

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FTMC PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

GEORGIOS MANOLIS

**STIPRIAI SUŽADINTŲ 3C-SIC KRISTALŲ IR HETEROSTRUKTŪRŲ
OPTINĖS IR ELEKTRINĖS SAVYBĖS**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T

Vilnius, 2013

Disertacija rengta Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Puslaidininkų fizikos katedroje ir Taikomųjų mokslų institute 2008–2012 metais.

Mokslinis vadovas:

Dr. Ramūnas Aleksiejūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto technologinių mokslų krypties taryboje:

Pirmininkas:

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

Nariai:

Prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

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

Dr. Renata Butkutė, (FTMC, Puslaidininkų fizikos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Dr. Šarūnas Meškiniš, (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Oponentai:

Prof. habil. dr. Edmundas Kuokštis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

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

Disertacija bus ginama viešame gynimo tarybos posėdyje 2012 m. kovo 22 dieną 15 valandą Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto 215 auditorijoje, Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose.

**VILNIUS UNIVERSITY
CPST SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE**

GEORGIOS MANOLIS

**OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF HIGHLY EXCITED
3C-SIC CRYSTALS AND HETEROSTRUCTURES**

Summary of Doctoral Thesis

Technological Sciences, Material Engineering (08T)

Vilnius, 2013

Dissertation was prepared in the Faculty of Physics and Institute of Applied Research, Vilnius University, in 2008 – 2012.

Scientific supervisor:

Dr. Ramūnas Aleksiejūnas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P, Semiconductor Physics (P 265)).

Council of defense of the doctoral thesis of Physical Sciences at Vilnius University:

Chairman:

Prof. Habil. Dr. Saulius Juršėnas (Vilnius University, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

Members:

Prof. Dr. Vincas Tamošiūnas (Vilnius University, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

Prof. Habil. Dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

Dr. Renata Butkutė (Center for Physical Sciences and Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

Dr. Šarūnas Meškiniš (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

Opponents:

Prof. Habil. Dr. Edmundas Kuokštis (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 08T).

Prof. Habil. Dr. Sigitas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Material Engineering – 08T).

The official defense of the doctoral thesis will be held in the public session of the Vilnius university Defense Council of Physical sciences at 15 h on March 22, 2013, in auditorium 215 of Faculty of Physics, Vilnius University, Saulėtekio Av. 9-III, LT-10222 Vilnius, Lithuania.

The summary of the doctoral thesis has been distributed on February , 2013.

The doctoral thesis is available at Vilnius University library and at the library of Center for Physical Sciences and Technology.

Summary

Cubic silicon carbide (3C-SiC) is a wide band gap semiconductor satisfying requirements to replace silicon in devices operating at high powers, frequencies, elevated temperatures, and harsh environments. Unfortunately, up to now the quality of 3C-SiC material is relatively low and does not match that of other hexagonal polytypes (4H- and 6H-SiC) that are already available for commercial use. This is due to the high density of defects, mainly inclusions of other polytypes, twinned domains and stacking faults. The growth of 3C-SiC is extremely difficult because the cubic phase is metastable and therefore special conditions have to be fulfilled in order to control its growth. In the framework of MANSiC project several different growth techniques have been elaborated both for thin layers and bulk 3C-SiC crystals. These techniques are the Vapor Liquid Solid deposition (VLS), the Chemical Vapor Deposition (CVD), the Sublimation Epitaxy (SE), and the Continuous Feed Physical Vapor Transport (CF-PVT).

In this work, optical time resolved techniques are exploited to determine material electronic properties and to correlate those with growth techniques and processes in order to contribute to optimization of material growth conditions. Light-induced transient grating (LITG) and differential transmission (DT) techniques are utilized for the photo-induced carrier monitoring. LITG technique, based on sample's excitation by a spatially modulated light field, allows the simultaneous investigation of carrier transport as well as the generation and recombination processes at the surface and interior of both thin layers and bulk crystals. DT, as a simpler technique, which is based on modulated absorption of a below band gap energy photons, is in widespread use and is a general tool applicable to most semiconductor materials and devices, provides an exceptional advantage of its different geometries for the study of carrier recombination mechanisms. Thus, nonlinear optical techniques of active spectroscopy are presented as a bridge between the optical and electronic semiconductors properties as, based on strong correlation between electrical and optical phenomena, potentially they are able to analyze electrical processes by optical means.

The main goals of this Thesis is the investigation of carrier dynamics in 3C-SiC thin and bulk layers grown by VLS, CVD, SE and CF-PVT techniques at various excitation and temperature conditions and evaluation of their optical/electrical

parameters, as well as investigation of the impact that growth parameters have on the properties of 3C-SiC by means of optical time-resolved techniques. Moreover, the determination of concentration and nature of carrier traps in relatively thin epilayers by implementation of time-resolved optical techniques. Finally, the investigation of excess carrier recombination and diffusion peculiarities that arises due to the extended defects in 3C-SiC in a wide range of excitations and temperatures were studied.

Despite the fact that optical time-resolved techniques, such as LITG and DT, are known and used already for several decades, we succeeded to extend their field of application and to observe some novel phenomena in 3C-SiC related to its growth techniques. We used LITG and DT techniques to investigate carrier recombination and transport in a wide band gap indirect semiconductor like 3C-SiC. We found a novel way, based on DT technique, to determine the carrier trap concentration in finite thickness layers, as well as to attribute them to specific impurity species. We investigated the influence of several particular growth conditions at different growth techniques on electronic properties of grown layers, and hence, a chance to characterize indirectly layers structural perfection by non-destructive optical means, as well as to evaluate the potentiality of growth techniques to 3C-SiC material optimization. Based on these results, we were able to evaluate and compare quality of 3C-SiC specimens manufactured by nearly all currently available growth techniques that allowed distinguishing the most promising growth methods for 3C-SiC semiconductor. Finally, we investigated the influence of substrate surface features on carrier lifetime and mobility of the overgrown layers.

Main conclusions drawn from the results and presented for the defense can be summarized thus: a) the density of a dominant carrier trapping center in 3C-SiC can be determined from the differential transmission experiment under a proper choice of experimental conditions as well as its chemical nature can be assessed from the activation energy; b) despite that VLS deposition technique does not contribute to optimization of electronic properties of homopolytypicaly overgrown layers, its purification procedure results in promising seed layers with advanced electronic properties; c) the majority of currently used growth methods does not provide means to enhance electrical quality of 3C-SiC layers by increasing layer thickness or optimizing growth temperature; CVD alone provided 3C-SiC layers with the lifetime increasing

linearly with layer thickness in thin layers and tends in saturation in bulk samples; d) ordered arrays of grooves results in anisotropy in ambipolar carrier diffusivity in 3C-SiC layers grown by CVD but do not damage the high lifetime values, as well as bulk lifetime in 3C-SiC epilayers grown homo- or hetero-polytypically by SE increases with substrate short range roughness.

Ivadas

Šviesos sąveikos su medžiaga tyrimai yra viena iš labiausiai išplėtotų mokslo sričių tiek teorijos požiūriu, tiek tokių tyrimų pritaikymuose. Dėl optinių reiškinių įvairovės tokiose sąveikose, buvo išvystyti įvairios eksperimentinės metodikos medžiagos savybėms tirti. Spektroskopiniai metodai pagrįsti tiesinės šviesos-medžiagos sąveikos principais jau yra suteikę ir vis teikia mokslui daug žinių, tačiau šiuolaikiniai netiesiniai spektroskopiniai metodai padeda dar labiau praplėsti šiuos mokslinius horizontus. Bekontaktis, neardantis medžiagos charakterizavimo būdas yra ypatingai svarbus norint optimizuoti medžiagos auginimo procesą.

Lazerių generuojančių ultratrumpus šviesos impulsus atsiradimas įgalino tirti netiesines medžiagų savybes. Trumpi lazerio impulsai „žadinimo-zondavimo“ metoduose leidžia realiu laiku stebėti krūvininkų pernašą, jų generaciją ir rekombinaciją, kurie vyksta nano- ar femtosekundžių laiko skalėje. Iš daugelio „žadinimo-zondavimo“ metodikų pritaikytų medžiagos savybių tyrimui, šiame darbe naudojama šviesa indukuotų dinaminių gardelių (ŠIDG) ir diferencinio pralaidumo (DP) metodai. ŠIDG metodas yra pagrįstas medžiagos sužadimu erdvėje moduluotu šviesos elektriniu lauku ir leidžia vienu metu tirti krūvininkų pernašos bei jų generacijos-rekombinacijos procesus plonuose ir tūrinuose bandiniuose. SP metodas yra kiek paprastesnis tyrimo būdas, kuris paremtas medžiagos sugerties koeficiento pokyčiu, ir yra plačiai naudojamas puslaidininkių medžiagų bei jų prietaisų tyrimuose. Taigi, netiesiniai optiniai diagnostikos būdai įgalina tirti medžiagos elektrines savybes panaudojant optinius metodus.

Silicio karbidas (SiC) yra žinomas jau daugiau kaip du šimtmečius, bet kaip puslaidininkis pradėtas tirti tik 20-o amžiaus pradžioje. Tačiau didelio susidomėjimo jis sulaukė tik praeito amžiaus viduryje, kai buvo parodytas sintetinis šios medžiagos gavimo būdas. Nuo to laiko daugelis universitetų ir mokslinių kompanijų ėmėsi tirti šią medžiagą, ir laikė SiC pagrindine savo tyrimų kryptimi. Didelį susidomėjimą SiC lėmė tai, kad šios medžiagos fizikinės savybės puikiai tinka prietaisų, veikiančių aukštose temperatūrose, aukštuose dažniuose ir didelių galių srityje, atsparių cheminiam ir radiacijos poveikiui, gamybai. Yra žinoma apie 200 skirtingų SiC politipų, tačiau tik trys

iš jų yra labiausiai naudojami: kubinis (3C-SiC) ir du heksagoniniai (4H ir 6H-SiC). Iki šiol tyrimai ir industrija labiau koncentruojasi į heksagoninius politipus, kadangi aukštos kokybės 3C auginimas vis dar yra sunkiai pasiekiamas. Norint pasiekti visą 3C politipo potencialą, yra būtina užauginti aukštos kokybės kristalus. Kai 3C auginimas ant Si padėklų, blogą 3C kokybę įtakoja kristalinių gardelių periodiškumo neatitikimas (~ 20 proc.) ir skirtingi šiluminio plėtimosi koeficientai (~ 8 proc.). Naudojant heksagoninius politipus, susiduriama su kita problema – dvyniavimosi domenų formavimusi, kas labai neigiamai įtakoja prietaisų veikimą. Kadangi nepusiausvirųjų krūvininkų gyvavimo trukmė ir difuzija yra stipriai įtakojama išplitusių struktūrinių ar taškinių defektų, ŠIDG ir DP metodikos gali suteikti svarbios informacijos 3C-SiC augintojams, dėka kurios būtų įmanoma optimizuoti augimo procesą. Tai ir buvo mano, kaip diagnostikos grupės nario MANSiC projekte remiamo Europos Sąjungos, pagrindinis uždavinys.

Pagrindiniai darbo uždaviniai

1. Nepusiausvirųjų krūvininkų dinamikos tyrimas ir optinių/elektrinių savybių įvertinimas plonuose ir tūriniuose 3C-SiC bandiniuose, užaugintuose VLS, CVD, SE ir CF-PVT auginimo technologijomis.
2. Auginimo parametrų įtakos įvertinimas 3C-SiC bandinių savybėms naudojantis optinėmis metodikomis su aukšta laikine skyra.
3. Krūvininkų gaudyklių tipo ir jų koncentracijos nustatymas plonuose sluoksniuose panaudojant optines metodikas
4. Ištirti išplėstinių defektų įtaką nepusiausvirųjų krūvininkų rekombinacijai ir jų difuzijai plačiame sužadinimo ir temperatūros srityse.

Darbo naujumas ir svarba

Optinės metodikos pasižyminčios aukšta laikine skyra, tokios kaip ŠIDG ir DP, jau yra naudojamos kelis dešimtmečius. Nepaisant to, mums pasisekė praplėsti šių metodikų pritaikymą 3C-SiC kristalų tyrimui ir stebėti naujus reiškinius susijusius su jų auginimo technologijomis. Mes radome naują būdą, panaudojant DP metodiką, nustatyti

krūvininkų gaudyklių koncentraciją plonuose epitaksiniuose sluoksniuose, ir taip pat nustatyti šių gaudyklių prigimtį. Mes ištyrėme skirtingų auginimo procesų parametrų įtaką elektroninėms medžiagos savybėms, taigi įgyvendinome neardantį medžiagos charakterizavimą, kuris yra reikalingas auginimo metodų optimizavimui. Gauti rezultatai leido mums palyginti 3C-SiC kristalų kokybę, kurie buvo užauginti beveik visais auginimo būdais, taigi ir įvertinti perspektyviausią auginimo technologiją skirtą 3C-SiC auginimui.

Ginamieji teiginiai

1. Dominuojančių krūvininkų gaudyklių tankis ir jų aktyvacijos energija 3C-SiC kristaluose gali būti nustatyta naudojant diferencinio pralaidumo metodiką ir parinkus tinkamas eksperimentines sąlygas.
2. Laisvųjų krūvininkų gyvavimo trukmė ir jų difuzijos koeficiento vertė 3C-SiC homo-epitaksiniuose sluoksniuose užaugintuose ant plono VLS padėklo reikšmingai nepadidėja, lyginant su hetero-epitaksiškai užaugintais sluoksniais. Elektrinės VLS sluoksnio savybės gali būti stipriai pagerintos atliekant gryninimo procedūrą.
3. Dauguma šiuo metu naudojamų auginimo technologijų (angl. SE ir PVT) neleidžia pagerinti kristalo kokybės vien tik auginant storesnius sluoksnius ar optimizuojant auginimo temperatūrą; krūvininkų gyvavimo trukmės išlieka 2-6 ns ribose nepriklausomai nuo auginimo parametrų. Kita vertus, 5–12 μm storio sluoksniuose, užaugintuose cheminiu garų nusodinimo (angl. CVD) būdu, krūvininkų gyvavimo trukmė ilgėja tiesiškai nuo sluoksnio storio. Maksimali išmatuota krūvininkų gyvavimo trukmė storiausiame bandinyje siekė ~100 ns.
4. Padėklo paviršiaus morfologija įtakoja epitaksinių 3C-SiC sluoksnių elektrines savybes. Ambipolinės difuzijos anizotropiškumas 3C-SiC sluoksniuose užaugintuose CVD metodu gali būti pasiektas naudojant kryptingus griovelius ant padėklo, kurie nesumažina krūvininkų gyvavimo trukmės. 3C-SiC epitaksiniuose sluoksniuose užaugintuose homo- ar hetero-epitaksiškai SE būdu tūrinis krūvininkų gyvavimo laikas ilgėja didėjant padėklo šiurkštumui.

Autoriaus indėlis

Autorius atliko didžiąją dalį disertacijoje pateikiamų eksperimentinių matavimų, atliko rezultatų analizę bei aktyviai dalyvavo juos interpretuojant, paruošė straipsnių disertacijos tema rankraščius, bei prisidėjo prie kitų straipsnių rankraščių paruošimo.

Mokslinių straipsnių disertacijos tema sąrašas

- [A1] V. Grivickas, **G. Manolis**, K. Gulbinas, K. Jarasiunas, and M. Kato, “Excess carrier recombination lifetime of bulk n-type 3C-SiC”, Applied Physics Letters **95**, 242110 (2009).
- [A2] N. Jegenyas, **G. Manolis**, J. Lorenzzi, V. Souliere, D. Dompont, A. Boule, G. Ferro and K. Jarasiunas, “Nondestructive evaluation of photo-electrical properties of 3C-SiC (111) homoepitaxial layers grown by CVD”, Materials Science Forum **679-680** 153 (2011).
- [A3] **G. Manolis**, K. Jarasiunas, I. G. Galben and D. Chaussende, “Optical Investigation of Electronic Properties in Bulk and Surface Region of Sublimation-grown 3C-SiC Crystals”, Materials Science Forum **615-617** 303 (2009).
- [A4] **G. Manolis**, G. Zoulis, S. Juillaguet, J. Lorenzzi, G. Ferro, J. Camassel and K. Jarasiunas, “Optical characterization of VLS+CVD grown 3C-SiC films by non-linear and photoluminescence techniques”, Materials Science Forum **645-648** 443 (2010).

