

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Justina Malakauskaitė

JONŲ IMPLANTACIJOS POVEIKIO IZOLIACINIŲ SRIČIŲ SUSIDARYMUI AlGa_N/Ga_N
PUSLAIDININKINĖSE STRUKTŪROSE TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas
Optoelektronikos medžiagų ir technologijų
studijų programa

Studentas	Justina Malakauskaitė
Leista gintis	2019-05-21
Darbo vadovas	dr. Irmantas Kašalynas
Instituto atstovas	prof. Vincas Tamošiūnas

Vilnius 2019

Turinys

ĮVADAS	3
1. LITERATŪROS APŽVALGA	4
1. 1. Puslaidininkinės struktūros su dvimatėmis elektronų dujomis	4
1. 2. Prietaisų izoliacijos gaminimo technikos: mežų formavimas ir jonų implantacija.....	5
1. 3. Pažeidų skaičiavimo modeliai	9
2. TYRIMO METODIKA	12
2. 1. Modeliavimo aplinkos: SRIM ir TRIM	12
2. 2. Modeliavimo eksperimento eiga	15
2. 3. Bandinių gamyba ir jonų implantacija	18
2. 4. Implantuotos zonos varžos nustatymas	19
3. TYRIMO REZULTATAI	21
IŠVADOS	38
LITERATŪRA	39
SANTRAUKA	43
SUMMARY	44
Priedai	45
1 priedas – SRIM duomenys, Al į GaN	45
2 priedas – SRIM duomenys, C į GaN. Fragmentas.	46
CTLM ir TLM matavimų duomenų lentelės	47
Padėka.....	51

IVADAS

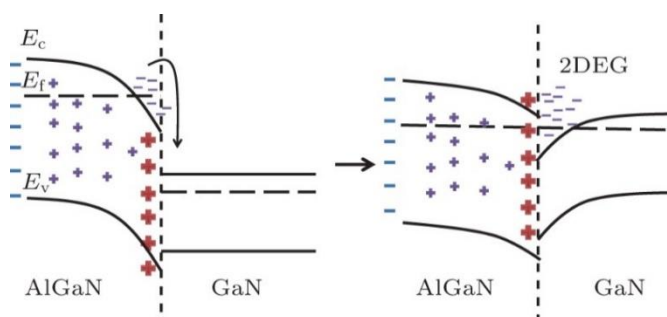
Terahercinė (THz) spinduliuotė pastaraisiais dešimtmečiais susilaukė itin didelio mokslininkų susidomėjimo kaip tarpinės grandies tarp optinės ir mikrobangų spinduliuotės, atitinkančios 100 GHz – 30 THz. THz spinduliuotė pasižymi optinėms bangoms būdingu neinvaziškumu – nepažeidžia medžiagų, taip pat ir mikrobangoms būdinga skvarba pro daug elektriškai nelaidžių medžiagų: popierių, keramiką, plastiką, drabužius ar medį [1]. Dėl šių savybių THz spektroskopija sparčiai vystosi ir jau rado vietą kai kuriose pramonės nišose, pavyzdžiui, saugume – skenuoja laiškus, maisto produktus, medicinos priemones [2–4]. Deja, THz spinduliuotė yra itin gerai sugerama vandens ir tai apsunkina jos pritaikomumą dar daugiau sričių: medicinoje vaizdinant vėžinius audinius ar telekomunikacijų srityje perduodant duomenis [5]–[7]. Siekiant išvengti THz spinduliuotės signalo slopimo, būtina sukurti itin aukštos kokybės puslaidininkius THz šaltinius ir jutiklius. Tam yra kuriama nauja jonų implantavimo į AlGaIn/GaN heterosandūrą su dvimatėmis elektronų dujomis (angl. *2D electron gas* – *2DEG*) technologija, leidžianti pakeisti iki šiol vyravusią mežų gamybos technologiją [8, 9]. Implantuojant jonus yra selektyviai suardoma puslaidininkio gardelė ir taip yra nutraukiama elektros srovė – sukuriama izoliacinė sritis. Kadangi implantacijai tinkamų jonų bei puslaidininkinių struktūrų variacijų yra begalės, būtina atlikti modeliavimus iki pradedant eksperimentus ir prietaisų kūrimą. Šiame darbe pristatomi C, Al, Si, Ti jonų implantacijos į AlGaIn/GaN heterostruktūras skaičiavimo bei matavimo rezultatai, gauti atlikus jonų implantaciją ir ištyrus izoliacinių sričių elektrinį laidumą.

