandinyje (5.3 pav.). Jų vertės skiriasi bent eile, tai parodo, kad remisija vyksta iš skirtingų lygmenų.

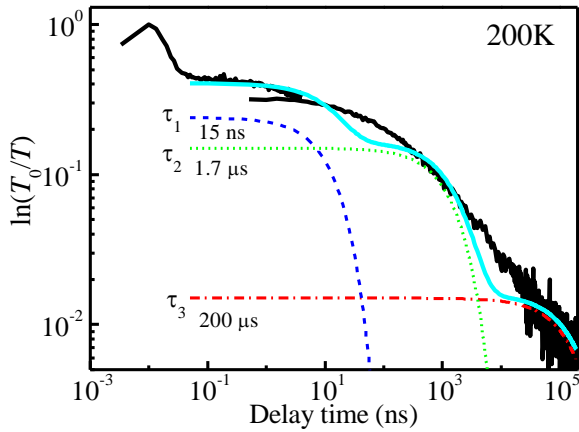
Dviejų greitesnių dedamųjų τ_1 ir τ_2 reemisijos trukmė mažėja nuo temperatūros, o amplitudė lieka tokia pati. Arenijaus grafikai parodė aktyvacijos energijas $200 \pm 30 \text{ meV}$ ir $500 \pm 120 \text{ meV}$, atitinkamai. Tuo tarpu τ_3 komponentė elgiasi priešingai: smarki amplitudės priklausomybė nuo temperatūros, bet reemisijos trukmė pastovi. Šiuo atveju, pagal Ichimura teoriją [33], jei gaudyklės amplitudė nuo temperatūros keičiasi, o reemisijos trukmė nesikeičia, gaudyklėje vyksta nepagrindinių krūvininkų rekombinacija su pagrindiniais krūvininkais. Tokio centro aktyvacijos energiją galima aprašyti



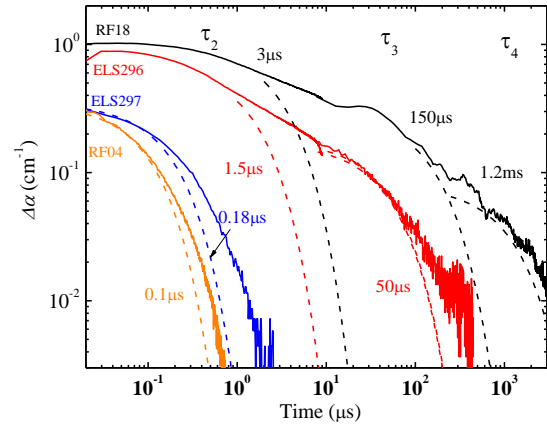
5.1 pav. Laisvagrūvės sugerties irimo kinetikos bandiniuose su skirtingu legiravimu. Ištraukta eksponentinė krūvininkų gyvavimo trukmė esant pastoviam sužadinimui [B3].



5.2 pav. Laisvagrūvės sugerties profiliai į gylį ELL296 ir RF18 bandiniuose skirtingais laiko momentais po sužadinimo [B5].



5.3 pav. Trys eksponentiniai procesai τ_1 , τ_2 , τ_3 priderinti prie eksperimentinės kreivės 200 K temperatūroje ELS118 bandinyje [B7].



5.4 pav. FCA kinetikos kambario temperatūroje skirtinguose bandiniuose. Eksponentiniai laikai parodyti brūkšniuota kreive [B5].

Arenijaus amplitudės grafiku atlikus jo amplitudės renormalizaciją pagal žemos temperatūros amplitudę - $T^{-3/2} (1 - R)/R$. Tokiu būdu išskaičiuota τ_3 dedamosios aktyvacijos energija yra 53 ± 5 meV. Apskaičiuotos energijos 200, 500 ir 53 meV buvo priskirtos sekliam boro (sB), giliam boro (dB) ir azoto (N) lygmenims, kurios yra šiek tiek mažesnės nei aptinkamos literatūroje: sB $\sim 220 - 350$ meV, dB $\sim 550 - 750$ meV ir N ~ 80 meV [34].

Skirtinguose bandiniuose FCA irimo kinetikos plačioje laiko skalėje pavaizduotos 5.4 pav., kur punktyrinės linijos parodo eksponentinę reemisijos trukmę. Bandiniuose su didele defektų koncentracija ELS297 ir RF04 reemisijos trukmės τ_2 yra gana trumpos - 100 ns ir 180 ns, atitinkamai. Mažiau defektuotuose ELS296 ir RF18 bandiniuose išskiriama daugiau komponentių: τ_2 yra ženkliai ilgesnė - nuo 1.5 iki 3 μ s; τ_3 komponentė ~ 50 ms ir τ_4 - siekia net 1.2 ms. Bandiniuose turinčiuose daugiau defektų τ_2 komponentė yra greitesnė, o lėtų dedamųjų išvis nėra. Šie atradimai patvirtina, kad pagreitinusi τ_2 trukmė yra susijusi su auginimo defektais.

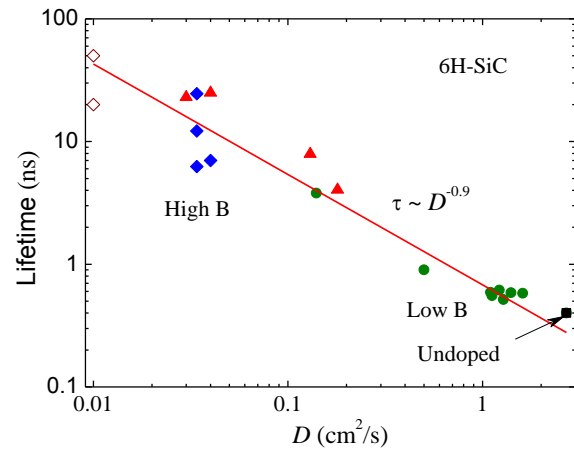
Dinaminių gardelių metodu buvo išmatuotos gyvavimo trukmės ir difuzijos koeficientai diapazone ties perėjimu į bipoliarinį sužadinimo režimą. Esant mažesniems sužadinimams ($\sim 10^{17}$ cm $^{-3}$) difuzijos koeficientai yra maži - 0.1 – 0.5 cm 2 /s, o gyvavimo trukmė - nuo kelių iki keliasdešimt nanosekundžių. Bandiniuose su skirtingomis boro koncentracijomis, sužadinimui artėjant prie boro koncentracijos, stebimas gyvavimo trukmės sumažėjimas ir difuzijos koeficiento padidėjimas. Šių parametų atvirkštinė koreliacija parodyta 5.5 pav., kuri siejama su tuo, kad padidėjus difuzijai, krūvininkai

gali lengviau pasiekti dominuojantį nespindulinį rekombinacijos centrą. Difuzija smarkiai išauga krūvininkų koncentracijai viršijus boro koncentraciją, kas buvo užfiksuota bandinyje su maža boro koncentracija. Taigi, eksperimentai rodo, kad bandinius reikia stipriai legiruoti boru, kuris per ps trukmes pagaudamas skyles, dėl atsirandančio vidinio elektrinio lauko sumažina elektronų difuziją ir prailgina nespindulinę gyvavimo trukmę.