Mokslinių straipsnių neįtrauktų į disertaciją sąrašas

- [B1] 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)
- [B2] **G. Manolis**, M. Beshkova, M. Syvajarvi, R. Yakimova and K. Jarasiunas, “Carrier dynamics in hetero- and homo-epitaxially sublimation grown 3C-SiC layers” Materials Science Forum **679-680** 161 (2011)

- [B3] 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)
- [B4] P. Onufrijevs, T. Serevicius, P. Scajev, **G. Manolis**, A. Medvids, L. Chernyak, E. Kuokstis, C. C. Yang and K. Jarasiunas, “Characterization of Optical and Photoelectrical Properties of ZnO Crystals”, Acta Physica Polonica A **119**(2) 274 (2011)
- [B5] P. Ščajev, P. Onufrijevs, **G. Manolis**, M. Karaliūnas, S. Nargelas, N. Jegenyas, J. Lorenzzi, G. Ferro, M. Beshkova, R. Vasiliauskas, M. Syväjärvi, R. Yakimova, M. Kato and K. Jarašiūnas, “On applicability of time-resolved optical techniques for characterization of differently grown 3C-SiC crystals and heterostructures”, Materials Science Forum **711** 159 (2012).
- [B6] A. Kadys, P. Scajev, **G. Manolis**, V. Gudelis, K. Jarasiunas, P. Abramov, S. Lebedev and A. Lebedev, “On the correlation of the structural perfection and nonequilibrium carrier parameters in 3C SiC heterostructures”, Materials Science Forum **645-648** 219 (2010).

1 skyrius. Silicio karbidas - apžvalga

Silicio karbidas (SiC) kaip sintetinė medžiaga jau yra žinoma beveik du šimtmečius, o tyrinėjama kaip puslaidininkis nuo 20 amžiaus pradžios. Pirmi moksliniai pranešimai apie elektrines SiC savybes ir elektro-liuminescencinį diodą pasirodė 1907 metais [1, 2]. 1912 m. buvo pranešta, kad SiC pasižymi politipizmu [3]. Didesnio mokslininkų dėmesio SiC, kaip labai potenciali medžiaga elektroninių prietaisų gamybai, skirtų dirbti aukštų temperatūrų, didelių dažnių ir galių srityje, bei atsparių chemiškai ir radiaciniam poveikiui, sulaukė tik 20 amžiaus viduryje, kai buvo išrasta Lely auginimo technologija, kurios dėka buvo įmanoma išauginti aukštos kokybės SiC monokristalų [4]. Šio auginimo būdo trūkumas buvo mažas proceso našumas, tačiau po kelių dešimtmečių buvo išvystytas taip vadinamas modifikuotas Lely metodas, kuris tą trūkumą ženkliai sumažino [5, 6]. Tuo pačiu metu buvo studijuojamas ir kitas, heteroepitaksinis SiC auginimo būdas pasinaudojant cheminiu garų nusodinimo metodu aukštose temperatūrose [7, 8].

SiC yra vienintelis stabilus Si ir C atomų junginys prie atmosferinio slėgio, ir turi vienodą šių atomų kiekį. Si ir C atomai silicio karbide yra surišti beveik kovalentiniu ryšiu, joninio ryšio faktorius tarp teigiamo krūvio Si atomų ir neigiamo krūvio C atomų lygus 0.177 [9]. Mažiausias SiC gardelės elementas yra tetraedras apibrėžtas stipriomis sp^3 orbitalėmis. Yra žinoma beveik 200 skirtingų SiC politipų, tačiau tik patys stabiliausi politipai yra sulaukę didesnio mokslinio ir industrijos dėmesio [10]. Tarp jų yra vienas kubinis (β - ar 3C-SiC) ir keli heksagoniniai (α -SiC), pagrinde 4H ir 6H politipai. Heksagoniniai SiC kristalai jau gali būti įsigijami komerciškai, priešingai negu kubiniai politipai, kadangi jų auginimo technologijos nėra dar tokios pažengusios kaip α -SiC atveju, pagrinde dėl geros kokybės 3C padėklų nebuvimo.

Tradiciškai SiC yra naudojamas kaip abrazyvinė medžiaga, taip pat automobilių dalyse, branduolinio kuro įrengimų dalyse bei plieno gamyboje. Pastaruoju metu SiC pradėtas naudoti ir elektroninėse sistemose, grafeno gamyboje ir biotechnologijoje [11, 12, 13]. Elektroniniai prietaisai pagaminti iš SiC lyginant su pagamintais iš Si yra pranašesni, kadangi jie gali veikti esant aukštesnėms temperatūroms ir yra atsparūs radiacijai bei chemiškai poveikiui, kurios yra būdingos aeronautikoje, automobilių ir galios sistemose [12, 14]. Kitas svarbus SiC pritaikymas yra didelių galių puslaidininkinių prietaisuose, kurie yra svarbūs elektros paskirstymo sistemose. SiC turi didelį elektrinį pramušimo

slenkstį, dėl to *srovės sustabdymui* gali būti naudojami plonesni, labiau legiruoti SiC sluoksniai, lyginant su Si sluoksniais [15]. SiC taip pat yra vienas iš potencialiausių medžiagų naujos kartos mažų elektrinių nuostolių elementams, kadangi tokie elementai pasižymi maža *vidine* varža ir geresne charakteristika esant aukštom temperatūrom. Dar viena patraukli SiC savybė yra didelis šiluminis laidumas, kas elektroniniuose prietaisuose yra labai svarbu norint palaikyti žemą prietaiso temperatūrą jo veikimo metu.

Ypatingas dėmesys 3C-SiC politipui yra pagrįstas jo elektrinių savybių pranašumu lyginant su heksagoniniais politipais. Kubinis politipas pasižymi dideliu elektronų judriu, dideliu elektronų sotes greičiu, maža donorų jonizacijos energija ir beveik viena eile mažesniu būsenų tankiu 3C-SiC:SiO₂ sandūroje, kuris būtinas norint pagaminti gerų charakteristikų metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorių (MOPLT) [16, 17]. Tai vienintelis politipas turintis izotropines fizikines savybes, dėl savo kubinės kristalinės simetrijos. Be to, šio politipo augimo metu nesiformuoja mikro vamzdelių tipo defektai. Dėl didelio elektronų judrio, yra tikimasi, kad 3C politipas bus tinkamesnis ir aukštų dažnių elektronikos prietaisuose [18]. Dėl minėto mažesnio būsenų tankio MOPLT sandūroje tarp 3C-SiC ir dielektriko, tikimasi, jog bus pasiektas didesnis krūvininkų judris inversiniame kanale [19]. Tyrimais taip pat buvo nustatyta, kad šioje sandūroje gali formuotis dvimatės elektronų dujos (2ED), kas įtakotų geresnes didelio elektronų judrio tranzistoriaus (DEJT) charakteristikas lyginant su DEJT pagamintais iš AlGaIn/GaN heterostruktūrų [20, 21]. Tačiau kol kas rezultatų su 3C-SiC nėra, dėl gan prastos šio kristalo kokybės [22, 23]. 3C-SiC politipo naudojimas prietaisų gamyboje yra naudingas daugelyje sričių, nuo aukštos galios elektronikos iki cheminių jutiklių, medicininių taikymų ir biotechnologijos. Taip pat yra teoriškai spėjama, kad naudojant 3C-SiC saulės elementų gamyboje, jų efektyvumas gali pasiekti 30% ar daugiau [24, 25, 26].

Kristalų turinčių kiek įmanoma mažesnę defektų tankį gamyba yra ypač svarbi puslaidininkiniams prietaisams naudojamiems elektronikoje. Daugelis kristalinių defektų veikia kaip krūvininkų gaudyklės ar jų rekombinaciniai centrai, o tai nulemia blogą prietaisų veikimą ir jų greitą dėvėjimąsi. Taip pat, kai kurių defektų tankis gali didėti prietaiso veikimo metu, kas palaipsniui lemia tokio prietaiso suardymą. Defektai yra klasifikuojami į taškinis ir erdvinis.

Taškiniams defektams yra priskiriami visi priemaišiniai atomai, tarpmazginiai gardelės atomai ir vakansijos. Priemaišiniai atomai yra daugelyje medžiagų, nepriklausomai nuo auginimo technologijos. SiC karbide donoriai/akceptoriai yra V/III grupės elementai. Dažniausios donorinės priemaišos yra N ir P atomai, o akceptorinės B, Al ir Ga. Tarpmazginiai defektai gali būti savieji (SiC gardelės atomai) ir išoriniai (priemaišiniai atomai). Šie defektai nesudaro jungčių su gardelės taškuose esančiais atomais, ir įprastai nėra optiškai ar elektriškai aktyvūs. Jie gali difunduoti per kristalinę gardelę ir rekombinuoti su vakansijomis. Vakansijos SiC gali būti dėl Si ir C atomo nebuvimo gardelės mazge, V_{Si} ir V_C . Vakansijos yra termiškai stabilios iki gan aukštų temperatūrų [27], ir kadangi jos turi stiprų cheminį ryšį, jų mobilumas nėra didelis. Šie defektai gali būti elektriškai aktyvūs, taigi gali įtakoti medžiagos elektronines savybes. Vakansijos yra identifikuojamos pagal joms būdingas žymes optinio spektro draustinės juostos srityje. Dviejų vakansijų tipų poveikis nėra vienodas, nes V_{Si} orbitalės yra stipriai lokalizuotos tarp vakansiją supančių C atomų, o V_C orbitalės yra gan išplitusios, kas lemia tokios vakansijos buvimą efektyvesniu rekombinaciniu centru [28].

Iš erdvinių defektų, didesnę dėmesį skirsime dislokacijoms, pakavimo defektams (PD) ir dvyniavimosi domenams (DD). Kadangi dauguma dislokacijų randasi arti sandūros tarp padėklo ir epitaksinio sluoksnio, jos neturi įtakos prietaiso veikimui. Tačiau, kai jos randasi visame sluoksnio tūryje, esant dideliems sraiginių dislokacijų tankiam, prietaiso elektroninės savybės be abejo yra pabloginamos [29]. PD yra patys dažniausiai pasitaikantys ir paprasčiausi dvimačiai struktūriniai defektai, kurie gali formuotis kristaluose su kubine glaudaus pakavimo struktūra. Tokie defektai stipriai pablogina elektroninių prietaisų kokybę [30, 31]. Sunkiausiai pašalinamas defektas 3C-SiC kristale yra DD [32]. Jie formuojasi, kai epitaksinis sluoksnis auga dvejomis skirtingomis kristalografinėmis kryptimis, pasuktomis 60° viena kitos atžvilgiu, turinčiomis vienodą augimo tikimybę.

2 skyrius. 3C-SiC auginimas

Disertacijoje yra tyrinėjami tūriniai ir epitaksiniai bandiniai užauginti skirtingomis technologijomis, kurių trumpas aprašymas pateikiamas žemiau:

- Fazinio virsmo ribojamas (ang. Vapour Liquid Solid, VLS) medžiagos nusodinimas
Ploni 3C-SiC sluoksniai (~2 μm) yra auginami ant (0001) 6H-SiC lakštų (111) kryptimi, kuria sluoksnio ir padėklo gardelių neatitikimas yra minimalus. Kad pasiekti vienodas auginimo sąlygas, t.y. visišką auginimo kapsulės padengimą ir taigi paviršinio drėkinimo optimizavimą, auginimo kapsulė yra padengiama plonu Si sluoksniu leidžiant 30 minučių silano dujas (SiH₄) argono dujų aplinkoje esant 1000°C. Tada Si, Ga ar Ge, ir Al lydinys yra tirpdomas virš α-SiC padėklo, o C atomai yra gaunami suardant propano dujas (C₃H₈). 3C formavimasis yra pradamas penkioms minutėms pakėlus temperatūrą iki 1450°C, DD pašalinimui. Po to, auginimo procesas, apie 55 minutes, vyksta sumažinus temperatūrą iki 1200°C, tam kad riboti Ge garavimą [33]. Plonas VLS sluoksnis yra toliau numatomas naudoti homoepitaksiniam storesnių sluoksnių auginimui.
- Cheminis garų nusodinimas (ang. Chemical Vapour Deposition, CVD)
Homoepitaksinis CVD metodas įgalina užauginti storesnius 3C-SiC sluoksnius ir kontroliuoti legiravimo lygį. Auginimo dujos yra silano ir argono dujų mišinys atskiestas vandenilio dujomis atmosferiniame slėgyje [34]. Auginimo procesas prasideda 5 minučių VLS padėklo valymu vandenilio dujų aplinkoje esant 1200°C. Tada temperatūra yra pakeliama iki augimui tinkamos (tarp 1450°C ir 1650°C). Pirma, penkioms minutėms, yra įleidžiamas H₂+C₃H₈ mišinys, o po to pridedamas ir SiH₄ epitaksiniam nusodinimui pradėti. Verta paminėti, jog japonų kompanija HOYA kaip padėklą naudodavo banguotą Si padėklą.
- Sublimacijos epitaksija (ang. sublimation epitaxy, SE)
Sublimacijos epitaksija yra perspektyvi technologija auginti tiek heksagoninius, tiek kubinius politipus. Maža savikaina ir didelė augimo sparta, kartu su aukšta struktūrine išaugintų kristalų kokybe ir lygia jų paviršiaus morfologija, suteikia galimybę auginti kristalus tinkančius gaminti elektroninius prietaisus [35]. Si ir C santykis augimo garuose yra kontroliuojamas trimis parametrais: temperatūros skirtumu tarp padėklo ir

medžiagos šaltinio, C atomų gaudyklėmis ir naudojant polikristalinį 3C-SiC, kaip šaltinį. Plonų sluoksnių auginimas vyksta kaitinant pradinę medžiagą iki 2000°C [36]. Tūriniam sluoksniams auginti naudojamos žemesnės temperatūros (1775°C).

- Nepertraukiamo tiekimo kristalų auginimas iš garų fazės (ang. Continuous-Feed Physical Vapour Transport, CF-PVT)

CF-PVT yra sudėtinga technologija, kuri apjungia PVT technologijos pažangą monokristalų auginimui ir aukštos temperatūros CVD technologiją, kuri suteikia nenutrūkstamą aukštos kokybės medžiagos šaltinio tiekimą [37]. Kristalų auginimas vyksta nuo 1850°C iki 2050°C temperatūros intervale.

3 skyrius. Krūvininkų dinamika ir optinės metodikos su laikine skyra

Greitų elektroninių vyksmų puslaidininkiuose charakterizavimas yra paremtas krūvininkų dinamikos tyrimais. Netiesinės optikos metodikos leidžia tyrinėti medžiagos elektrines savybes jos neardančiu būdu, priešingai negu elektrinės charakterizavimo metodikos, kurios yra ribotos dėl jiems reikalingų ominių kontaktų ir lėto atsako. Kai medžiaga sugeria šviesą, sužadinti krūvininkai laikinai pakeičia medžiagos optines savybes, t.y. lūžio rodiklį n ir sugerties koeficientą α .

Pagal pusiau klasikinį Drudės modelį, šie laisvi krūvininkai gali laisvai judėti tarp gardelės atomų jausdami medžiagos kompleksinį lauką. Jų judėjimas gali būti sukeltas išorinio elektrinio lauko ar krūvininkų koncentracijos gradiento, taigi kalbame apie dreifinį ar difuzinį krūvininkų judrį. Mums aktualiu atveju, kai elektronų ir skylių tankiai vienodi, jie juda lyg viena visuma, bipolinė krūvininkų plazma, nes tarp jų veikiantis Demberio laukas priešinasi jų atsiskyrimui. Difuzijos procesas yra aprašomas Fiko dėsniumi, o bipolinis difuzijos koeficientas D_{amb} ir bipolinis judris μ_{amb} yra surišti Enšteino sąryšiu:

$$D_{amb} = \frac{k_B T}{e} \mu_{amb} \quad (3.1)$$

Esant dideliems injektuotų krūvininkų tankiams ($n \approx p \approx \Delta N$), bipolinis difuzijos koeficientas išreiškiamas

$$D_{amb} = 2 \frac{D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (3.2)$$

Jeigu $D_n \gg D_p$, kaip kad yra 3C-SiC, tada $D_{amb} = 2D_p$.