Integruotos fotoluminescencijos matavimai nuo temperatūros parodė, kad PL spektras yra sudarytas iš dviejų aktyvios spinduliuotės juostų: 2.15 eV („Band 1“) ir 1.95 eV („Band 2“). Kambario temperatūroje jas galima aproksimuoti Gausinėmis kreivėmis (5.6 pav.). ELS118 ir ELS296 bandiniuose Gausų smailių padėtys šiek tiek skiriasi. Temperatūrinės priklausomybės parodė, kad mažėjant temperatūrai „Band 2“ smailė slenka į mažesnių energijų pusę ir tampa dominuojančiu spinduliniu centru. Tuo tarpu „Band 1“ smailės padėtis išlieka beveik nepakitusi, tačiau jo amplitudė mažėja ir ELS296 bandinyje netgi išnyksta žemiau 140 K temperatūros. Kai $T < 50$ K PL galima aprašyti tik „Band 2“ juosta, tuo tarpu kambario temperatūroje abiejų juostų indėlis beveik vienodas.

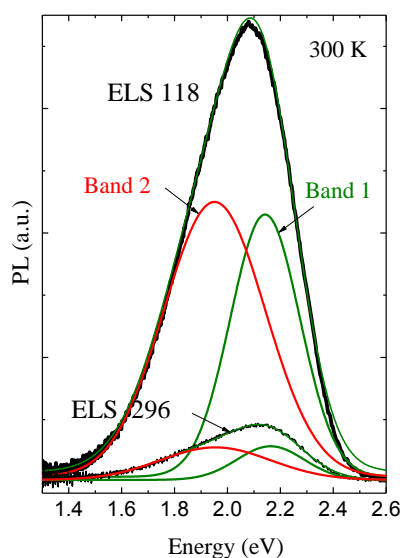
Žinant, kad gilus boro lygmuo (dB) yra dominuojantis akceptorius, kurio energija $\sim 550-750$ meV [11], „Band 2“ galima priskirti emisijai iš N pagavimo lygmens į dB. Dėl to, kad „Band 1“ intensyvumas didėja kylant temperatūrai, ši emisija gali būti priskirta šuoliams iš laidumo juostos (CB) į dB. Nors energetinių lygmenų skirtumai nevisiškai atitinka PL spektrų smailių energijos padėtis, galima manyti, kad priemaišiniai lygmenys yra smarkiai išplitę ir dalis energijos prarandama dėl fononinės sąveikos.

Apibendrinanti energijos juostų diagrama pavaizduota 5.7 pav. Išskaičiuotos aktyvacijos energijos atitinka sB (200 meV), dB (500 meV) ir N (53 meV) energijų lygmenis ir reemisijos laikai iš jų τ_1 , τ_2 ir τ_3 , atitinkamai. Juosta „Band 1“ ($h\nu_1 \cong 2.15$ eV) priskiriama elektronų šuoliams iš laidumo juostos į gilų boro lygmenį (CB-dB), o juosta „Band 2“ ($h\nu_2 \cong 1.95$ eV) – iš azoto donorinio lygmens į gilų boro lygmenį (N-

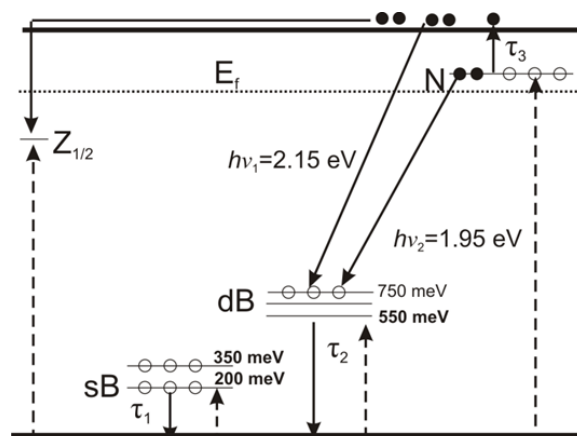


5.5 pav. Gyvavimo trukmė ir difuzijos koeficientas yra atvirkščiai proporcingi ir priklauso nuo boro koncentracijos.

dB). Papildomai pavaizduotas nespindulinis $Z_{1/2}$ kanalas. Neatitikimai tarp juostinės diagramos lygmenų ir liuminescencijos smailių padėčių energijų priskiriami fononų sukeltiems nuostoliams arba eksitoniniai sugerčiai per gilų pagavimo lygmenį. Tačiau pastarasis mažai tikėtinas dėl ekranavimo esant didelio sužadavimo sąlygomis.



5.6 pav. Fotoliuminescencijos aproksimacija dviem Gausinėmis kreivėmis. kambario temperatūroje ELS118 ir ELS296 bandiniuose [B4].



5.7 pav. Juostinė diagrama ir galimas rekombinacijos modelis.

6. 4H-SiC ploni epitaksiniai sluoksniai

4H-SiC plonų epitaksinių sluoksnių patikimumas galios prietaisuose smarkiai priklauso nuo paviršiaus pasyvavimo kokybės. Kadangi plonuose bandiniuose pasireiškia smarki paviršinė rekombinacija, tai sluoksniai turi būti tinkamai pasyvuoti mažinant nepageidaujamus krūvio praradimus [35]. Buvo tirti tokiu pat būdu užauginti 4H-SiC epitaksiniai sluoksniai pasyvuoti įprastu SiO_2 ir perspektyviu Al_2O_3 oksidais.

4H-SiC epitaksiniai sluoksniai užauginti cheminio garų nusodinimo (CVD) metodu ant 4H-SiC padėklų ($d = 330 - 345 \mu\text{m}$). n -tipo bandiniai buvo legiruoti azotu (N) $3 - 5 \times 10^{15}$ ir jų epitakso storis $8 - 15 \mu\text{m}$; p -tipo bandinys - aliuminiu (Al) 10^{17}cm^{-3} (dalinai aktyvuoti kambario temperatūroje), jo storis $8 \mu\text{m}$. (a) bandinyje SiO_2 yra natūraliai susiformavęs, (b) kokybiškas SiO_2 suformuotas CVD metodu, (c-d) Al_2O_3 užaugintas atominio sluoksninio nusodinimo būdu naudojant trimetilaliuminį ir vandenį kaip prekursorius. Sandūros oksidas/epitaksas radiacinis atsparumas tirtas, apšaudant sandūrą

skirtingomis Ar^+ jonų dozėmis, vienodai užaugintuose epiktasiniuose sluoksniuose, tik skirtingai pasyvuojant: (e) su SiO_2 ir (f) su Al_2O_3 . Bandinių parametrai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. 4H-SiC bandinių auginimo parametrai.

Paruošimo metodas	Epitakso storis (μm)	Tipas	Priemaišų koncentracija (cm^{-3})	Oksido tipas (storis nm)
(a)	15	<i>n</i> -tipas	$(3-5) \times 10^{15}$	SiO_2 natūralus (2)
(b)	15	<i>n</i> -tipas	$(3-5) \times 10^{15}$	SiO_2 (50)
(c)	15	<i>n</i> -tipas	$(3-5) \times 10^{15}$	Al_2O_3 (80)
(d)	7	<i>p</i> -tipas	1×10^{17}	Al_2O_3 (80)
(e)	8-10	<i>n</i> -tipas	$(3-5) \times 10^{15}$	SiO_2 (54)
(f)	8-10	<i>n</i> -tipas	$(3-5) \times 10^{15}$	Al_2O_3 (56)

Naudojant lygiagretaus žadinimo-zondavimo metodiką ir žadinant 355 nm ambipolinio sužadavimo sąlygomis ($\sim 7 \times 10^{17} cm^3$), išmatuotos FCA irimo kinetikos (6.1 pav. (a)), iš kurių nustatytos efektinės gyvavimo trukmės epitaksiniame sluoksnyje τ_{epi} . Greita rekombinacijos trukmė τ_{sub} priskiriama rekombinacijai padėkle, kuri buvo išmatuota atskirai iš padėklo pusės. Lėta irimo uodega atsiranda dėl krūvininkų prilimo. Suvidurkintos τ_{epi} vertės iš ne mažiau kaip 40 skirtingų vietų yra atidėtos 6.1 pav. (b) kartu su modeliuotomis rekombinacijos trukmių priklausomybėmis nuo epitakso storio ir paviršinės rekombinacijos greičio (SRV).

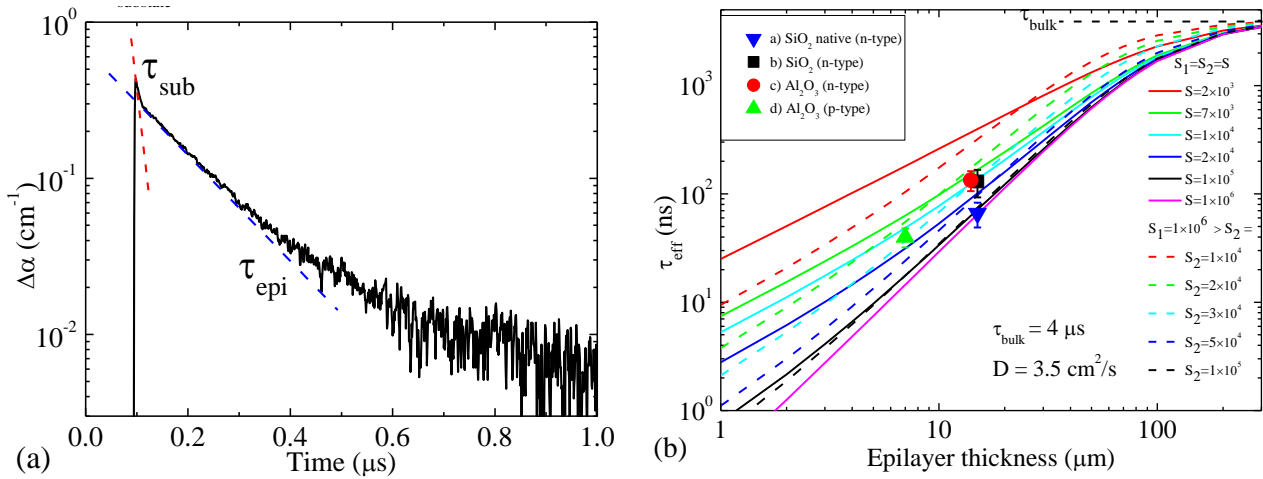
Sukurtas SRV modelis patenkina du atvejus, kai $S_1 = S_2$ ir kai $S_1 \gg S_2$, kur S_1 yra epitakso/padėklo sandūra, o S_2 yra epitakso/oksido sandūra:

$$\frac{1}{\tau_{epi}} \cong \frac{1}{\tau_{bulk}} + \left(\frac{d}{k^2 S_1} + \frac{d}{k^2 S_2} + \frac{4d^2}{k^2 D \pi^2} \right)^{-1}. \quad (6.1)$$

Čia k yra bedimensinis empirinis koeficientas, kuris parinktas taip, kad tenkintų simetrinį ir nesimetrinį atvejus:

$$k = 1 + 10^3 / \left(10^3 + \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \right). \quad (6.2)$$

Kai $S_1 = S_2$, tada $k = 2$ ir tenkinamas simetrinio atvejo sprendinys. Kai $S_1 \gg S_2$, $k = 1$, tenkinamas asimetrinis sprendinys. Tarpinėms vertėms S_2 vertėms k suteikia tolygų perėjimą prie kitos kraštinės sąlygos. Modeliavimui parinktas tipinis difuzijos koeficientas $D = 3.5 cm^2/s$, o tūrinė rekombinacijos trukmė τ_{bulk} tipiškai varijuoja nuo 0.3 iki 4 μs [36].

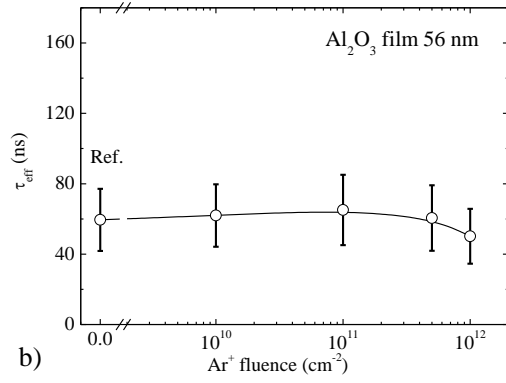
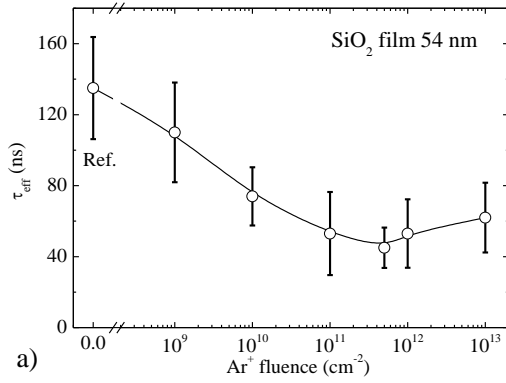


6.1 pav. (a) FCA kinetika ir efektinė gyvavimo trukmė τ_{epi} . (b) Sumodeliuotos gyvavimo trukmės kreivės priklausomybės nuo epitaksinio sluoksnio storio. Simuliuotos kreivės dviem atvejais: ištisinėmis linijomis pavaizduota $S_1 = S_2$ atvejis, o punktyrinėmis - $S_1 > S_2$ atvejis. Eksperimentinės gyvavimo trukmės atvaizduotos taškais [B1].

Modeliavimas atliktas dviem atvejais. Pirmasis, kai $S_1 = S_2 = S$, kur S parinktas nuo 2×10^3 cm/s iki 1×10^6 cm/s (6.1 pav. (b) ištisinės linijos). Matome, kad n -tipo su SiO_2 ir Al_2O_3 bei p -tipo epitaksinuose krūvininkų gyvavimo trukmė gali būti aprašyta tarp $S = 1 \times 10^4 - 2 \times 10^4$ cm/s. Bandinys su natūraliai susiformavusiu oksidu rodo didžiausią paviršinės rekombinacijos greitį $10^5 - 10^6$ cm/s.