Puslaidininkinėje medžiagoje krūvininkų sklaida pasireiškia dėl kelių skirtingų sklaidos procesų. Bendru atveju sklaidos mechanizmai gali būti skirstomi į šiluminius ir nuosavuosius. Pirmuoju atveju sklaida priklauso tik nuo temperatūros, įmanoma tik idealiame kristale. Antruoju sklaida yra sąlygojama įvairių gardelės defektų ir be temperatūrinės priklausomybės dar priklauso ir nuo defektų koncentracijos. Detaliau, krūvininkų sklaida yra įtakojama: a) fononų, b) kuloninės tarpusavio sąveikos, c) neutralaus krūvio ir jonizuotų defektų, ir d) gardelės energijos juostų sandara. Pats ryškiausias sklaidos mechanizmas yra dėl fononų, kuris yra atskiriamas į akustinių ir optinių fononų sklaidą. Pirmuoju atveju judrio priklausomybė nuo temperatūros, žemiau Debajaus temperatūros, yra aprašoma kaip $\mu_{ak} \propto T^{-3/2}$, o antruoju $\mu_{opt} \propto T^{-5/2}$. Visi fononiniai sklaidos mechanizmai tampa dominuojančiais esant kambario ir aukštesnėms temperatūroms. Kai krūvininkai yra sklaidomi jonizuotomis priemaišomis, elektronų sąveika su kuloniniu lauku yra aprašoma panašiai kaip ir Rezerfordo sklaidos atveju, kai laikoma, kad kuloninis laukas yra ekranuotas. Šiuo atveju judris turi tokią temperatūrinę priklausomybę $\mu_{jon} \propto T^{3/2}$ ir mažėja didėjant sklaidos centrų koncentracijai [38].

Krūvininkų rekombinacijos metu, kai elektronas sutinka skylę, yra išskiriama energija, lygi energijos skirtumui tarp pradinės ir galutinės elektrono būsenos. Energija į aplinką gali būti atiduodama šviesos kvanto pavidalu (spindulinė rekombinacija) arba išsklaidoma per gardelės virpesius ir elektrono kinetinės energijos augimu (nospindulinė rekombinacija). Efektyvi rekombinacijos sparta gali būti išreikšta įskaitant visus nepriklausomus rekombinacijos procesus (SRH, spindulinis, Ožė (Auger)):

$$\frac{1}{\tau_R} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (3.3)$$

Kadangi krūvininkų gyvavimo laikas priklauso nuo žadinimo energijos tankio (kas atitinka injektuotų krūvininkų tankį), yra atskiriami dvi žadinimo sritys: mažų žadinimų (MŽ) ir didelių žadinimų (DŽ). Mūsų matavimų metu mes galėjome dirbti tik DŽ srityje, kai injektuotų krūvininkų tankis yra didesnis už pusiausvirųjų krūvininkų tankį. Kai turime bipolinę plazmą, krūvininkai rekombinuoja tiesiogiai, taigi DŽ srityje krūvininkų rekombinacija yra vadinama bimolekuline. DŽ srityje krūvininkų gyvavimo trukmės gali būti aproksimuojamos taip:

$$\tau_{SRH}(hl) \approx \tau_n + \tau_p \approx \tau_{SRH}^{amb} \quad (3.4)$$

$$\tau_{rad}(hl) \approx \frac{1}{B\Delta n} \quad (3.5)$$

$$\tau_{Auger}(hl) \approx \frac{1}{(C_n + C_p)\Delta n^2} \approx \frac{1}{C_{amb}\Delta n^2} \quad (3.6)$$

Kadangi paviršinės rekombinacijos sparta priklauso nuo paviršiaus ar sandūros rekombinacijos efektyvumo ir krūvininkų pernašos iš bandinio tūrio iki paviršiaus ar sandūros, paviršinė rekombinacijos sparta yra aproksimuojama taip [39]:

$$\tau_s = \frac{d}{S} + \frac{4d^2}{\pi^2 D_{amb}} \quad (3.7)$$

čia d yra sužadintas bandinio paviršiaus storis.

Galiausiai, visi rekombinaciniai procesai yra įvertinami sprendžiant dvimatę pusiausvyros lygtį:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta n(x, z, t)}{\partial t} &= \nabla [D_a(\Delta n) \nabla \Delta n(x, z, t)] \\ -\frac{\Delta n(x, z, t)}{\tau_R} - B\Delta n^2(x, z, t) - C\Delta n^3(x, z, t) + G(x, z, t) & \end{aligned} \quad (3.8)$$

naudojant tokias ribines sąlygas

$$\left. \frac{\partial \Delta n(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{S_1}{D_a(\Delta n)} \Delta n(x, 0, t) \quad (3.9)$$

ir

$$\Delta n(x, \infty, t) = 0 \quad (3.10)$$

$$\left. \frac{\partial \Delta n(x, z, t)}{\partial z} \right|_{z=d} = \frac{S_2}{D_a(\Delta n)} \Delta n(x, d, t) \quad (3.11)$$

čia $G(x, z, t)$ yra krūvininkų generacijos funkcija [40]. Viršuje pateikti sąryšiai yra naudojami šiame darbe pamatuotų kinetikų skaitmeniniam modeliavimui.

Optinės metodikos su laikine skyra

ŠIDG metodikoje bandinys yra žadinimas interferuojančiais jame lazerio pluoštais, kurie bandinyje sukuria dinaminę difrakcinę gardelę, kurios profilis

$$I(x) = I_0(1 + m \cos(Kx)) \quad (3.12)$$

čia I_0 yra suminis žadinančiųjų spindulių intensyvumas ($I_1 + I_2$), m yra moduliacijos gylis, $K=2\pi/\Lambda$ yra gardelės vektorius. Λ yra gardelės periodas, kuris gali būti varijuojamas keičiant žadinančiųjų spindulių susikirtimo kampą, pagal sąryšį $\Lambda=\lambda/(2\sin(\theta/2))$. Sužadintų laisvų krūvininkų pasiskirstymas sukelia kompleksinio lūžio rodiklio moduliaciją, kuri gali būti pamatuota difragavusiu nuo dinaminės gardelės pluošteliu. Svarbiausias eksperimente matuojamas parametras yra dinaminės gardelės difrakcijos efektyvumas η lygus difragavusio ir praėjusio spindulio intensyvumų santykiui I_D/I_T . Plonos dinaminės gardelės atveju difrakcijos efektyvumas yra išreiškiamas taip [41]:

$$\eta = |J_1(\phi)|^2 \approx \frac{\phi}{2} = \left| \frac{\pi\Delta\tilde{n}d}{\lambda} \right|^2 = \left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha d}{4} \right)^2 \quad (3.13)$$

čia J_1 yra pirmos eilės Beselio funkcija su parametru $\phi=2\pi\Delta nd/\lambda$, n yra kompleksinis lūžio rodiklis ir d yra gardelės storis. Paskutinis 3.13 lygties narys rodo, kad difrakcijos efektyvumas yra proporcingas sužadintų krūvininkų tankio kvadratui. Dėl to difragavusio zondo spindulio intensyvumas atspindi momentinį gardelės moduliacijos gylį, t.y. laisvų krūvininkų tankio skirtumą interferencinio profilio maksimumuose ir minimumuose. Moduluotas krūvininkų tankis irsta dėl difuzijos ir rekombinacijos, kurie vyksta tuo pačiu metu. Irimo laikas τ_G priklauso nuo gardelės periodo kaip $\eta(t)\sim\exp(-2t/\tau_G)$. Atidedant $1/\tau_G$ vertes nuo $(2\pi/\Lambda)^2$ grafiškai galima nustatyti D_a ir τ_R , kadangi

$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_D} \quad (3.14)$$

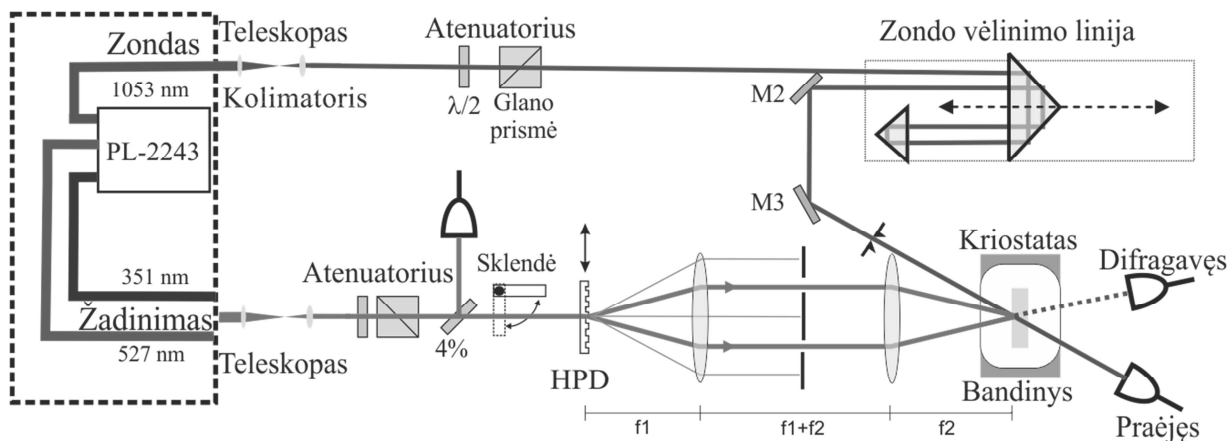
čia $\tau_D=\Lambda^2/(4\pi^2D)$ yra gardelės irimo laikas dėl difuzijos.

Diferencinio pralaidumo (DP) metodika

DP metodika yra paremta sugerties koeficiento pokyčiu dėl laisvų ar pagautų krūvininkų, ar dėl draustinės juostos renormalizacijos efektų. Indukuotas sugerties koeficientas $\Delta\alpha$ sąlygotas laisvų krūvininkų tankio kintančio laike $\Delta N(t)$ yra išreiškiamas taip $\Delta\alpha(t)=\sigma_{eh}\Delta N(t)$, čia σ_{eh} yra elektronų-skylių sugerties skerspjuvis zondui. Trumpalaikis zondo pralaidumas yra $T(t)=T_0\cdot\exp(-\Delta\alpha(t)\cdot d)$, čia $\alpha(t)=\alpha_0+\Delta\alpha(t)$ yra moduluotas sugerties koeficientas ir d sužadintos bandinio srities storis.

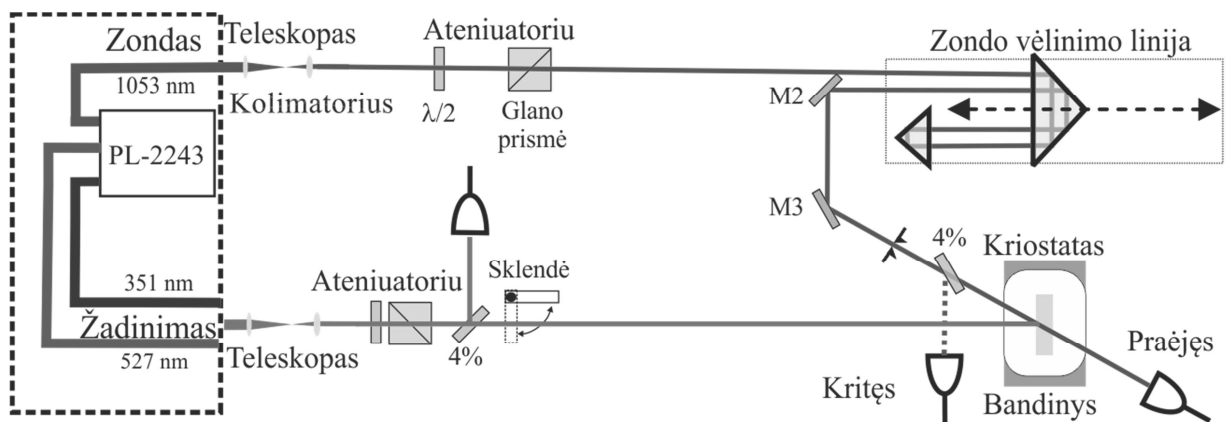
4 skyrius. Eksperimentinės schemos

Eksperimentinės ŠIDG ir DP schemos naudoja 10 ps impulso trukmės sinchronizuotų modų 10 Hz dažnio Nd³⁺:YLF lazerio pirmą (1053 nm), antrą (527 nm) ir trečią (351 nm) harmonikas. Dinaminės gardelės zondavimas buvo atliekamas naudojant optinį ir elektroninį užvėlinimus. ŠIDG eksperimentinė schema yra pavaizduota 4.1. paveiksle, DP schema yra pateikta 4.2. paveiksle.



4.1. pav. Eksperimentinė ŠIDG schema.

Skirtingų vėlinimo linijų naudojimas įgalina laisvų krūvininkų dinamikos registravimą mažuose ir dideliuose užvėlinimuose. Optinis zondo (pirma lazerio harmonika) užvėlinimas buvo naudojamas pradinių greitų kinetikų registravimui, o elektroninis vėlinimas, iki μs , naudojant 6-8 ns impulso trukmės 1064 nm bangos ilgio Nd³⁺:YAG lazerio spinduliuotę, lėtųjų kinetikos dalių zondavimui.



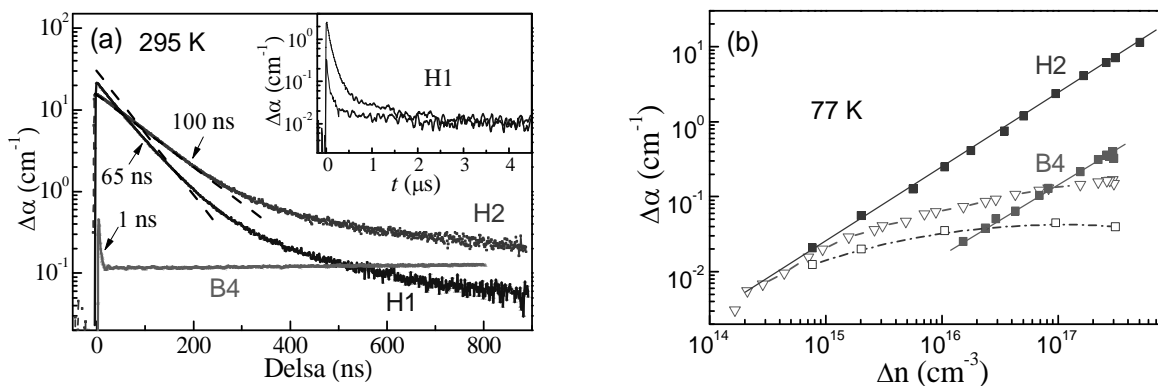
4.2 pav. Eksperimentinė DP schema su lygiagrečia geometrija.

Taipogi šiame darbe buvo atlikti DP matavimai su gylio rezoliucija, pasinaudojant statmenos geometrijos DP schema, kuri buvo prieinama Švedijos Karališkajame Technologijos Institute.

5 skyrius. Perteklinių krūvininkų dinamika 3C-SiC bandiniuose

5.1. Perteklinių krūvininkų rekombinacijos laikas tūriniam n-tipo 3C-SiC

Kadangi perteklinių krūvininkų gyvavimo laikas yra jautrus parametras kristalo kokybės nustatymui, SP matavimai buvo atlikti trijuose tūriniuose bandiniuose. Bandiniai buvo užauginti CVD ir CF-PVT technologijomis. Pamatuotos krūvininkų dinamikos esant injektuotam krūvininkų tankiui $\Delta n_{IN} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ parodytos 5.1.(a) paveiksle. Visuose bandiniuose pradinė kinetikos dalis buvo beveik eksponentinė. Esant didesniems vėlinimams, kinetikos pasižymėjo lėtu gesimu, apie ms trukmės. Šios lėtos gesimo komponentės yra stebimos esant sotinimo koncentracijomis Δn_s . Bandiniuose H1 ir H2 Δn_{PK} buvo tiesiškai priklausoma nuo Δn_{IN} , o Δn_s išsotino esant didesniems Δn_{IN} . Laipsniškas išsotinimas yra tipinis rodiklis, kad nepagrindiniai krūvininkai yra gaudomi gilių centrų [42, 43, 44]. Darant prielaidą, kad pagrindė elektronai lemia laisvų krūvininkų sugerties skerspjūvį, $\sigma_e \approx \sigma_{eh} = (4.4 \pm 0.5) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, galima teigti, kad Δn_s



5.1. pav. (a) Injektuotų krūvininkų tankių $\Delta n(t)$ kinetikos pamatuotos 3C-SiC bandiniuose esant pradiniam injektuotų krūvininkų tankiui $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Įdėtinis grafikas rodo kinetikas naudojant didesnę vėlinimo skalę. (b) $\Delta\alpha(t)$ priklausomybės nuo injektuotų krūvininkų tankio pamatuotos esant 77 K. Kinetikų viršūnių koncentracijos Δn_{PK} (kvadratai) ir sotinimo koncentracijos Δn_s (trikampiai) yra parodytos H2 ir B4 bandiniams. Įdėtinis paveikslas rodo eksperimentines schemas su statmena ir lygiagrečia geometrijomis.

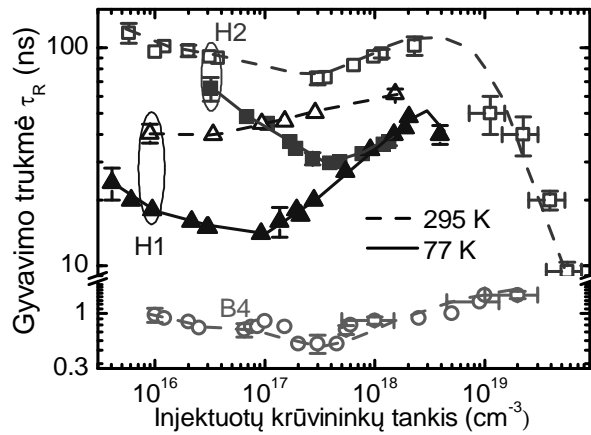
atitinka užpildytų gaudyklių tankį N_T [45]. Nustatytos N_T vertės, pagal sąryšį $\Delta\alpha=\sigma_{eh}\Delta N_T$, yra pateiktos 5.1. lentelėje. Kadangi mes žinome iš augintojų, kad bandiniai nėra legiruoti, nustatytos N_T vertės gali būti priskiriamos azoto priemaišai, kuri yra dominuojanti priemaiša 3C-SiC medžiagoje.

5.1. lentelė. Bandinių žymėjimas ir pagrindiniai parametrai kambario temperatūroje.

Bandinys	Storis d (μm)	Pusiausvirųjų krūvininkų tankis n_0 (cm^{-3})	$\tau_R(\text{ns})$ ($\Delta n=2\times 10^{17}$ cm^{-3})	Gaudyklių tankis N_T (cm^{-3})
H1 (Si)	255	$(3-5)\times 10^{15}$	55 (± 17)	$(7-10)\times 10^{14}$
H2 (Si)	160	$(1-3.5)\times 10^{17}$	88 (± 42)	5×10^{16}
B4 (6H-SiC)	800	$(1-5)\times 10^{16}$	0.8	1.45×10^{16}

Dominuojantys rekombinacijos mechanizmai buvo nustatyti iš pamatuotų τ_R priklausomybių nuo Δn_{IN} . Tam kad atskirti pamatuotų verčių statistinę variaciją nuo realių kitimų, buvo stengiamasi matuoti tą pačią bandinio vietą. 5.2. paveiksle yra parodytos pamatuotos gyvavimo trukmės keičiant injektuotų krūvininkų tankį H1 ir H2 bandiniuose prie dviejų skirtingų temperatūrų, 295 K ir 77 K. Bandinio B4 duomenys paimti iš [46].

H2 bandinyje esant 295 K temperatūrai buvo stebimas staigus gyvavimo trukmės didėjimas, kai krūvininkų tankiai buvo didesni negu 10^{19} cm^{-3} . Tai galima būtų priskirti Ožė proceso įtakotai rekombinacijai. Taikant sumodeliuotas kreives pagal sąryšį $C = (\tau_R \times \Delta n^2)^{-1}$ [47], buvo nustatytas toks Ožė koeficientas $C = 2.5 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$. Ši vertė yra 30 kartų mažesnę už nustatytą 4H-SiC politipe [48]. Tai gali būti paaiškinama skirtinga šių politipų energetinių juostų struktūra. Tiesioginiame Ožė procese e-e-h, turi būti išpildyta sąlyga $2E_g(X_{1C}-\Gamma_{15V}) \geq E_g(\Gamma_{1C}-\Gamma_{15V})$, kuri yra taikoma k-vektoriui [49, 50]; čia $E_g(X_{1C}-\Gamma_{15V})$ yra netiesioginis juostos tarpas ir $E_g(\Gamma_{1C}-\Gamma_{15V})$ tiesioginis juostos tarpas Γ simetrijos taške. Ši sąlyga yra pilnai išpildoma 4H-SiC politipe, bet 3C atveju yra ~ 1.3 eV energijos trūkumas. Dėl to didelių sužadinių srityje 3C-SiC politipe Ožė procesai vyksta dalyvaujant gardelės fononams ir krūvininkų gaudyklėms [51].



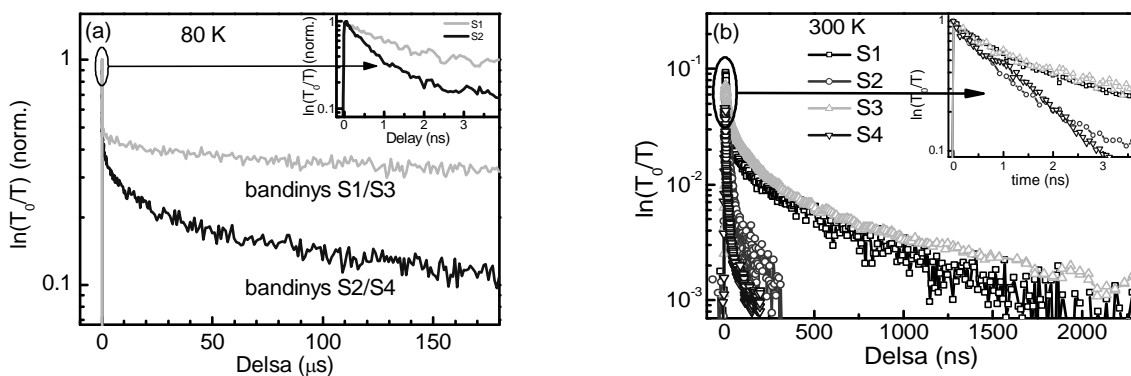
5.2 pav. Rekombinacijos trukmės τ_R keičiant perteklinių krūvininkų tankį tirtuose 3C-SiC bandiniuose, išmatuotos esant 295 K ir 77 K temperatūroms.

Sužadintų krūvininkų tankio intervale nuo $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ iki $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, pamatuotos τ_R visuose bandiniuose rodė V-formos priklausomybę, kuri pasidarė dar labiau išreikšta žemose temperatūrose. Gyvavimo trukmės padidėjimas mažų injektuotų krūvininkų tankių srityje yra sąlygojamas nepagrindinių krūvininkų pagavimu, ir taigi tai nėra laikoma SRH rekombinacija, kuri vyksta per gilius centrus [52, 53], kai injektuotų krūvininkų tankis yra didesnis už pusiausvirųjų krūvininkų tankį. Yra manoma, kad krūvininkų rekombinacija 3C-SiC turėtų vykti per defekto lygmenį artimą Z_1/Z_2 lygmeniui 4H-SiC [54, 55, 56]. Šis centras yra susijęs su C vakansija ir yra dominuojantis defektas lemiantis krūvininkų gyvavimo trukmę 4H-SiC politipe. Nepaisant sudėtingos šio centro, kuris turi tris galimas krūvio būsenas, užpildos priklausomybės nuo žadinimo, aukštų žadinimų srityje, kol nepasireiškia Ožė procesas, yra stebimas pastovus krūvininkų gyvavimo laikas [48, 56]. Mes spėjame, jog išmatuota V-formos gyvavimo trukmės priklausomybė yra sąlygota kintančio pagrindinių krūvininkų pagavimo potencinio barjero. dėl gardelės relaksacijos centrui pereinant į skirtingas krūvio būsenas. Elektronų ir skylių pagavimo skerspjūvis Z_1/Z_2 centrui 3C-SiC politipe yra eile mažesnis už nustatytus 4H-SiC politipe, $s_h \approx 10^{-14} \text{ cm}^2$ ir $s_e \geq 10^{-15} \text{ cm}^2$ [57]. Panaudojant šias vertes ir sąryšį $\tau_{HL} \approx (v_{th} \times s_e \times N_R)^{-1}$, čia v_{th} yra šiluminis greitis ($\sim 2 \times 10^5 \text{ cm/s}$ esant 300 K) ir N_R yra defektų koncentracija, galima nustatyti, kad tirtuose bandiniuose H1 ir H2 $N_R \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, o bandinyje B4 $N_R \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Šios nustatytos vertės yra viena ar dviem eilėm didesnės už tas aukštos kokybės 4H-SiC epitaksiniuose sluoksniuose.

5.2. Krūvininkų dinamika 3C-SiC epitaksiniuose sluoksniuose užaugintuose sublimacijos technologija ant skirtingų SiC padėklų

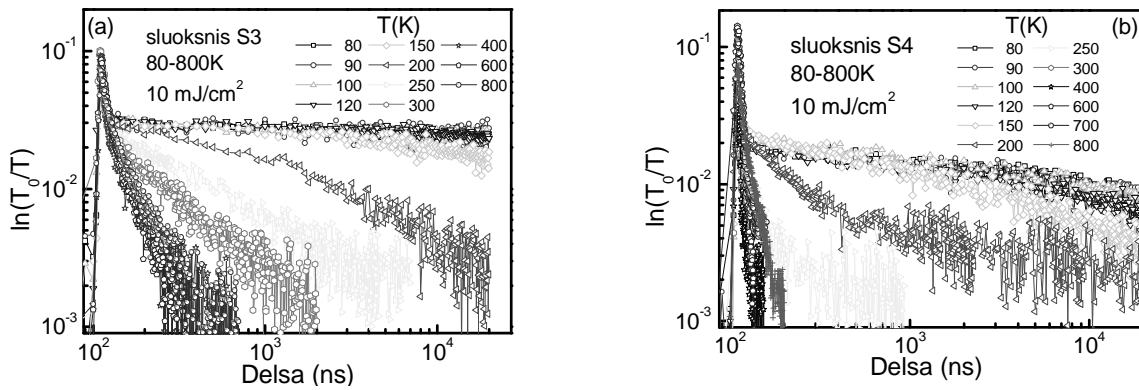
SP ir ŠIDG metodikomis buvo ištirti keturi (111)-krypties, $18\div 29\ \mu\text{m}$ storio 3C-SiC sluoksniai užauginti ant skirtingų padėklų sublimacijos technologija [35, 58]. Du iš jų, S1 ir S2, buvo užauginti ant, atitinkamai, nepoliruoto ir poliruoto 6H-SiC (0001) lakštų. Kiti du, S3 ir S4, buvo užauginti homoepitaksiškai ant 3C padėklų užaugintų, atitinkamai, VLS metodu ir VLS/CVD metodu [59, 60].

Greitosios kinetikų dalys, kurios pavaizduotos 5.3. paveiksle, atspindi laisvųjų krūvininkų rekombinaciją, o lėtojoje zondą sugeria tik pagauti krūvininkai. Įprastai priemaišų sugerties skerspjūvis artimojoje IR spektro dalyje yra didesnis už laisvųjų krūvininkų sugerties skerspjūvį [45]. Mažėjant temperatūrai, šiluminio pagautų krūvininkų sužadavimo tikimybė sumažėja, ko pasekoje krūvininkų pagavimo-sužadavimo ciklas tampa lėtesnis, o tai savo ruožtu sąlygoja lėtą kinetikos eigą, kaip pavaizduota 5.4. paveiksle.



5.3 pav. SP kinetikos pamatuotos bandiniuose S1/S3 ir S2/S4 esant (a) 80 K ir (b) 300 K. Įdėtiniai paveikslai rodo pradinę greitą kinetikų dalį su ps laikine rezoliucija.

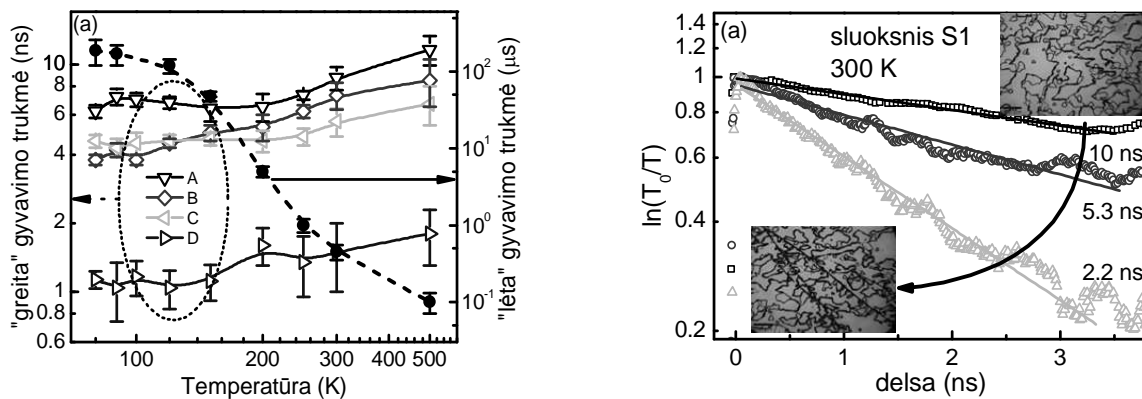
Panašios lėtųjų kinetikos dalių eigos bandiniuose S1/S3 ir S2/S4 kintant temperatūrai (5.4. paveikslas) gali būti apibūdinamos keliais pagrindiniais procesais vykstančiais plačiatarpiuose puslaidininkiuose [61]. Lėtoji kinetikų dalis atspindi krūvininkų pagavimo-sužadavimo procesą sąlygojamą gaudyklių, tuo tarpu lėtosios dalies amplitudė yra įtakojama kitų procesų vykstančių gaudyklių energetiniuose lygmenyse. Apibendrinant pamatuotas temperatūrines lėtųjų kinetikos dalių



5.4 pav. Pamatuotos temperatūrinės SP kinetikų priklausomybės (a) bandinyje S3 (b) bandinyje S4.

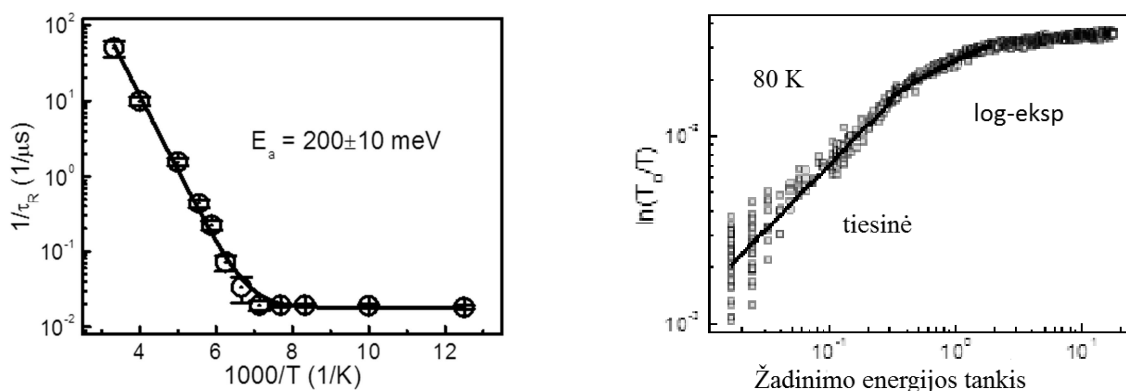
priklausomybes galima daryti išvada, kad gaudyklių koncentracija lemia signalo amplitudę, tuo tarpu gaudyklių energijos lygmenys lemia signalo gesimo spartą.