Antras atvejis, kai $S_1 = 1 \times 10^6$ cm/s (padėklas/epitaksas) laikomas dideliu ir nekintamu – apspręstu auginimo technologijos, o S_2 galima varijuoti keičiant pasyvavimo technologiją (6.1 pav. (b) punktyrinės linijos). Priderinimas parodė, kad $S_2 = 4 \times 10^4$ cm/s n -tipo epitakse ir apie 3×10^4 cm/s p -tipo epitakse. Bandinys su natūraliu oksidu aprašomas vėlgi parodo aukščiausią SRV - $S_2 > 1 \times 10^5$ cm/s.

Atlikti matavimai sandūros atsparumui tikrinti bombarduojant skirtingomis Ar jonų koncentracijomis bandinių serijose (e) ir (f). Krūvininkų gyvavimo trukmės atidėtos nuo Ar jonų dozės 6.2 pav. Pasyvuotų sluoksnių su SiO_2 rekombinacijos trukmė mažėja iki 5×10^{11} cm⁻² dozės. Su Al_2O_3 oksidu pasyvuotu defektinė gyvavimo trukmė nemažėja. Tai rodo, kad Al_2O_3 yra geresnis oksidas radiacinėje aplinkoje. Šie matavimai sutapo su talpos-įtampos matavimais, kur plokščių juostų postūmis kaip ir gyvavimo trukmės kritimas užfiksuoti ties tomis pačiomis Ar jonų koncentracijomis. Tai rodo, kad Al_2O_3 gali būti tinkamesnis pakaitalas oksiduoti SiC ir taikyti radiacinėje aplinkoje, kur dominuoja elastinė (branduolinė) sklaida.

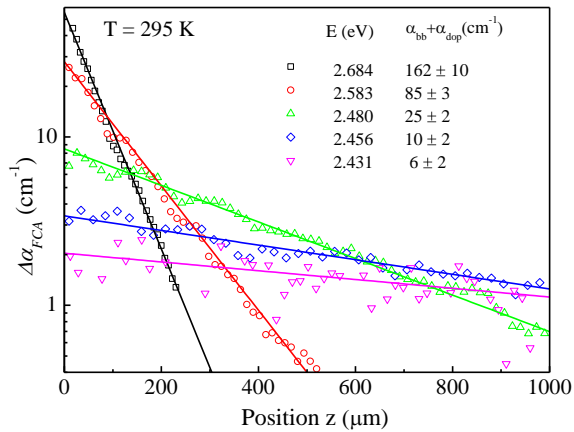


6.2 pav. Efektinė gyvavimo trukmė epitaksiniame sluoksnyje bombarduojant skirtingomis Ar jonų dozėmis (a) SiO₂/SiC ir (b) Al₂O₃/SiC sandūras [B2].

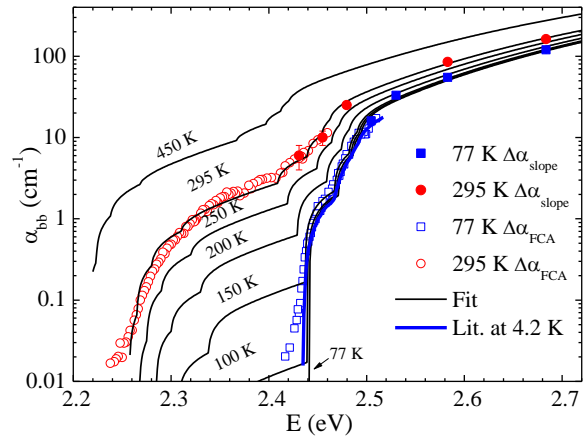
7. 3C-SiC atskirtas nuo padėklo epitaksinis sluoksnis

3C-SiC užaugintas CVD metodu (Hoya Ltd.) ant banguotų Si (001) padėklų [37]. Legiravimas azoto įvertintas $(1 - 3.5) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Ėsdinant pašalinus Si padėklą ir po to nušlifavus buvo gautas epitaksinis 160 μm storio 3C-SiC sluoksnis, kuriame nustatytos liekamųjų deformacijų sritys išilgai paviršių.

Žadinant $k \perp c$ (c - auginimo kryptis) kryptimi išmatuoti FCA pasiskirstymai į gylį nuo kvanto energijos pavaizduoti 7.1 pav., kurių polinkiai parodo tarpjuostinį sugerties koeficientą ir buvo panaudoti kaip absoliutiniai taškai santykiniams matavimas



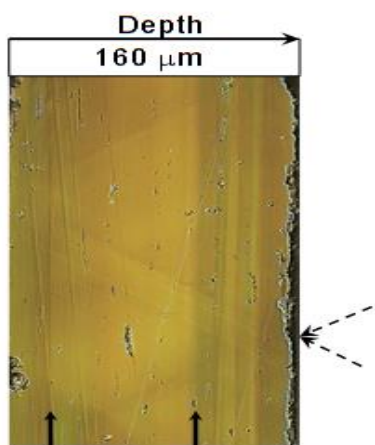
7.1 pav. Eksponentiniai FCA pasiskirstymo į gylį profiliai parodyti penkioms kvanto energijoms, kurių polinkiai parodo tarpjuostinį sugerties koeficientą [B9].



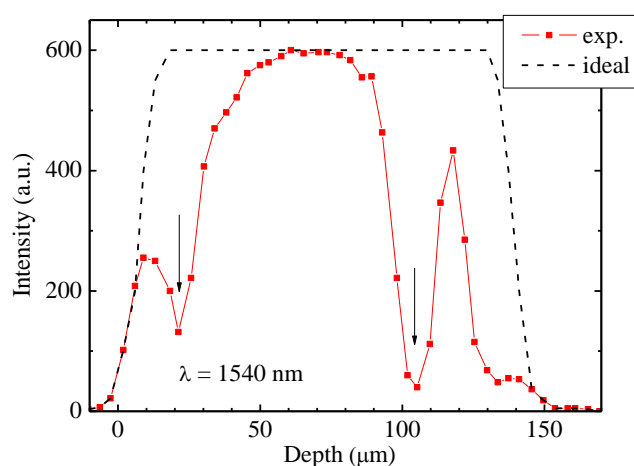
7.2 pav. Pilnaviduriai taškai rodo sugertį iš FCA gylio profilių iš 7.1 pav., tuščiaviduriai – FCA amplitudės matavimai, stora mėlyna linija - 4.2 K spektras [40]. Multi fononinės sugerties aproksimacijos parodytos ištisinėmis linijomis [B9].

(pilnaviduriai tšk. 7.1 pav.). Iš FCA matavimų nustatytas tarpjuostinės sugerties kraštas priemaišinėje srityje iki 0.01 cm^{-1} . Įprastais matavimais sugerties krašto negalima išmatuoti žemiau 5 cm^{-1} dėl donorų sukeltos stacionarios sugerties.