Pamatuotos temperatūrinės krūvininkų gyvavimo trukmės, nustatytos iš greitų kinetikų dalių τ_{fast} , priklausomybės visuose bandiniuose (5.5(a) paveikslas) parodė panašias tendencijas, kurios gali būti priskiriamos prie difuzijos riboto krūvininkų rekombinacijos erdvinuose defektuose, ir kurios buvo taip pat stebimos storuose SiC ir GaN sluoksniuose [62, 63]. Atrodo, jog mūsų atveju viršuje pateiktas modelis negalioja, kadangi SRH rekombinacijos procesas SiC pagrinde vyksta per gilius centrus, susijusius su savaisiais gardelės defektais, kaip Z1/Z2. Kadangi SRH rekombinacijos sparta yra dalinai sąlygojamas difuzijos koeficiento, galima daryti prielaidą, kad erdviųjų defektų įtaka krūvininkų rekombinacijai nėra vyraujanti, bet vis tik svarbi, nes tokie defektai yra taip pat žinomi kaip taškinių defektų sanaupos židiniai, kurie savo ruožtu



5.5 pav. Pamatuotos temperatūrinės priklausomybės (a) greitai ir lėtai rekombinacijos dalim (b) SP kinetikos pamatuotos kambario temperatūroje kintant domenų paviršiaus tankiui. padidina krūvininkų rekombinacijos efektyvumą.

Kadangi krūvininkų gyvavimo laikai yra ilgesni sluoksniuose su mažesne paviršinių defektų koncentracija, SP matavimai buvo atlikti keliuose sluoksnių taškuose, kur bandinio nehomogeniškumas buvo aiškiai matomas. Pamatuotos τ_{fast} vertės skirtinguose bandinio taškuose skiriasi keletą kartų (5.5(b) pav.). Galima daryti išvadą, kad didesnė struktūrinių defektų koncentracija, šiuo atveju domenų paviršiai, nulemia mažesnę krūvininkų gyvavimo laiką. Tačiau šie erdviniai defektai nėra pagrindiniai krūvininkų rekombinacijos kanalai.



5.6 pav. (a) Arenijaus (Arrhenius) grafikas pagautų krūvininkų gyvavimo trukmei. (b) Elektriškai aktyvių gaudyklių koncentracijos nustatymas taikant (3) ir (4) lygtis.

Iš pamatuotos temperatūrinės lėtos kinetikos dalies, sąlygotos dominuojančios priemaišos, priklausomybės galime nustatyti tos priemaišos aktyvacijos energiją ir taigi jos prigimtį. Pagal 5.6. paveiksle pateiktą grafiką buvo nustatyta tokia aktyvacijos energija $E_a = 200 \pm 10$ meV. Ši vertė yra artima šiluminei aliuminio aktyvacijos energijai, kuri yra beveik vienoda visuose SiC politipuose [64, 65]. Al jonizacijos energija SiC yra apie 270 meV [66]. Pagal Haineso (ang. Haynes) taisyklę akceptoriams su aliuminiu surišto eksitono energija E_{ABX} yra nustatoma pagal [67]

$$E_{BAX} = -14.9 \text{ meV} + 0.16E_A \quad (5.1)$$

čia E_A yra akceptoriaus jonizacijos energija. Nustatyta E_{ABX} vertė aliuminio priemaišai 3C-SiC politipe yra apie 28 meV. Šiluminės aktyvacijos energijos sumažėjimas yra aprašomas Debajaus ir Konvelio (ang. Debye and Conwell) modeliu [68]:

$$E_{Al} = E_{Al_0} - \alpha \sqrt[3]{N_{Al}} \quad (5.2)$$

čia a yra susijęs su kompensacijos laipsnį parodančiu parametru K sąryšyje $\alpha=f(K)(e^2/4\pi\epsilon_0\epsilon_r)$, čia ϵ_r yra dielektrinė konstanta. Šiluminės aktyvacijos energijos sumažėjimas mūsų tirtuose bandiniuose yra apie 40 meV. Įskaičiuojant tai ir E_{ABX} gauname, kad aliuminio šiluminės aktyvacijos energija yra apie 202 meV. Pastaroji vertė gerai sutampa su E_a nustatyta pagal Arenijaus grafiką.

Kadangi žemose temperatūrose gaudyklių pagautų krūvininkų terminis sužadimas yra nežymus, indukuotos sugerties koeficientas $\Delta\alpha$ parodo elektriškai aktyvių centrų koncentraciją. Taigi, panaudojant pamatuotą indukuotos sugerties priklausomybę, pakankamai dideliuose vėlinimuose, kai laisvi krūvininkai jau yra rekombinavę, nuo žadinimo energijos tankio galima nustatyti gaudyklių koncentraciją bandinyje [45, 69]. Bendru atveju, pusiau begalinio storio sluoksnyje gaudyklių energijos lygmenų užpilda keičiant optiškai sužadintų krūvininkų tankį gali būti apibūdinta pagal SP signalo amplitudės ($\ln(T_0/T)$) grafiką logaritminėje skalėje (5.6(b) pav.), kuris vadinamas ekspozijos charakteristika (EC). Paprasčiausiu atveju, kuris tenkina $3C/6H$ sandūros sąlygas, galime teigti, kad gaudyklių lygmenų užpilda baigtinio storio $3C$ sluoksnyje yra pagrindinis reiškiny, kuris sąlygoja sugerties koeficiento moduliaciją. Taigi, SP signalo amplitudė gali būti nusakoma žemiau pateiktomis lygtimis:

$$\ln\left(\frac{T_0}{T(t)}\right) = \sigma_{trap} \int_0^d \Delta N(z,t) dz \quad \text{kai } \Delta N_0 < P_{trap} \quad (5.3)$$

galiojančiai tiesinei EC daliai, ir

$$\ln\left(\frac{T_0}{T(t)}\right) = \sigma_{trap} \times \frac{P_{trap}}{\alpha} \times \left(1 + \ln\left(\frac{\Delta N_0}{P_{trap}}\right) - \exp\left(-\alpha \times \left(d - \frac{\ln\left(\frac{\Delta N_0}{P_{trap}}\right)}{\alpha} \right) \right) \right) \quad \text{kai } \Delta N_0 \geq P_{trap} \quad (5.4)$$

galiojančiai netiesiniai EC daliai. Čia ΔN_0 yra pradinis injektuotų krūvininkų tankis, α yra žadinančio spindulio sugerties koeficientas, σ_{trap} yra gaudyklių sugerties skerspjūvis zondui ir P_{trap} yra elektriškai aktyvių gaudyklių koncentracija. Šios lygtys turi būti taikomos tik žemų temperatūrų srityje, kai terminė priemaišų jonizacija yra nepaisytina.

Nustatytos koncentracijų vertės panaudojant 5.3 ir 5.4 lygtis tirtuose bandiniuose (5.2 lentelė) gerai sutampa su koncentracijoms, kurios buvo nustatytos antrinių jonų masės spektrometrija (ang. secondary ion mass spectrometry, SIMS).

5.2. Lentelė. Nustatyti parametrai S1, S2, S3 ir S4 3C-SiC sluoksniams: sluoksnio storis, vidutinė Al koncentracija pagal SIMS, vidutinė laisvų krūvininkų gyvavimo trukmė (τ_R), zondo sugerties skerspjūvis (σ_{trap}) ir elektriškai aktyvių centrų koncentracija (P_{trap}) nustatyta iš mažesnio defektyvumo (MD) ir didesnio defektyvumo (DD) bandinio paviršiaus sričių.

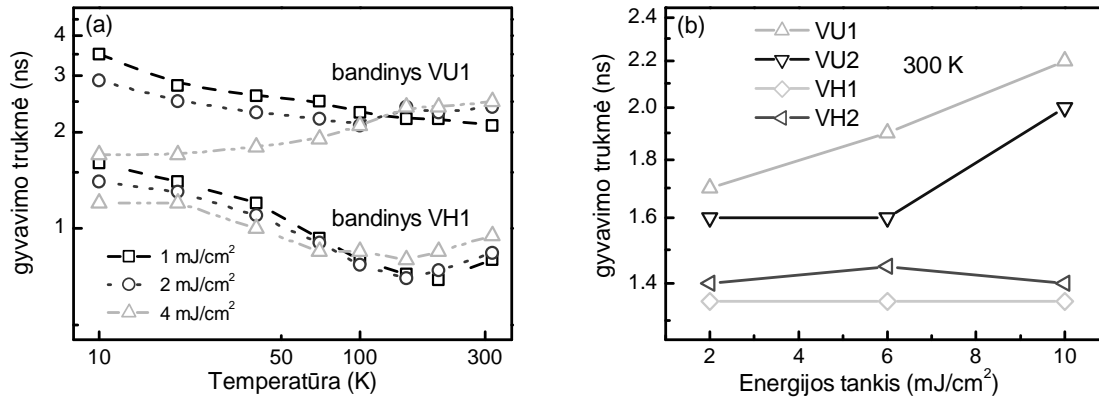
Bandinys		S1	S2	S3	S4
[Al] (SIMS) ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)		5	10	9	9
σ_{trap} ($\times 10^{-17} \text{ cm}^2$)	MD	3.4	2.7	2.5	3.0
	DD	2.2	2.5	2.0	1.6
P_{trap} ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	MD	3.7	8.2	7.8	8.6
	DD	5.6	9.3	8.6	9.1

6 skyrius. Krūvininkų dinamika 3C-SiC sluoksniuose užaugintuose skirtingomis technologijomis

6.1. VLS auginimo technologinių parametru įtaka epitaksinių sluoksnių savybėms

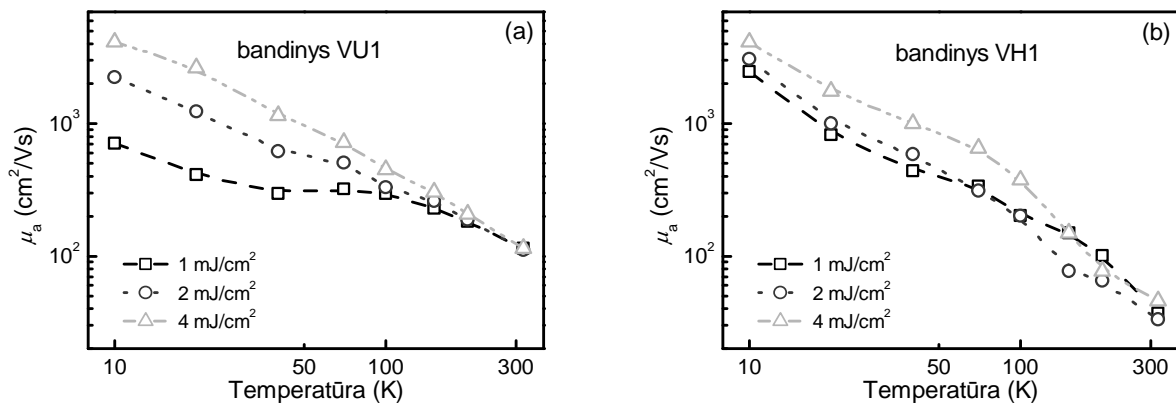
Manoma, kad VLS auginimo kapsulės vakuumavimas prieš auginimo procesą yra vienas svarbiausių veiksnių įtakojančių 3C augimo stabilizavimą VLS procese [33]. Priemaišinio azoto atomų, kurie yra įvedami nukleacijos metu, vaidmuo yra labai svarbus 3C politipo formavimuisi. Nėra gerai žinoma, kaip vyksta pradiniai kristalo augimo etapai, bet manoma, kad galutinis auginamo politipo santykis užaugintame kristale atitinka tą, kuris buvo bandinio paviršiuje propano dujų įleidimo į reaktorių momentu. Mūsų atliktas tyrimas su bandiniais užaugintais naudojant prailgintą vakuumavimą (PV) ir trumpą vakuumavimą (TV) parodė, jog krūvininkų gyvavimo trukmės τ_R yra ilgesnės PV bandiniuose (pažymėtais VU1 ir VU2) lyginant su TV bandiniais (VH1 ir VH2), kaip parodyta Pav.6.1.(a). Mažas pamatuotų verčių pasiskirstymas, stebimas tarp dviejų grafikų pavaizduotų 6.1. paveiksle, yra priskiriamas bandinių nehomogeniškumui. Kadangi laisvų krūvininkų gyvavimo trukmė yra jautrus

parametras kristalo kokybei nusakyti, galima daryti išvadą, jog ilgesnė vakuonavimo procedūra lemia mažesnę rekombinacinių centrų koncentraciją tokiuose bandiniuose, taigi ir aukštesnę kristalų kokybę.



6.1 Pav. (a) Laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės pamatuotos prie skirtingų žadinių ir temperatūrų PV bandinyje (VU1) ir TV bandinyje (VH1). (b) Laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės prie skirtingų žadinių kambario temperatūroje pamatuotos PV bandiniuose (VU1 ir VU2) ir TV bandiniuose (VH1 ir VH2) diferencinio pralaidumo metodika.

Ambipolinis judris žemesnėse temperatūrose (< 100 K) pamatuotas TV sluoksnyje rodo išsotinimą didėjant žadinimo energijai (6.2.(b) pav.). Tuo tarpu PV sluoksnyje pamatuotas judris didėja prie didesnių žadinių (6.2.(a) pav.). Tokia judrio priklausomybė nuo žadinimo yra priskiriama jonizuotos priemaišos ekranavimo efektui [70]. Galima pastebėti, kad PV bandinyje pamatuotas judris yra kiek didesnis negu TV bandinyje. Aukštesnėse temperatūrose (> 100 K) krūvininkų sklaida gardelės akustiniais



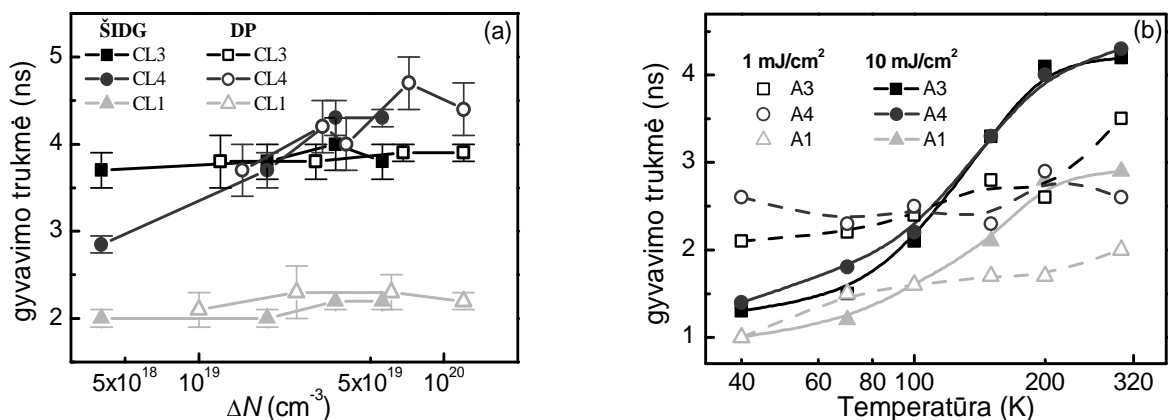
6.2 pav. Temperatūrinės ambipolinio judrio priklausomybės pamatuotos VU1 ir VH1 bandiniuose.

fononais labiau pasireiškia TV bandinyje, kas lemia greitesnį judrio sumažėjimą. Tai taipogi patvirtina geresnę PV bandinio kokybę.

Pagal sąryšį $1/\mu = 1/\mu_{\text{gard}} + 1/\mu_{\text{priem}}$ [38, 71], ir kadangi priemaišų įtakotas judris μ_{priem} yra apytiksliai toks pat abiejose bandiniuose, gardelės įtakotas judris μ_{gard} nulemia suminį judrį aukštesnėse temperatūrose (> 100 K). Viršuje pateikti eksperimentiniai rezultatai rodo, jog bandiniai užauginti naudojant prailgintą vakuumavimo procedūrą turi optimizuotas struktūrines savybes.

6.2. Homoepitaksinių CVD sluoksnių tyrimas

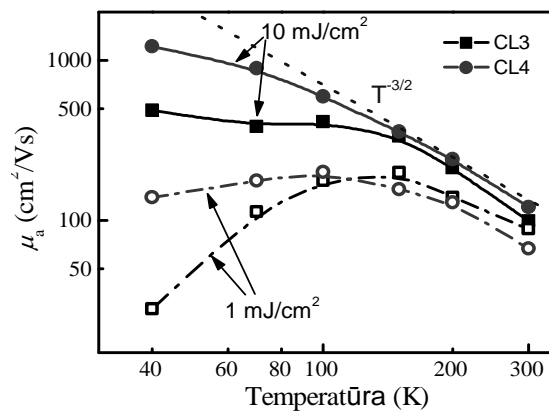
Keletas 3C-SiC plonų sluoksnių buvo užauginta CVD technologija ant VLS padėklų. 6.3.(a) paveiksle yra pateikiamos homoepitaksinių sluoksnių CL1, CL3 ir CL4 elektrinių parametrų priklausomybės nuo žadinimo energijos tankio, kurios buvo pamatuotos DP ir ŠIDG metodikomis. Remiantis SRH modeliu, gaudyklių įsotinimo srityje krūvininkų gyvavimo trukmė nepriklauso nuo žadinimo energijos. Tai ir buvo stebėta CL1 ir CL3 bandiniuose, kurie pasižymėjo mažesnėmis laisvų krūvininkų koncentracijomis. Tuo tarpu bandinyje CL4 gaudyklių įsotinimo režimas buvo pasiektas prie didesnio injektuotų krūvininkų tankio, $\Delta N > 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Pamatuotos gyvavimo trukmės bandinyje CL1 keičiant žadinimo energijos tankį buvo vienodos, apie 2 ns. Galima paminėti, jog krūvininkų dinamika šiame ganėtinais ploname bandinyje buvo įtakojama 6H-SiC padėklo, kuris pasižymėjo trumpa krūvininkų gyvavimo trukme (~ 1.1 ns), kadangi žadinantysis lazerio pluoštas prasiskverbavo pro epitaksinį sluoksnį



6.3 pav. Laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės esant (a) skirtingiems žadinimams ir (b) skirtingoms temperatūroms prie 1 ir 10 mJ/cm² žadinimo. Užpildyti ir tušti simboliai atitinka duomenis gautus atitinkamai ŠIDG ir DP metodikomis.

generuodamas laisvus krūvininkus ir padėkle.

Kaip parodyta 6.3.(b) paveiksle pamatuotos τ_R vertės esant mažesniems žadinimams beveik nekito kintant temperatūrai, kas parodė, kad šiame temperatūros intervale galioja didelių sužadinių sąlyga. Tačiau naudojant 10 mJ/cm^2 žadinimo energijos tankį pamatuotos τ_R vertės kambario temperatūroje padidėjo visuose bandiniuose, ypač bandinyje CL4, kas rodo gaudyklių įsotinimo efektą [40]. Esant dideliems žadinimams ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$), gyvavimo trukmės visuose bandiniuose mažėjo iki $\sim 1 \text{ ns}$ mažinant temperatūrą. Tai gali būti dėl krūvininkų terminės emisijos iš gaudyklių ribojimo, arba dėl padidintos krūvininkų difuzijos sukulto didelio krūvininkų tankio [46].

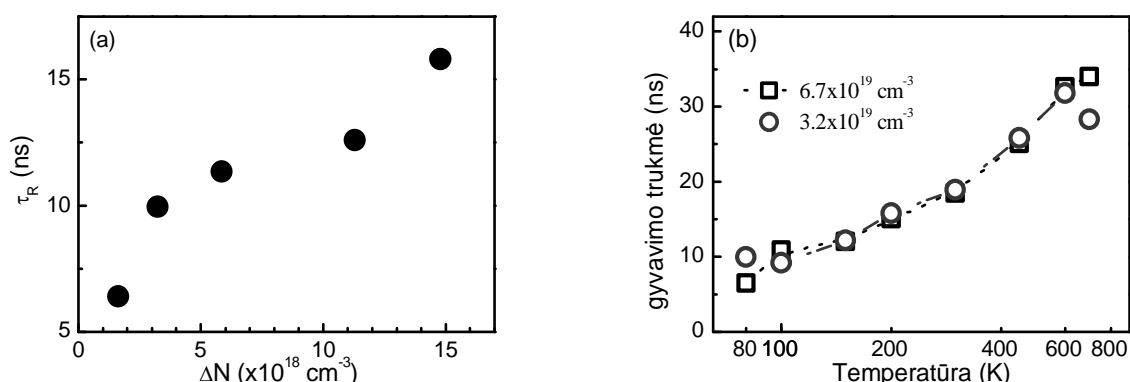


6.4 pav Ambipolinis judris CL3 ir CL4 bandiniuose pamatuotas esant 1 ir 10 mJ/cm^2 žadinimo energijos tankiams keičiant temperatūrą.

Temperatūrinės D_a ir μ_a priklausomybės atskleidė skirtingus krūvininkų sklaidos mechanizmus CL3 ir CL4 bandiniuose (pav. 6.4.), ypač prie $T < 150 \text{ K}$. Žymiai mažesnė judrio vertė CL3 bandinyje, temperatūros intervale nuo 40 K iki 60 K, parodė efektyvių sklaidos centrų buvimą šiame bandinyje. Šių centrų prigimtis gali būti jonizuotos priemaišos arba įkrauti defektų agregatai. Didinant žadinimo energijos tankį, ambipolinio judrio vertė padidėja viena eile. Toks efektas atsiranda dėl įkrautų priemaišų ekranavimo dideliu perteklinių krūvininkų tankiu. Aukštesnėse negu 150 K temperatūrose μ_a mažėja proporcingai temperatūrai kaip $T^{-3/2}$, kas parodo krūvininkų sklaidą akustiniais fononais. Apibendrinant, mažesnės judrio vertės buvo pamatuotos CL3 bandinyje lyginant su CL4 bandiniu. Remiantis žemos temperatūros fotoluminescencijos matavimais buvo nustatyta didesnė azoto priemaišų koncentracija CL3 bandinyje negu CL4 bandinyje, taigi galime daryti išvadą, jog jonizuotų priemaišų

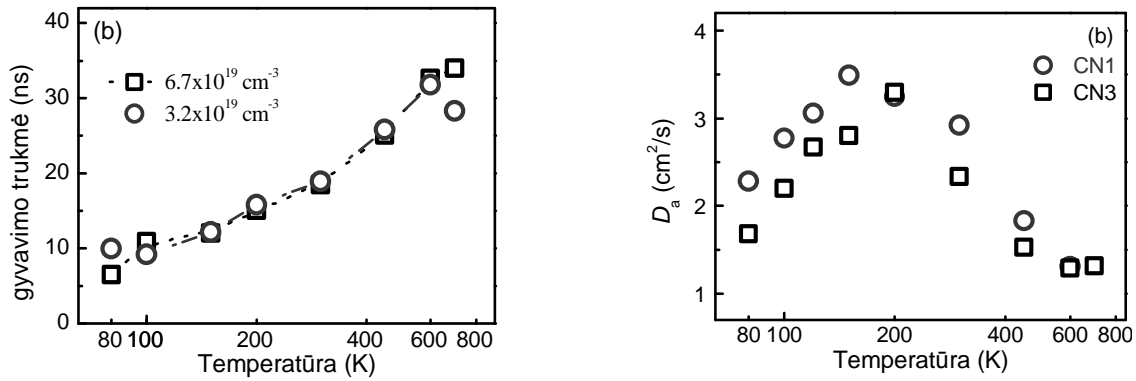
ir struktūrinių defektų, kurie įtakoja krūvininkų sklaidą, koncentracijos yra didesnės CL3 bandinyje lyginant su CL4 bandiniu.

Tos pačios matavimo metodikos buvo panaudoto ir bandiniams CN1, CN2, CN3, kurie buvo šiek tiek didesnio storio už CL serijos bandinius. Visuose bandiniuose, esant kambario temperatūrai, krūvininkų gyvavimo trukmė didėjo didinant perteklinių krūvininkų tankį. Ilgiausios trukmės buvo pamatuotos CN1 bandinyje, tuo tarpu trumpiausios, apie 7 ns, CN2 (6.5.(a) pav.). Pastovus gyvavimo trukmės didėjimas CN1 bandinyje buvo stebimas ir temperatūros intervale nuo 80 K iki 700 K (6.5. pav.(b)).



6.5 pav. (a) Greitos DP kinetikų komponentės keičiant žadinimo energijos tankį esant kambario temperatūrai. (b) Krūvininkų gyvavimo trukmės, nustatytos iš lėtų DP kinetikų komponentių, priklausomybė nuo temperatūros.

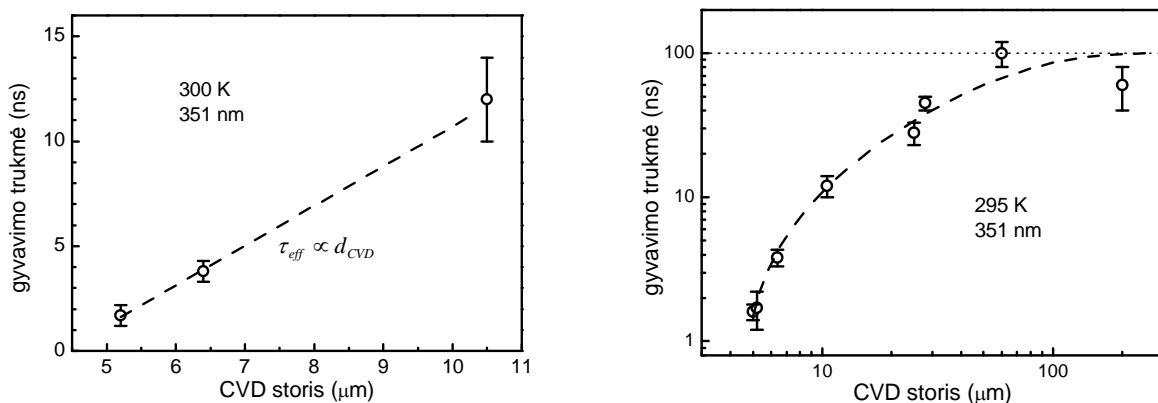
Bandinyje CN1 buvo pamatuota didesnis ambipolinis difuzijos koeficientas, D_a , ir ambipolinis judris negu bandinyje CN3 (6.6. Pav.). Ambipolinio judrio mažėjimas temperatūros intervale nuo 150 K iki 700 K vyksta su polinkiu nuo -1.6 iki -1.8, priklausomai nuo bandinio. Tokia judrio priklausomybė nuo temperatūros yra priskiriama krūvininkų sklaidai akustiniais fononais, duodanti polinkį -1.5. Taigi papildoma erdviųjų defektų įtaka krūvininkų sklaidai yra nežymi. Aukštesnės ambipolinio judrio vertės prie kambario temperatūros buvo pamatuotos CN1 bandinyje lyginant su CN3 bandiniu. Nedidelis judrio verčių padidėjimas žemesnėse temperatūrose ($< 150 \text{ K}$) CN1 bandinyje lyginant su CN3 bandiniu rodo mažesnę taškinių ir erdviųjų defektų sklaidos įtaką pirmajame bandinyje. Ambipolinio judrio sumažėjimas didinant žadinimo energijos tankį, temperatūros intervale nuo 80 K iki 150 K, atsiranda dėl draustinės juostos renormalizacijos, kuri taip pat buvo stebima aukštos kokybės 3C-SiC epitaksiniuose sluoksniuose [72].



6.6 pav. Ambipolinio difuzijos koeficiento (a) ir ambipolinio judrio (b) priklausomybės pamatuotos CN1 ir CN2 bandiniuose.

Pamatuotos τ_R ir μ_a vertės yra didesnės negu pamatuotos CL serijos bandiniuose, aprašytuose aukščiau. Tai gali būti priskiriama geresnėms CVD sluoksnių augimo sąlygoms, o ypatingai dėl aukštesnių naudotų temperatūrų. Krūvininkų gyvavimo trukmės augimas didinant žadinimo energijos tankį rodo gaudyklių išotinimą, kuri yra tipiška 3C-SiC sluoksnių savybė [73]. Taigi, gaudyklių išotinimo efektas yra pagrindinis netiesinis krūvininkų rekombinacijos kanalas pamatuotoje $\tau_R(\Delta N)$ priklausomybėje CN1 bandinyje. Gauta $D_a(T)$ ir $\tau_R(T)$ koreliacija CN1 bandinyje parodo, kad krūvininkų rekombinacija yra stipriai įtakojama paviršiaus defektų. Apibendrinant galima daryti išvadą, kad geriausią 3C-SiC medžiagos kokybę užauginta CVD technologija buvo pasiekta naudojant aukščiausią auginimo temperatūrą.

Galiausiai, 6.7. paveikslas rodo laisvųjų krūvininkų efektinės gyvavimo trukmės priklausomybę nuo CVD sluoksnio storio 5÷11 μm storių intervale. Kadangi sluoksniuose pasižyminčiuose maža laisvų krūvininkų gyvavimo trukme, kristalo



6.7 pav. Krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo sluoksnio storio pamatuotos homoepitaksiniuose bandiniuose užaugintuose ant VLS padėklų (a) ir skirtingų padėklų (b).

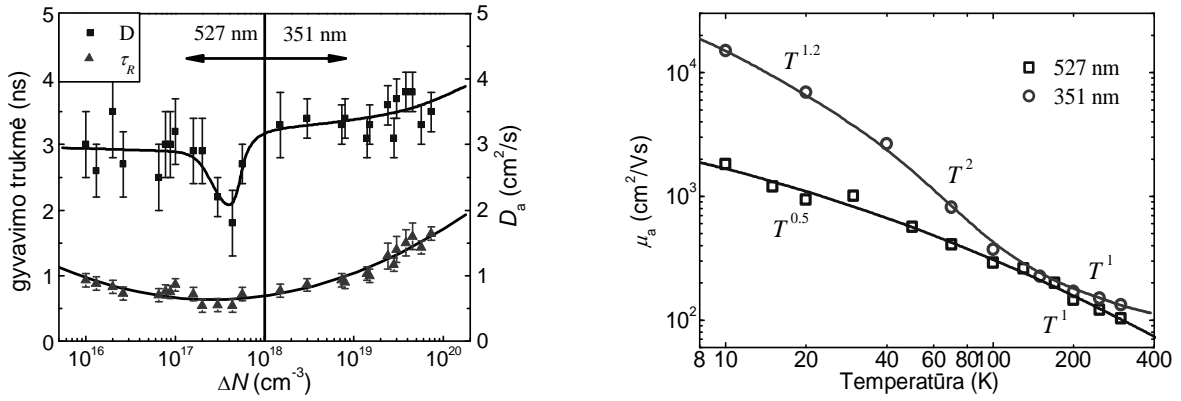
paviršius turi nežymią įtaką, galima daryti prielaidą, kad pagrindinis krūvininkų nespindulinis rekombinacijos kanalas yra per gilius defektus. Buvo parodyta [57, 74], kad šie gilūs energijos lygmenys draustinėje juostoje gali būti susiję su anglies atomų vakansijomis V_C . Taigi, galima daryti išvadą, kad rekombinacinių centrų, susijusių su V_C , koncentracija sumažėja didinant sluoksnio storį su proporcingumo koeficientu ~ 2 .

6.7(b) pav. pateikta platesnio storių intervalo efektyviosios gyvavimo trukmės priklausomybė nuo CVD bandinių, užaugintų ant skirtingų padėklų, storio, remiantis mūsų gautais ir literatūroje pateikiamais duomenimis [70, 75, 76]. Krūvininkų gyvavimo trukmės nustatytos atliekant eksperimentinių kinetikų aproksimaciją eksponente.

Iš 6.7. paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad sluoksniuose, kurių storis > 200 μm , pamatuotos laisvų krūvininkų efektinės gyvavimo trukmės įsisotina ties ~ 100 ns. Tai gali būti priskiriama paviršinės rekombinacijos įtakos padidėjimu, kai krūvininkų gyvavimo trukmės pasidaro pakankamai ilgos, ko pasekoje krūvininkai gali nudifunduoti iki paviršiaus ir ten rekombinuoti; tai taipogi žymi tokių sluoksnių mažą tūrinį defektiškumą [74, 76]. Kadangi pamatuotas τ_R atitinka efektyvią gyvavimo trukmę, susidedančią iš krūvininkų tūrinės ir paviršinės gyvavimo trukmės, galime teigti, kad paviršinė krūvininkų rekombinacija yra pagrindinis veiksnys ribojantis pamatuotas τ_R vertes storesniuose sluoksniuose.