Juoda linija 7.2 pav. pavaizduoti sugerties spektro matavimai 4.2 K temperatūroje [38], kurie gerai sutampa su mūsų matavimais 77 K temperatūroje. Kambario temperatūroje (295 K) sugerties spektras rodo laiptuotą struktūrą žemiau sugerties krašto ($E_g \cong 2.36 \text{ eV}$), kas yra būdinga netiesiatarpiai sugerčiai, įskaitant fononų absorbciją ir emisiją. Sugerties kraštas buvo aproksimuotas įskaitant 4 fononus, kurių energijos imamos iš liuminescencijos spektrų [39]. Fononų emisijos/absorbcijos parametrai parinkti taip, kad keičiant tik temperatūrą paašškintų 295 ir 77 K rezultatus.



7.3 pav. 3C-SiC epitaksinio sluoksnio skerspjūvis poliarizuotoje šviesoje. Storos linijos parodo deformuotas sritis, o punktyrinės - DPD defektų kryptis [B8].

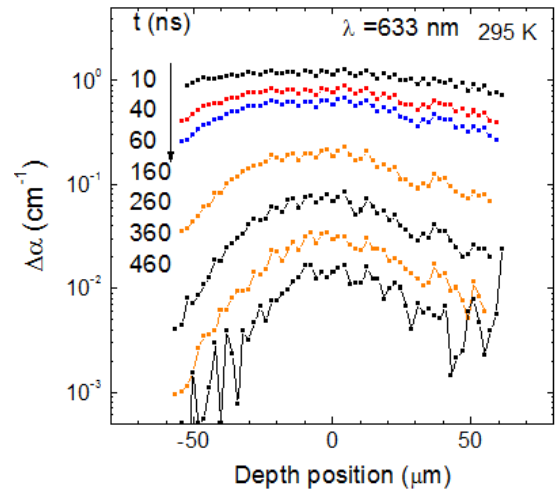


7.4 pav. 3C-SiC pralaidumo (1540 nm) profilis išilgai skerspjūvio. Rodyklės rodo deformacijų ribas. Punktyrine linija parodytas profilis be įtempimo [B8].

3C-SiC epitaksinio sluoksnio skerspjūvio nuotrauka poliarizuotoje šviesoje pavaizduota 7.3 pav. Punktyrinės linijos rodo DPB defektų kryptis, o ištisinės rodyklės – deformuoto sluoksnio ribas. Zonduojant su 1540 nm zonu išilgai skerspjūvio gautas 3C pralaidumo profilis pavaizduotas 7.4 pav. raudona linija, kur rodyklėmis pažymėtos tam tikros sandūros tarp deformuotų/nedeformuotų sluoksnių. Įprastas pralaidumo profilis pavaizduotas punktyrine linija.

FCA pasiskirstymas į gylį buvo matuotas žadinant $\mathbf{k} \parallel c$ kryptimi (į epitaksinio sluoksnio paviršių), o zonduota - per skerspjūvį (išilgai deformacijos krypties) skirtingais laiko momentais po sužadavimo (7.5 pav.). Bandinio centre nustatytas sluoksnis su

didele 100 ns gyvavimo trukme. Gyvavimo trukmė mažėja artėjant prie deformuotų zonų, dėl to FCA profilis mažėja artėjant prie paviršių. Nors FCA mažėjimas panašus į paviršinės rekombinacijos įtakotą profilį, tačiau dinaminių gardelių metodu nustatytas difuzijos koeficientas yra tik $1.4 \text{ cm}^2/\text{s}$. Taigi, esant 100 ns trukmei, paviršinė rekombinacija negali paaiškinti FCA stebėjimo, todėl manome, kad gyvavimo trukmės sumažėjimas yra susijęs su deformuoto sluoksnio defektais, kurie sumažina tūrinę gyvavimo trukmę. Neseniai gyvavimo trukmių žemėlapi išmatavo Kato ir kt. [41], kur parodyta, kad fotolaidumo irimo trukmė yra mažesnė deformuotose vietose. Taigi prietaisų aktyvią sritį reikia pasirinkti nedeformuotose kristalo zonose.



7.5 pav. FCA pasiskirstymai į gylį skirtingais laiko momentais, kai pozicija 0 nustatyta bandinio centre [B8].

8. Pagrindinės išvados

Buvo panaudotas naujas būdas, kaip ištirti TlGaSe_2 optinio krašto sugerties spektrą, remiantis fotoakustiniu reiškiniu pagal *Schlieren* optinę schemą. Aptikta sugerties anizotropija žemoje temperatūroje (F-fazėje) sluoksnio plokštumoje. Šios anizotropijos nėra paraelektinėje P-fazėje kambario temperatūroje. Pirmą kartą TlGaSe_2 buvo aptikta tarpjuostinė fotoluminescencija kambario temperatūroje. Priderintas tiesiatarpės sugerties spektro modelis su 100 kartų sumažintu tiesiatarpio eksitono indėliu leido paaiškinti tiek sugerties anizotropiją žemoje temperatūroje, tiek luminescenciją kambario temperatūroje. Pirmą kartą parodyta, kad Γ tiesiatarpis eksitonas yra poliarizuotas skersai sluoksnių. Nustatytos didžiausios koncentracijos elektronų gaudyklių lygmenų padėtys ($E_C-0.23$ ir 0.45 eV) ir jų suminė koncentracija $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Aptiktas staigus krūvininkų gyvavimo trukmės kritimas, kai injekcija viršija 10^{17} cm^{-3} . Tokio staigaus padidėjimo negali paaiškinti Ože rekombinacija, todėl jis buvo priskirtas bipolinei rekombinacijai tarp sluoksnių dėl difuzijos padidėjimo. Ištirtas priemaišinių

sugerties juostų atsiradimas, kai $TlGaSe_2$ legiruojamas Fe atomais. Nustatyta, kad Fe kuria tris aktyvius donorinius lygmenis ir bent iki 0.5% Fe koncentracijos nepakeičia $TlGaSe_2$ nuosavos sugerties krašto struktūros.

Išnagrinėti optiniai ir rekombinaciniai procesai aukštos kokybės 6H-SiC epitaksiniuose sluoksniuose, kurie auginami stipriai legiruojant N-donorais ir B-akceptoriais. Nustatytas labai mažas nepagrindinių krūvininkų difuzijos koeficientas ir silpna paviršinė rekombinacija esant vidutiniam bei mažam sužadimui. Mikrosekundinę krūvininkų reemisijos trukmę šioje medžiagoje lemia skylių aktyvacija iš gilaus ir seklaus boro lygmenų. Nustatyta, kad liuminescencijos spektras yra sudarytas iš dviejų plačių persiklojančių komponenčių. Viena iš jų sąlygota optiniais šuoliais iš azoto į gilų boro lygmenį, kita šuoliais iš laidumo juostos į gilų boro lygmenį.