6.3. Fotelektrinės tūrinių 3C-SiC bandinių užaugintų sublimacijos technologijomis savybės

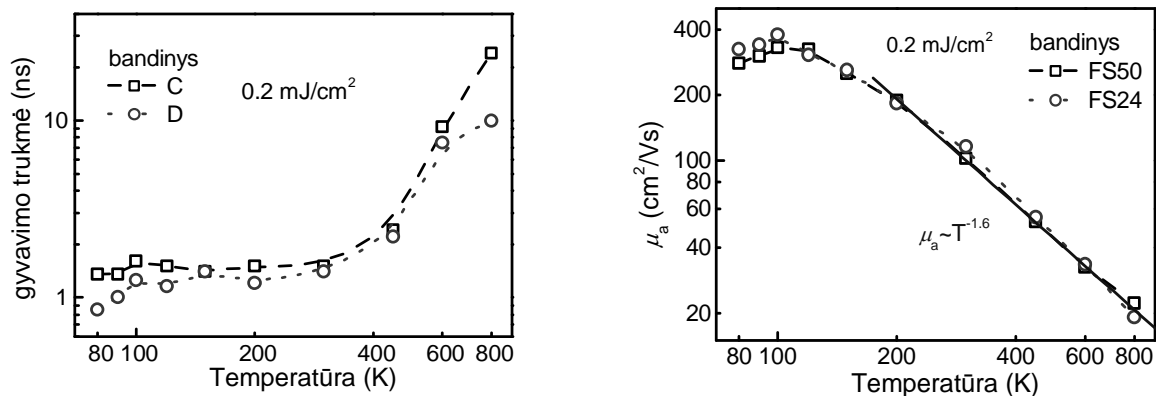
Tūriniai 3C-SiC bandiniai užauginti įvairiomis sublimacijos technologijomis (CF-PVT ir SE) naudojant VLS ir kitus padėklus buvo tiriami DP ir ŠIDG metodikomis. Bandiniai B4 ir B5 buvo užauginti CF-PVT technologija atitinkamai ant VLS (111) 3C-SiC ir grafito padėklų. Pamatuotas D_a mažėjimas nuo žadinimo energijos tankio (6.8. pav.) yra priskiriamas draustinės juostos renormalizacijai, o po to sekantis padidėjimas (kai $N > 10^{18}$ cm^{-3}) - krūvininkų sklaidos tikimybės sumažėjimui esant dideliems krūvininkų tankiams, artimiems Moto virsmo tankiui. Tokia difuzijos tendencija buvo stebima ir anksčiau nelegiruotuose, mažo defektyvumo 4H-SiC bandiniuose [77, 78], bet ne VLS/CVD užaugintuose 3C-SiC sluoksniuose [70]. Pastarajame tyrime, žemos temperatūros fotoluminescencijos matavimai parodė didelę azoto priemaišų



6.8 pav. (a) Pamatuotos D_a ir τ_R priklausomybės nuo krūvininkų koncentracijos bandinyje B4. (b) Pamatuotos μ_a priklausomybės nuo temperatūros tūrinio (kvadratai) ir paviršinio (apskritimai) sužadavimo sąlygomis.

koncentraciją ($\sim 5 \times 10^{18}$ cm⁻³) tiriamame bandinyje, dėl ko krūvininkų sklaida buvo stipriai įtakojama šių priemaišų ir nebuvo stebima krūvininkų tankio įtaka. Gyvavimo trukmės padidėjimas dviem eilėmis esant didesniems krūvininkų tankiams buvo stebėtas anksčiau VLS būdu užaugintuose 3C epitaksiniuose sluoksniuose [70], kuris galėjo būti įtakotas dėl krūvininkų gaudyklių sotinimo. Kita vertus, D_a ir τ_R vienalaikis padidėjimas parodė mažėjančią krūvininkų sklaidos tikimybę išsigimusioje plazmoje.

Pamatuotos ambipolinio judrio vertės (6.8.b pav.) žemesnėse už kambario temperatūrą buvo didesnės negu tos pamatuotos ankstesniuose tyrimuose [70]. Temperatūros intervale nuo 100 K iki 300 K, pamatuota ambipolinio judrio tendencija, tiek tūrinio, tiek paviršinio sužadavimo sąlygomis, atskleidė tikėtiną krūvininkų sklaidą dėl gardelės fononų ir erdvinių defektų, kuri pasižymi polinkiu lygiu vienetui. Žemesnėse negu 100 K temperatūrose, kur krūvininkų sklaida yra tikėtina tik taškiniiais ir erdviniais defektais, mes stebėjome neįprastai stiprią judrio priklausomybę nuo temperatūros, pažymėta polinkiu $k > 1$, kur $\mu \propto T^k$. Labai tikėtina, jog ši tendencija atsiranda dėl krūvininkų difuzijos padidėjimo, sukkelto stipriai išsigimusios krūvininkų plazmos. Iš šio ypatumo seka, kad pagrindinis krūvininkų sklaidos mechanizmas yra susijęs su krūvininkų savitarpio sąveika, o ne dėl struktūrinių defektų įtakotos sąveikos. Panaši judrio priklausomybė nuo temperatūros buvo nustatyta ir naudojant 527 nm žadinimą, t.y. esant mažesniems tūriniais krūvininkų tankiams. Kadangi tokia judrio ypatybė stipriai sužadintuose 3C-SiC epitaksiniuose sluoksniuose anksčiau nebuvo stebima, galime daryti išvadą, kad turimi tūriniai kristalai yra ganėtinai aukštos kokybės,



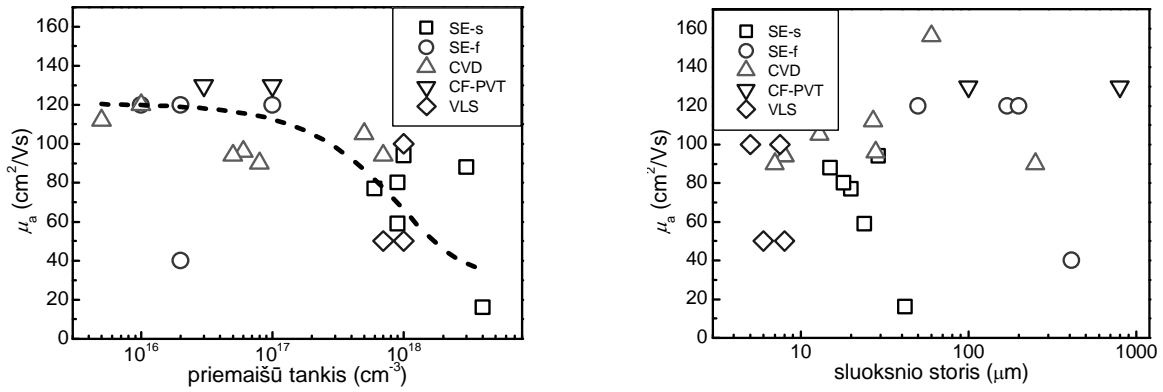
6.9 pav. Temperatūrinės laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės (a) ir judrio (b) priklausomybės pamatuotos bandiniuose FS50 ir FS24 naudojant 0.2 mJ/cm² žadinimo energijos tankį.

kaip jau yra paskelbta [79]. Režiuuojant, aukščiau pateikti duomenys rodo, kad krūvininkų sklaida yra įtakojama didelio jų tankio, o ne struktūrinių defektų. Taipogi tai rodo įvairių erdviųjų defektų mažą elektrinį aktyvumą (arba mažą jų tankį).

Bandiniai FS50 ir FS24 buvo užauginti naudojant ang. „sandwich“ SE technologiją tarp nupoliruotų VLS (111) atitinkamai 3C-SiC ir 6H-SiC padėklų. 6.9. paveiksle yra parodytos pamatuotos temperatūrinės laisvų krūvininkų gyvavimo trukmės ir judrio priklausomybės naudojant 0.2 mJ/cm² žadinimo energijos tankį. Tiek τ_R , tiek μ_a pamatuotos abiejose bandiniuose rodo labai panašias vertes. Atvirkštinė šių parametru koreliacija aukštesnėse temperatūrose (> 300 K) rodo, jog krūvininkų gyvavimo trukmė yra ribojama difuzijos. Kambario temperatūroje ambipolinio judrio vertės yra gana aukštos, ~120 cm²/Vs. Žemesnėse temperatūrose (< 150 K) jonizuotų priemaišų efektas krūvininkų judriui yra akivaizdus, kadangi nepusiausvirųjų krūvininkų tankis per mažas šių priemaišų ekranavimui. Iš to seka, kad VLS padėklas arti šių bandinių paviršiaus neturi aptinkamos įtakos krūvininkų gyvavimo trukmei bei jų judriui.

6.4. Įvairiomis technologijomis užaugintų 3C-SiC fotoelektrinių savybių palyginimas

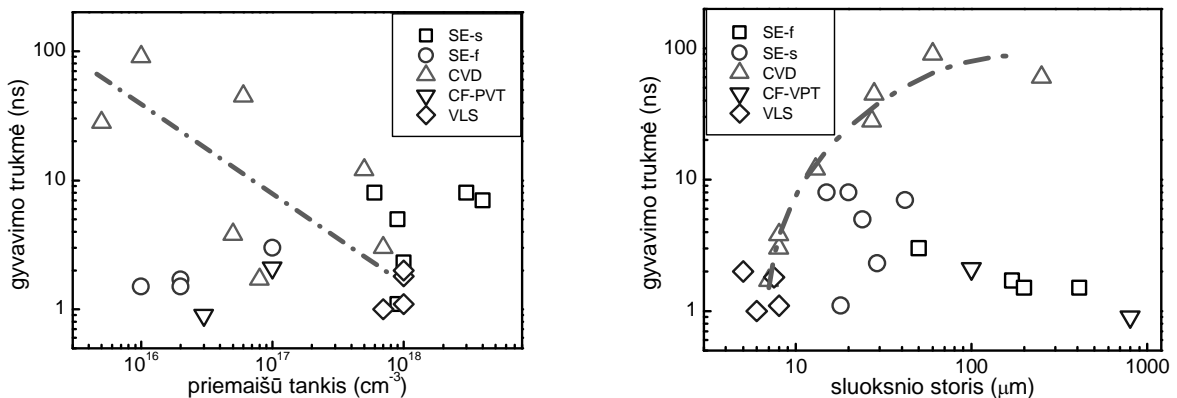
Šiame skyriuje mes aptariame visuose bandiniuose pamatuotas τ_R ir μ_a vertes priemaišų koncentracijos, sluoksnio storio ir auginimo temperatūros kontekste. 6.10 paveikslas rodo, kad: (a) μ_a mažėja didėjant priemaišų koncentracijai, dėl krūvininkų sklaidos



6.10 pav. Ambipolinio judrio vertės kintant priemaišų koncentracijai (a) ir sluoksnio storiui (b) pamatuotos 3C-SiC sluoksniuose kambario temperatūroje ir naudojant vidutinius ir aukštus žadinimo lygius.

jonizuotomis priemaišomis [80, 81]; (b) μ_a didėja nežymiai su didėjančiu sluoksnio storiu, veikiausiai dėl struktūrinių defektų tankio mažėjimo.

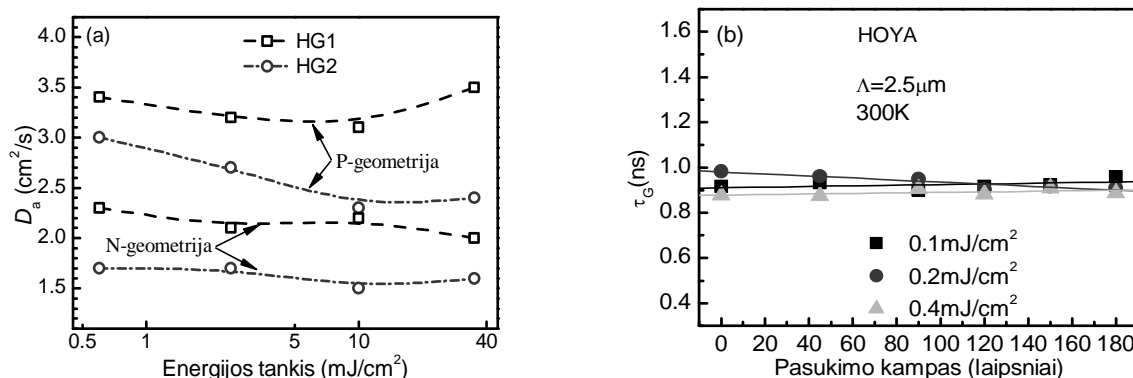
Kita vertus, išskyrus tik CVD technologiją, τ_R vertės pamatuotos bandiniuose užaugintuose skirtingomis technologijomis nerodo jokios ypatingos priklausomybės nuo sluoksnio storio ar legiravimo lygio, kaip matyti 6.11 paveiksle. Tai reiškia, kad šių technologijų auginimo parametrai įtakoja krūvininkų gyvavimo trukmes. Pateiktose grafikuose galima pastebėti, kad tik CVD technologija užauginti bandiniai rodo ryškią priklausomybę nuo priemaišų koncentracijos ir sluoksnio storio. Taigi, tinkamas auginimo parametrų optimizavimas galėtų būti naudojamas krūvininkų gyvavimo trukmės valdymui.



6.11 pav. Pamatuotos efektyvios krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybės nuo (a) priemaišų koncentracijos ir (b) sluoksnio storio tirtuose 3C-SiC bandiniuose.

7 skyrius. Padėklo paviršiaus morfologijos įtaka 3C-SiC fotoelektrinėms savybėms

Bandiniai HG1 ir HG2 buvo užauginti CVD technologija ant stipriai legiruotų (100) 3C-SiC padėklų. Krūvininkų difuzijos koeficiento vertės, parodytos 7.1. paveiksle, buvo pamatuotos, kai indukuotos gardelės vektorius yra statmenas (N geometrija) ir lygiagretus (P) rėžių išsidėstymui. Apibendrinant, matyti, kad P geometrijos atveju pamatuotas difuzijos koeficientas yra žymiai didesnis lyginant su N geometrijos atveju visame žadinimų spektre. Mes priskiriame tai dėl pakavimo defektų atsiradusių potencinių duobių energijos juostose. Krūvininkai judantys lygiagrečiai gardelės rėžiams patiria mažesnę sklaidą negu judantys per tuos potencines duobes. Šių potencinių duobių prigimtis gali būti pakavimo defektų sukelti lokaliniai gardelės defektai, kurie gali būti laikomi kaip kvantinės duobės [31]. Panašiai aiškinama ir anizotropinis laidumas GaN bandiniuose [82]. Iš gautų verčių N ir P geometrijos atvejais, galime daryti išvadą, kad didinant griovelių tankį, taigi ir pakavimo defektų koncentraciją, ambipolinis difuzijos koeficientas mažėja. Šie rezultatai paskatino tolimesnius tyrimus siekiant išsiaiškinti pakavimo defektų formavimosi mechanizmą CVD auginimo metu. Tuo tikslu buvo tiriama ambipolinio difuzijos koeficiento anizotropiškumas dviejuose 3C-SiC sluoksniuose su nuėsdintais padėklais užaugintuose CVD metodu ant banguojančio paviršiaus Si padėklų [83]. Tiriant šiuos bandinius, jie buvo sukami nuo laisvai pasirinktos paviršiaus orientacijos. Gauti duomenys (7.1.(b)) neparodė jokių difuzijos koeficiento anizotropiškumo įrodymų. Tai gali reikšti, kad struktūriniai defektai



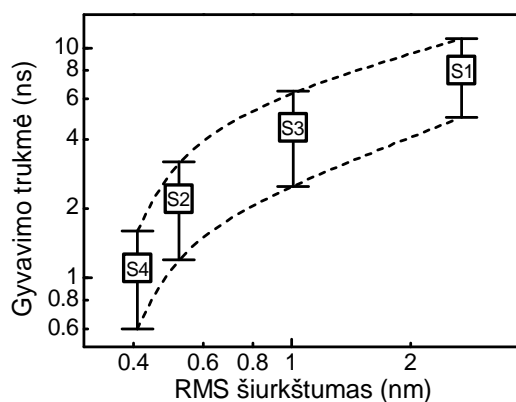
7.1. pav. (a) Pamatuotos D_a vertės keičiant žadinimo energijos tankį naudojant N ir P geometrijas. (b) Indukuotos gardelės irimo laiko trukmės priklausomybė nuo sukimo kampo pamatuota HOYA komerciniame bandinyje.

atsakingi už potencinius barjerus nėra išsidėstę tam tikra kryptimi, arba jų nėra tiek daug, kad jų įtaka difuzijos koeficientui būtų išmatuojama. Be to, SP matavimai parodė, kad krūvininkų gyvavimo trukmės abiejose bandiniuose yra panašių verčių, kaip ir padėkle.