Palyginta vienodai užaugintų ir pasyvuotų 4H-SiC epitaksinių sluoksnių kokybė, kai paviršius padengtas įprastu SiO_2 ir alternatyviu Al_2O_3 oksidais. Nors įprastomis sąlygomis abiejų sluoksnių gyvavimo trukmės ir paviršinės rekombinacijos greičiai panašūs, tačiau bombarduojant Ar^+ jonais matyti, kad Al_2O_3 oksidas ir sandūra yra atsparesni radiacijai nei SiO_2 .

Ant banguoto Si (100) padėklo užauginto 3C-SiC epitaksiniai sluoksniai turi daug mažiau defektų, tačiau nuo padėklo atskirtame epitaksiniame sluoksnyje išilgai augimo krypties atsiranda liekamųjų įtempimo deformacijų. Deformacijos ties paviršiais smarkiai mažina krūvininkų gyvavimo trukmę. Aptikta, kad sluoksniuose egzistuoja aukštos kokybės 3C-SiC vidinis sluoksnis, pasižymintis palyginti didele gyvavimo trukme, o jo sugerties kraštas atitinka tobulo kristalo fononinę struktūrą.

Literatūros sąrašas

- [1] A. M. Panich, *Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors*, J. Phys.: Condens. Matter. **20**, 293202 (2008).
- [2] M. Y. Seyidov, Y. Sahin, D. Erbahar, and R. A. Suleymanov, *Electret states and current oscillations in the ferroelectric semiconductor $TlGaSe_2$* , Phys. Status Solidi A, **203**, 3781 (2006).

- [3] M. Y. Seyidov, R. A. Suleymanov, and F. Salehli, *Phase-matched second-harmonic generation due to thermal expansion of TlGaSe₂ layered crystal*, Physics Letters A, **376**, 643 (2012).
- [4] V. Grivickas, V. Birkbajevs, V. Gavryushin, and J. Linnros, *Strong photoacoustic pulses generated in TlGaSe₂ layered crystals*, J. Phys.: Conf. Ser. **100**, 042007 (2008).
- [5] K. R. Allakhverdiev, T. G. Mammadov, R. A. Suleymanov and N. Z. Gasanov, *Deformation effects in electronic spectra of the layered semiconductors TlGaS₂, TlGaSe₂ and TlInS₂*, J. Phys.: Condens. Matter. **15**, 1291 (2003).
- [6] M. Y. Seyidov and R. A. Suleymanov, *Negative thermal expansion due to negative area compressibility in TlGaSe₂ semiconductor with layered crystalline structure*, J. Appl. Phys., **108**, 063540 (2010).
- [7] M. Y. Seyidov, R. A. Suleymanov, E. Yakar, N. A. Abdullayev, and T. G. Mammadov, *Effect of electric field on negative linear expansion of ferroelectric-semiconductor TlGaSe₂*, J. Appl. Phys. **106**, 063529 (2009).
- [8] M. Y. Seyidov, R. A. Suleymanov, E. Yakar, N. A. Abdullayev, and T. G. Mammadov, *Effect of electric field on negative linear expansion of ferroelectric-semiconductor TlGaSe₂*, J. Appl. Phys. **106**, 063529 (2009).
- [9] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/>
- [10] S. Kamiyama, M. Iwaya, T. Takeuchi, I. Akasaki, M. Syväjärvi, and R. Yakimova, *Fluorescent SiC and its application to white light-emitting diodes*, J. Semicond. **32**, 013004 (2011).
- [11] S. Kamiyama, T. Maeda, Y. Nakamura, M. Iwaya, H. Amano, I. Akasaki, H. Kinoshita, T. Furusho, M. Yoshimoto, T. Kimoto, J. Suda, A. Henry, I. G. Ivanov, J. P. Bergman, B. Monemar, T. Onuma, and S. F. Chichibu, *Extremely high quantum efficiency of donor-acceptor-pair emission in N-and-B-doped 6H-SiC*, J. Appl. Phys. **99**, 093108 (2006).
- [12] H.-S. Lee, M. Domeij, C.-M. Zetterling, M. Östling, F. Allerstam, and E. O. Sveinbjörnsson, *Surface passivation oxide effects on the current gain of 4H-SiC bipolar junction transistors*, Appl. Phys. Lett., **92**, 082113 (2008).
- [13] R. Singh, *Reliability and performance limitations in SiC power devices*, Microelectron. Reliab., **46**, 713, (2006).

- [14] Y. Zhang, B. Zhang, Z. Li, X. Deng and X. Liu, *The effect of the surface recombination on current gain for 4H-SiC BJT*, IEEE (EDSSC), 491 (2009).
- [15] M. Wolborski, M. Bakowski, A. Ortiz, V. Pore, A. Schöner, M. Ritala, M. Leskelä, A. Hallén, *Characterisation of the Al₂O₃ films deposited by ultrasonic spray pyrolysis and atomic layer deposition methods for passivation of 4H-SiC devices*, Microelectron. Reliab., **46**, 743 (2006).
- [16] A. Schöner, M. Krieger, G. Pensl, M. Abe, and H. Nagasawa, *Fabrication and Characterization of 3C-SiC-Based MOSFETs*, Chem. Vapor. Depos., **12**, 523 (2006).
- [17] G. Manolis, *Optical and Electrical Properties of Highly Excited 3C-SiC Crystals and Heterostructures*, Doctoral thesis, Vilnius University, Vilnius, Lithuania (2013).
- [18] Y. Sun, S. Izumi, S. Sakai, K. Yagi, and H. Nagasawa, *Saddle-shape warpage of thick 3C-SiC wafer: Effect of nonuniform intrinsic stress and stacking faults*, Phys. Status Solidi B, **249**, 555 (2011).
- [19] J. Linnros, *Carrier lifetime measurements using free carrier absorption transients. I. Principle and injection dependence*, J. Appl. Phys., **84**, 275 (1998).
- [20] P. Ruello and V. E. Gusev, *Physical mechanisms of coherent acoustic phonons generation by ultrafast laser action*, Ultrasonics, **56**, 21 (2015).
- [21] B. Sullivan and A. C. Tam, *Profile of laser-produced acoustic pulse in a liquid*, J. Acoust. Soc. Am. **75**, 437 (1984).
- [22] M. W. Sigrist, *Laser generation of acoustic wave in liquids and gases*, J. Appl. Phys. **60**, R83 (1986).
- [23] B. Weinstein, R. Zallen, M. Slade, and A. deLozanne, *Photoelastic trends for amorphous and crystalline solids of differing network dimensionality*, Phys. Rev. B, **24**, 4652 (1981).
- [24] F. J. Manjon, Y. van der Vijver, A. Segura, and V. Muñoz, *Pressure dependence of the refractive index in InSe*, Semicond. Sci. Tech., **15**, 806 (2000).
- [25] Yu. V. Ilisavskii, V. M. Sternin, R. A. Suleimanov, F. M. Salaev, M. Yu. Seidov, *Sov. Phys. – Solid State*, **33**, 57-60 (1991).
- [26] V. Grivickas, V. Bikbajevs, and P. Grivickas, *Indirect absorption edge of TlGaSe₂ crystals*, Phys. Status Solidi. B **243**, R31 (2006).