7.2. Padėklo paviršiaus šiurkštumo koreliacija su krūvininkų gyvavimo trukme

Tūrinės gyvavimo trukmės buvo nustatytos naudojant pamatuotų indukuotų gardelių kinetikų įvairiose bandinių paviršiaus taškuose skaitmeninį modeliavimą.

Lėtos auginimo spartos SE bandiniai S1 ir S2 užauginti atitinkamai ant nepoliruoto ir poliruoto (0001) 6H-SiC padėklo, pasižymėjo labai skirtingomis gyvavimo trukmėmis. 7.2. paveiksle yra pateikta tūrinės krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo padėklo paviršiaus šiurkštumo (kvadratinis vidurkis, ang. root mean square, RMS) nustatyto iš $5 \times 5 \mu\text{m}$ ploto. Kaip matyti, tūrinė gyvavimo trukmė didėja didėjant paviršiaus šiurkštumui. Tokia pati tendencija stebima ir homoepitaksiniuose CVD sluoksniuose, S3 ir S4. Kadangi heteroepitaksijos atveju pradinis 3C nukleacijos etapas vyksta ant augimo laiptelių terasų, galima daryti prielaidą, jog ilgesnės terasos lemia mažesnę dvyniavimosi defektų tankį [84]. Kita vertus, pradinio augimo proceso metu 1-2 μm storio paviršinis padėklo sluoksnis sublimuojasi, kas suardo jo paviršiaus optinę kokybę, kuri buvo pasiekta poliravimo būdu [85]. Be to, yra manoma, kad pats poliravimo procesas, kuris nors ir pagerina paviršiaus lygumą, lemia struktūrinių defektų formavimąsi paviršiniame padėklo sluoksnyje, kurie toliau plinta į auginamus epitaksinius sluoksnius.



7.2. pav. Pamatuota tūrinės krūvininkų gyvavimo trukmės priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo 3C-SiC sluoksniuose.

Pastaruoju atveju mažesnis paviršiaus šiurkštumas trukdo augimo procesui, kadangi paviršiniai padėklo netobulumai yra energetiškai palankūs pradinei nukleacijai vykti [58]. Mažesnė 3C-SiC augimo sparta ant VLS padėklo padidina dvyniavimosi kompleksiskumą ir lemia kitų didelio kampo dvyniavimosi defektų formavimąsi [86]. Teigiama, kad nors VLS padėklai ir sumažina dvyniavimosi defektų tankį, lemia blogesnę epitaksinio sluoksnio kokybę lyginant su sluoksniais užaugintais ant 6H-SiC padėklų [87]. Apibendrinant, tūrinis krūvininkų gyvavimo laikas didėja didėjant paviršiaus vidutiniam (RMS) šiurkštumui, tiek homoepitaksijos atveju, tiek ir heteroepitaksijos atveju.

References

- [1] G.W. Pierce, *Physical Review (Series I)* **25**(1):(1907) p.31-60
- [2] H.J. Round, *Electrical World* **49**:(1907) p.309
- [3] H. Baumhauer, *Zeit. Krist* **50**:(1912) p.33
- [4] J.A. Lely, *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft* **32**:(1955) p.229-236
- [5] I. Swiderski, W. Proskurowski and T. Niemyski, *Journal of Crystal Growth* **5**(1):(1969) p.59-64
- [6] Y.M. Tairov and V.F. Tsvetkov, *Journal of Crystal Growth* **43**(2):(1978) p.209-212
- [7] J.T. Kendal, *Pergamon Press*: (1960) p. 521
- [8] S. Nishino, J.A. Powell and H.A. Will, *Applied Physics Letters* **42**(5):(1983) p.460-462
- [9] J.C. Phillips and G. Lucovsky *Bonds and Bands in Semiconductors*. New Jersey, Momentum Press (2009)
- [10] P. Masri, *Surface Science Reports* **48**(1–4):(2002) p.1-51
- [11] S.E. Saddow and A. Agarwal (Eds.) *Norwood, Artech House, Inc.* (2004)
- [12] M.B.J. Wijesundara and R.G. Azevedo *Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments*. New York, Springer (2011)
- [13] S.E. Saddow (Ed.), *Elsevier* (2012)

- [14] A.A. Lebedev and V.E. Chelnokov, *Semiconductors* **33**(9):(1999) p.999-1001
- [15] C.I. Harris and A.O. Konstantinov, *Physica Scripta* **1999**(T79):(1999) p.27
- [16] E.W.S. Caetano, E.F. Bezerra, V.N. Freire, J.A.P. da Costa and E.F. da Silva, *Solid State Communications* **113**(9):(2000) p.539-542
- [17] F. Ciobanu, G. Pensl, H. Nagasawa, A. Schoner, S. Dimitrijević, K.Y. Cheong, V.V. Afanas'ev and G. Wagner, in "*Silicon Carbide and Related Materials - 2002*", Zurich-Uetikon, Trans Tech Publications Ltd, **433-4**: (2002)
- [18] D.K. Schroder *Semiconductor material and device characterization*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. (2006)
- [19] A. Schöner, M. Krieger, G. Pensl, M. Abe and H. Nagasawa, *Chemical Vapor Deposition* **12**(8-9):(2006) p.523-530
- [20] V.M. Polyakov and F. Schwierz, *Journal of Applied Physics* **98**(2):(2005) p.023709-023706
- [21] A. Fissel, *Physics Reports* **379**(3-4):(2003) p.149-255
- [22] M.V.S. Chandrashekhar, C.I. Thomas, J. Lu and M.G. Spencer, *Applied Physics Letters* **91**(3):(2007) p.033503-033503
- [23] A.A. Lebedev, D.K. Nel'son, B.S. Razbirin, I.I. Saidashev, A.N. Kuznetsov and A.E. Cherenkov, *Semiconductors* **39**(10):(2005) p.1194-1196
- [24] B.S. Richards, A. Lambertz, R.P. Corkish, C.A. Zorman, M. Mehregany, M. Ionescu and G. M.A., *Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, IEEE, **3**: (2003) p. 2738-2741
- [25] G. Beaucarne, A.S. Brown, M.J. Keevers, R. Corkish and M.A. Green, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **10**(5):(2002) p.345-353
- [26] A. Luque and A. Martí, *Physical Review Letters* **78**(26):(1997) p.5014-5017
- [27] H. Itoh, M. Yoshikawa, I. Nashiyama, S. Misawa, H. Okumura and S. Yoshida, *Nuclear Science*, *IEEE Transactions on* **37**(6):(1990) p.1732-1738
- [28] P.B. Klein, R. Myers-Ward, K.K. Lew, B.L. VanMil, J.C.R. Eddy, D.K. Gaskill, A. Shrivastava and T.S. Sudarshan, *Journal of Applied Physics* **108**(3):(2010) p.033713-033711
- [29] G. Zoulis, PhD Thesis, (2011)
- [30] H.P. Iwata, U. Lindefelt, S. Öberg and P.R. Briddon, *Journal of Physics: Condensed Matter* **14**(48):(2002) p.12733

- [31] H.P. Iwata, U. Lindefelt, S. Öberg and P.R. Briddon, *Physica B: Condensed Matter* **340–342**(0):(2003) p.165-170
- [32] M. Soueidan and G. Ferro, *Advanced Functional Materials* **16**(7):(2006) p.975-979
- [33] J. Lorenzzi, PhD Thesis, (2010)
- [34] M. Soueidan, G. Ferro, J. Dazord, Y. Monteil and G. Younes, *Journal of Crystal Growth* **275**(1–2):(2005) p.e1011-e1016
- [35] M. Syväjarvi and R. Yakimova P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura. Secondary. P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura, Elsevier: (2011) p.
- [36] M. Beshkova, M. Syvajarvi, R. Vasiliauskas, J. Birch and R. Yakimova, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2008*", Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd, **615-617**: (2009)
- [37] D. Chaussende, J. Eid, F. Mercier, R. Madar and M. Pons, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2008*", **615-617**: (2009)
- [38] B.K. Ridley *Quantum Processes in Semiconductors*. Oxford, Oxford University Press (1999)
- [39] A.B. Sproul, *Journal of Applied Physics* **76**(5):(1994) p.2851-2854
- [40] J. Linnros, *Journal of Applied Physics* **84**(1):(1998) p.275-283
- [41] H.J. Eichler, P. Gunder and D.W. Pohl *Laser-Induced Dynamic Gratings*. Berlin, Heiderberg, Springer-Verlag (1986)
- [42] P. Grivickas, A. Galeckas, J. Linnros, M. Syvajarvi, R. Yakimova, V. Grivickas and J.A. Tellefsen, *Materials Science in Semiconductor Processing* **4**(1-3):(2001) p.191-194
- [43] M. Ichimura, H. Tajiri, Y. Morita, N. Yamada and A. Usami, *Applied Physics Letters* **70**(13):(1997) p.1745-1747
- [44] M. Ichimura, N. Yamada, H. Tajiri and E. Arai, *Journal of Applied Physics* **84**(5):(1998) p.2727-2731
- [45] P. Scajev, K. Jarasiunas, A. Kadys, J. Storasta, P.L. Abramov, S.P. Lebedev and A.A. Lebedev, in "*2010 Wide Bandgap Cubic Semiconductors: From Growth to Devices*", **1292**: (2010)
- [46] G. Manolis, K. Jarasiunas, I.G. Galben and D. Chaussende, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2008*", **615-617**: (2009)
- [47] K. Jarasiunas, P. Scajev, V. Gudelis, P.B. Klein and M. Kato, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2009, Pts 1 and 2*", **645-648**: (2010)

- [48] A. Galeckas, J. Linnros, M. Frischholz and V. Grivickas, *Applied Physics Letters* **79**(3):(2001) p.365-367
- [49] A. Haug, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **49**(6):(1988) p.599-605
- [50] L. Huldt, *physica status solidi (a)* **8**(1):(1971) p.173-187
- [51] A. Haug, *physica status solidi (b)* **108**(2):(1981) p.443-448
- [52] D. Macdonald, A. Cuevas and J. Wong-Leung, *Journal of Applied Physics* **89**(12):(2001) p.7932-7939
- [53] D. Macdonald and A. Cuevas, *Applied Physics Letters* **74**(12):(1999) p.1710-1712
- [54] M. Kawai, T. Mori, M. Kato, M. Ichimura, S. Sumie and H. Hashizume, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2006*", Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd, **556-557**: (2007)
- [55] J.P. Bergman, *Diamond and Related Materials* **6**(10):(1997) p.1324-1328
- [56] P.B. Klein, *Journal of Applied Physics* **103**(3):(2008) p.033702-033714
- [57] G. Pensl, T. Frank, M. Krieger, M. Laube, S. Reshanov, F. Schmid and M. Weidner, *Physica B-Condensed Matter* **340**:(2003) p.121-127
- [58] M. Beshkova, J. Lorenzzi, N. Jegenyés, J. Birch, M. Syvajarvi, G. Ferro and R. Yakimova, *Silicon Carbide and Related Materials 2009*, Pts 1 and 2 **645-648**:(2010) p.183-186
- [59] M. Soueidan, G. Ferro, O. Kim-Hak, F. Cauwet and B. Nsouli, *Crystal Growth & Design* **8**(3):(2008) p.1044-1050
- [60] M. Soueidan, G. Ferro, B. Nsouli, F. Cauwet, J. Dazord, G. Younes and Y. Monteil, *Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* **130**(1-3):(2006) p.66-72
- [61] M. Ichimura, *Solid-State Electronics* **50**(11-12):(2006) p.1761-1766
- [62] P. Scajev, A. Usikov, V. Soukhoveev, R. Aleksiejunas and K. Jarasiunas, *Applied Physics Letters* **98**(20):(2011) p.202105-202103
- [63] N. Jegenyés, G. Manolis, J. Lorenzzi, V. Souliere, D. Dompont, A. Boule, G. Ferro and K. Jarasiunas, *Silicon Carbide and Related Materials 2010* **679-680**:(2011) p.153-156
- [64] G. Pensl and W.J. Choyke, *Physica B-Condensed Matter* **185**(1-4):(1993) p.264-283
- [65] A.A. Lebedev *Structural defects and deep acceptors in silicon carbide*. New York, IEEE (1998)

- [66] E. Janzen, A. Gali, A. Henry, I. Ivanov, B. Magnusson and N. Son, in "*Defects in Microelectronic Materials and Devices*", CRC Press: (2008)
- [67] A. Henry, C. Hallin, I.G. Ivanov, J.P. Bergman, O. Kordina, U. Lindefelt and E. Janzén, *Physical Review B* **53**(20):(1996) p.13503-13506
- [68] P.P. Debye and E.M. Conwell, *Physical Review* **93**(4):(1954) p.693-706
- [69] V. Grivickas, G. Manolis, K. Gulbinas, K. Jarasiunas and M. Kato, *Applied Physics Letters* **95**(24):(2009) p.242110
- [70] K. Neimontas, K. Jarasiunas, M. Soueidan, G. Ferro and Y. Monteil, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2006*", Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd, **556-557**: (2007)
- [71] J.M. Dorkel and P. Leturcq, *Solid-State Electronics* **24**(9):(1981) p.821-825
- [72] M. Marinova, N. Jegenyés, A. Andreadou, A. Mantzari, J. Lorenzzi, G. Ferro and E.K. Polychroniadis, *AIP Conference Proceedings* **1292**(1):(2010) p.95-98
- [73] G. Manolis, G. Zoulis, S. Juillaguet, J. Lorenzzi, G. Ferro, J. Camassel and K. Jarasiunas, in "*Silicon Carbide and Related Materials 2009, Pts 1 and 2*", **645-648**: (2010)
- [74] P.B. Klein, A. Shrivastava and T.S. Sudarshan, *physica status solidi (a)* **208**(12):(2011) p.2790-2795
- [75] P. Scajev, J. Hassan, K. Jarasiunas, M. Kato, A. Henry and J.P. Bergman, *Journal of Electronic Materials* **40**(4):(2011) p.394-399
- [76] P. Scajev, V. Gudelis, K. Jarasiunas and P.B. Klein, *Journal of Applied Physics* **108**(2):(2010) p.
- [77] K. Neimontas, T. Malinauskas, R. Aleksiejūnas, M. Sūdžius, K. Jarašiūnas, L. Storasta, J.P. Bergman and E. Janzen, *Semiconductor Science and Technology* **21**(7):(2006) p.952
- [78] P. Grivickas, J. Linnros and V. Grivickas, in "*Silicon Carbide and Related Materials - 1999 Pts, 1 & 2*", Zurich-Uetikon, Trans Tech Publications Ltd, **338-3**: (2000)
- [79] L. Latu-Romain, D. Chaussende, P. Chaudouët, F. Robaut, G. Berthomé, M. Pons and R. Madar, *Journal of Crystal Growth* **275**(1–2):(2005) p.e609-e613
- [80] D.M. Caughey and R.E. Thomas, *Proceedings of the IEEE* **55**(12):(1967) p.2192-2193

- [81] M. Roschke and F. Schwierz, Ieee Transactions on Electron Devices **48**(7):(2001) p.1442-1447
- [82] K.H. Baik, Y.G. Seo, S.K. Hong, S. Lee, J. Kim, J.S. Son and S.M. Hwang, Ieee Photonics Technology Letters **22**(9):(2010) p.595-597
- [83] H. Nagasawa, K. Yagi, T. Kawahara and N. Hatta, Chemical Vapor Deposition **12**(8-9):(2006) p.502-508
- [84] M. Abadier, R.A. Berechman, P.G. Neudeck, A.J. Trunek and M. Skowronski, Journal of Crystal Growth **347**(1):(2012) p.45-48
- [85] R. Vasiliauskas, PhD Thesis, (2012)
- [86] M. Marinova, A. Mantzari and E.K. Polychroniadis, in "*Nanostructured Materials, Thin Films and Hard Coatings for Advanced Applications*", Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd, **159**: (2010)
- [87] R. Vasiliauskas, M. Marinova, M. Syväjärvi, R. Liljedahl, G. Zoulis, J. Lorenzzi, G. Ferro, S. Juillaguet, J. Camassel, E.K. Polychroniadis and R. Yakimova, Journal of Crystal Growth **324**(1):(2011) p.7-14