- [27] K. A. Yee, Th. A. Albright, *Bonding and structure of gallium thallium selenide (GaTlSe₂)*, J. Amer. Chem. Soc. **113**, 6474 (1991).
- [28] H. D. Hochheimer, E. Gmelin, W. Bauhofer, C. von Schnering-Schwarz, H. G. von Schnering, J. Ihringer, and W. Appel, *Study of the ferroelectric phase transition of TlGaSe₂ by dielectric, calorimetric, infrared and X-ray diffraction measurements*, Z. Phys. B – Condens. Mat., **73**, 257 (1988).
- [29] F. A. Mikailov, B. Z. Rameev, S. Kazan, F. Yildiz, T. G. Mammadov, and B. Aktas, *EPR spectra of Fe³⁺ centers in layered TlGaSe₂ single crystal*, Sol. St. Commun. **133**, 389 (2005).
- [30] M. Acikgoz, S. Kazan, F. A. Mikailov, T. G. Mammadov, and B. Aktaş, *Structural phase transitions in Fe³⁺ -doped ferroelectric TlGaSe₂ crystal*, Solid State Commun., **145**, 539 (2008).
- [31] S. Kashida, Y. Yanadori, Y. Otaki, Y. Seki, and A. M. Panich, *Electronic structure of ternary thallium chalcogenide compounds*, Phys. Status Solidi A, **203**, 2666 (2006).
- [32] A. Galeckas, J. Linnros, M. Frischholz, V. Grivickas, *Optical Characterization of Excess Carrier Lifetime and Surface Recombination in 4H/6H-SiC*, Appl. Phys. Lett., **79**, 365 (2001).
- [33] M. Ichimura, *Temperature dependence of a slow component of excess carrier decay curves*, Solid-State Electron., **50**, 1761 (2006).
- [34] A. A. Lebedev, *Deep level centers in silicon carbide: A review*, Semiconductors, **33**, 107 (1999).
- [35] H.-S. Lee, M. Domeij, C.-M. Zetterling, M. Östling, F. Allerstam, and E. O. Sveinbjörnsson, *Surface passivation oxide effects on the current gain of 4H-SiC bipolar junction transistors*, Appl. Phys. Lett., **92**, 082113 (2008).
- [36] T. Miyazawa, M. Ito, and H. Tsuchida, *Evaluation of Long Carrier Lifetimes in Very Thick 4H-SiC Epilayers*, Mat. Sci. Forum **679–680**, 197 (2011).
- [37] T. Yamada and K. M. Itoh, *Optical and Electrical Characterization of Free-Standing 3C-SiC Films Grown on Undulant 6in Si Substrates*, Mat. Sci. Forum, **389–393**, 675 (2002).

- [38] W. Choyke, D. Hamilton, and L. Patrick, *Optical Properties of Cubic SiC: Luminescence of Nitrogen-Exciton Complexes, and Interband Absorption*, Phys. Rev., **133**, A1163 (1964).
- [39] S. G. Bishop and J. A. Freitas, *Photoluminescence characterization of cubic SiC grown by chemical vapor deposition on Si substrates*, J. Cryst. Growth, **106**, 38 (1990).
- [40] W. Choyke, D. Hamilton, and L. Patrick, *Optical Properties of Cubic SiC: Luminescence of Nitrogen-Exciton Complexes, and Interband Absorption*, Phys. Rev., **133**, A1163 (1964).
- [41] M. Kato, A. Yoshida, M. Ichimura, and H. Nagasawa, *Excess carrier lifetime and strain distributions in a 3C-SiC wafer grown on an undulant Si substrate*, Phys. Status Solidi A, **210**, 1719 (2013).

Publikacijų sąrašas disertacijos tema

Publikacijos susijusios su TlGaSe₂

- [A1] V. Grivickas, V. Gavryushin, P. Grivickas, A. Galeckas, V. Bikbajevs and **K. Gulbinas**, *Optical absorption related to Fe impurities in TlGaSe₂*, Physica Status Solidi A **208**, 2186 (2011).
- [A2] V. Grivickas, A. Odrinski, V. Bikbajevs and **K. Gulbinas**, *Carrier trapping and recombination in TlGaSe₂ layered crystals*, Physica Status Solidi B **250**, 160 (2013).
- [A3] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, V. Gavryushin, V. Bikbajevs, O. V. Korolik, A. V. Mazanik and A. K. Fedotov, *Room-temperature photoluminescence in quasi-2D TlGaSe₂ and TlInS₂ semiconductors*, Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters **8**, 639 (2014).
- [A4] **K. Gulbinas**, V. Grivickas and P. Grivickas, J. Linnros, *Conversion of Laser Pulse Optical Energy to Photo-acoustic Wave in nm-Scale Layered TlGaSe₂ Crystals*, IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, **68**, 012004 (2014).
- [A5] **K. Gulbinas**, V. Grivickas and V. Gavryushin, *Anisotropy of band gap absorption of TlGaSe₂ semiconductor by ferroelectric phase transformation*, Applied Physics Letters **105**, 242107 (2014).

Publikacijos susijusios su SiC

- [B1] **K. Gulbinas**, V. Grivickas, H. P. Mahabadi, M. Usman, A Hallén, *Surface Recombination Investigation in Thin 4H-SiC Layers*, Materials Science (Medžiagotyra) **17**, 119 (2011).
- [B2] M. Usman, A. Hallén, **K. Gulbinas** and V. Grivickas, *Effect of Nuclear Scattering Damage at SiO₂/SiC and Al₂O₃/SiC Interfaces – A Radiation Hardness Study of Dielectrics*, Materials Science Forum **717-720**, 805 (2012).
- [B3] M. Syväjärvi, J. Müller, J. W. Sun, Y. Ou, V. Jokubavicius, M. Kaisr, K. Ariyawong, V. Grivickas, **K. Gulbinas**, P. Hens, R. Liljedahl, M. Linnarsson, S. Kamiyama, P. Wellmann, E. Spiecker and H. Ou, *Fluorescent SiC as a new material for white LEDs*, Physica Scripta, **T148**, 014002 (2012).
- [B4] V. Gavryushin, **K. Gulbinas**, V. Grivickas, M. Karaliūnas, M. Stasiūnas, V. Jokubavičius, J. W. Sun and M. Syväjärvi, *Examination of Photoluminescence Temperature Dependencies in N-B Co-doped 6H-SiC*, Materials Science and Engineering, **56**, 012003 (2014).
- [B5] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, V. Jokubavičius, J. W. Sun, M. Karaliūnas, S. Kamiyama, M. Linnarsson, M. Kaiser, P. Wellmann, and M. Syväjärvi, *Carrier Lifetimes and Influence of In-Grown Defects in N-B Co-Doped 6H-SiC*, Materials Science and Engineering, **56**, 012004 (2014).
- [B6] **K. Gulbinas**, P. Ščajev, V. Bikbajavas, V. Grivickas, O. V. Korolik, A. V. Mazanik, A. K. Fedotov, V. Jokubavičius, M. K. Linnarsson, M. Syväjärvi and S. Kamiyama, *Raman Scattering and Carrier Diffusion Study in Heavily Co-Doped 6H-SiC Layers*, Materials Science and Engineering, **56**, 012005 (2014).
- [B7] G. Manolis, **K. Gulbinas**, V. Grivickas, V. Jokubavičius, M. K. Linnarsson, and M. Syväjärvi, *Temperature Dependencies of Free-Carrier-Absorption Lifetime in Fluorescent 6H-SiC Layers*, Materials Science and Engineering, **56**, 012006 (2014).
- [B8] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, G. Manolis, M. Kato and J. Linnros, *Internal Stress in Freestanding 3C-SiC Grown on Si and Relation to Carrier Lifetime*, AIP Conference Proceedings, **1292**, 91 (2010).

- [B9] V. Grivickas, K. Gulbinas, P. Grivickas, G. Manolis and J. Linnros, *Fundamental Band Edge Absorption in 3C-SiC: Phonon Absorption Assisted Transitions*, Materials Science Forum, **645–648**, 231 (2010).

Neįtrauktos publikacijos

- [C1] S.S. Suvanam, M. Usman, **K Gulbinas**, V. Grivickas and A. Hallén, *A Comparison of Free Carrier Absorption and Capacitance Voltage Methods for Interface Trap Measurements*, Materials Science Forum **780**, 465 (2013).
- [C2] V. Grivickas, G. Manolis, K. Gulbinas, K. Jarašiūnas, and M. Kato, *Excess carrier recombination lifetime of bulk n-type 3C-SiC*, Applied Physics Letters. **95**, 242110 (2009).
- [C3] V. Grivickas, V. Birkbajevs, K. Gulbinas, V. Gavryushin, and J. Linnros, *Strong photoacoustic oscillations in layered TlGaSe₂ semiconductor*, Physica Status Solidi B, **244**, 4624 (2007).

Pranešimai konferencijose

- [K1] **K. Gulbinas**, V. Grivickas, G. Manolis, K. Jarašiūnas, M. Kato, *Excess carrier recombination lifetime of bulk n-type 3C-SiC*, 11-th International Conference-School Advanced Materials and Technologies, Palanga, August 27-31, 2009 (poster session).
- [K2] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, T. Malinauskas, V. Jokubavičius, M. Syväjärvi, J. W. Sun, Y. Ou, H. Ou, M. Linnardson, S. Kamiyama, *Carrier Lifetimes in Fluorescent 6H-SiC for LEDs Application*, 39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos 2011 konferencija, Vilnius, Lithuania, October 6-8, 2011, 2-1 (oral session).
- [K3] M. Usman, A. Hallén, **K. Gulbinas**, V. Grivickas, *Radiation Hard Dielectrics for 4H-SiC*, International Conference on Silicon Carbide & Related Materials, Cleveland, Ohio, USA, September 11-16, 2011 (poster session).
- [K4] **K. Gulbinas**, *Mechanics of photoacoustic effect in TlGaSe₂ semiconductor*, ADOPT Winter Conference-School, Romme, Sweden, March 22-25, 2012 (oral session).
- [K5] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, and P. Grivickas, *Photo-acoustic Pressure Effects in GaAs and TlGaSe₂*, High Pressure in Semiconductor Physics, (15-HPSP), Montpellier, France, July 25-27, 2012 (poster session).

- [K6] V. Grivickas, **K. Gulbinas**, V. Jokubavičius, J.W. Sun, M. Karaliūnas, S. Kamiyama, M. Linnarsson, and M. Syväjärvi, *Carrier Lifetimes and Influence of In-grown Defects in N-B Co-doped 6H-SiC*, European Conference on Silicon Carbide & Related Materials (9-ECSCRM) St. Peterburg, Russia, September 2-6, 2012 (poster session).
- [K7] S. S. Saveda, M. Usman, **K. Gulbinas**, V. Grivickas, A. Hallén, *A comparison of free carrier absorption and capacitance voltage methods for interface trap measurements*, European Conference on Silicon Carbide & Related Materials (9-ECSCRM) St. Peterburg, Russia, September 2-6, 2012 (poster session).
- [K8] **K. Gulbinas**, V. Grivickas, V. Gavriušinas, V. Birkbajėvas, O. V. Karolik, A. V. Mazanik, A. K. Fedotov, J. Linnros, *Optinių savybių anizotropija kvazi-2D sluoksniuotuose TlGaSe₂ ir TlInS₂ puslaidininkiuose*, 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, LNKF, Vilnius, Lithuania, June 10-12, 2013 2-1 (poster session).
- [K9] **K. Gulbinas**, V. Grivickas, P. Grivickas, J. Linnros, *Conversion of Laser Pulse Optical Energy to Photo-acoustic Wave in nm-Scale Layered TlGaSe₂ Crystals*, European Material Research Society, EMRS, Lille, France, May 27-29, 2014 (poster session).

KAROLIS GULBINAS

AUTORIAUS GYVENIMO APRAŠYMAS (CV)

2014-12-15, Vilnius

Gimimo data: 1985-07-07
Adresas: Kalvarijų 110-34, LT Vilnius
Tel. Nr. (Mob.): +370 699 64538
El. paštas: karolis.gulbinas@tmi.vu.lt

IŠSILAVINIMAS

2010 – dabar *Doktorantūros studijos, medžiagų inžinerijos kryptis,*
Vilniaus universitetas
2008 – 2010 *Magistro diplomą, medžiagų mokslo magistro kvalifikacinis*
laipsnis, Vilniaus universitetas
2004 – 2008 *Bakalauro diplomą, elektronikos inžinerijos bakalauro*
kvalifikacinis laipsnis, Vilniaus universitetas
2000 – 2004 *Vidurinis išsilavinimas,*
Kauno technologijos universiteto gimnazija (KTU gimnazija)
1992 – 2000 Kauno Juozo Urbšio vidurinė mokykla

DARBO PATIRTIS

2013 – dabar *Jaunesnysis mokslo darbuotojas,*
Taikomųjų mokslų institutas (TMI), Vilniaus universitetas
2008 – 2013 *Inžinierius,*
Taikomųjų mokslų institutas (TMI), Vilniaus universitetas
2006 – 2008 *Technikas,*
Taikomųjų mokslų institutas (TMI), Vilniaus universitetas

MOKSLINĖS IŠVYKOS

2011 – 2013 12 mėn. Doktorantūros studijos Karališkajame Technologijos
institute Švedijoje pagal Švedijos instituto (SI) Visby programą
2011 – 2012 8 d. Mokslinės komandiruotės Baltarusijos valstybiniame
universitete Minske
2010 – 2011 1-4 mėn. Mokslinės stažuotės (iš viso 6 mėn.) Karališkajame
Technologijos institute Švedijoje
2008 3 mėn. Erasmus praktika Karališkajame Technologijos institute
Švedijoje

PUBLIKACIJOS

17 mokslinių straipsnių bendraautorius (8 iš jų žurnaluose, kurie yra
ISI Web of Science duomenų bazėje)
9 pranešimai konferencijose