Šio darbo tikslas yra skaitinio modeliavimo būdu parinkti optimalias sąlygas jonų implantavimo eksperimentui, sukurti šiluminiam stresui atsparias izoliacines sritis didelio elektronų judrio tranzistorinėse (angl. *High electron mobility transistor* – *HEMT*) struktūrose, kurios bus naudojamos kietakūniuose terahercų emiteriuose bei detektoriuose. Darbe sprendžiami šie uždaviniai: sumodeliuoti implantuotų jonų erdvinis profilius bei sukeliamus defektus AlGaIn/GaN heterostruktūroje, atsižvelgiant į jonų tipą, dozę, energiją C, N, Al, Si, Ga jonams bei atlikti Al jonų implantaciją į AlGaIn/GaN HEMT struktūras ir iširti sukurtų izoliacinių sričių elektrinį laidumą.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

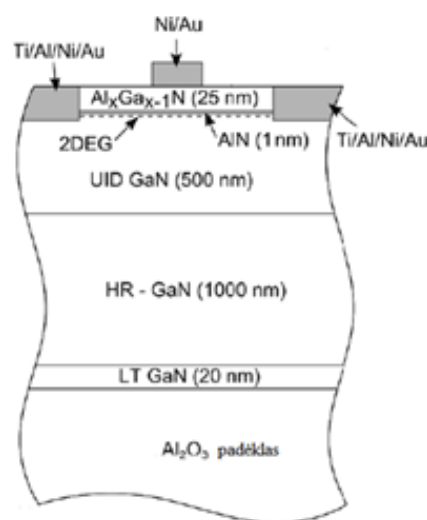
1.1. Puslaidininkinės struktūros su dvimatėmis elektronų dujomis

Šiame darbe nagrinėjamos puslaidininkinės AlGaIn/GaN struktūros, turinčios dvimates elektronų dujas – 2DEG, susidarančias heterosandūroje dėl spontaninės ir pjezoelektrinės poliarizacijos [10, 11]. AlGaIn/GaN pjezoelektrinis efektas yra bent tris kartus didesnis nei GaAs ir lemia didelius krūvininkų tankius [12]. 2DEG yra kieto kūno fizikos modelis, kuriame elektronai gali laisvai judėti dviejuose dimensijose, bet jų judėjimas yra apribotas trečioje dimensijoje. Šios dujos susidaro puslaidininkių medžiagų, turinčių skirtingą draustinių energijų tarpą, heterosandūroje. [10]. Valentinė ir laidumo juostos išlinksta ir prie laidumo juostos susidaro trikampė duobė, kurioje kaupiasi elektronai (1 pav.). Būtent šie elektronai ir vadinami dvimatėmis elektronų dujomis. Tokios puslaidininkinės struktūros plačiai naudojamos didelio elektronų judrio



1 pav. 2DEG susidarymas. Pagal [10].

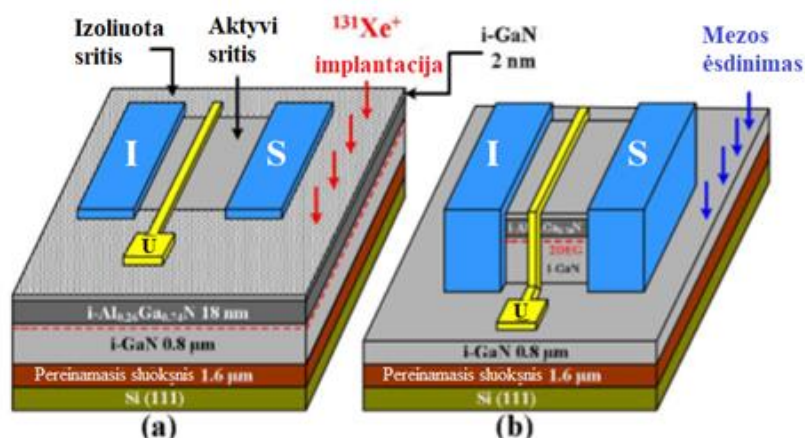
tranzistorinėmis (HEMT) struktūroms gaminti [13–15]. Pirmosios HEMT struktūros (2 pav.) buvo sukurtos Takashi Mimuro 20 a. pabaigoje [16]. AlGaIn/GaN riboje susidaro 2DEG kanalas, kurio laidumas gali būti valdomas išoriniu elektriniu lauku – užtūros potencialu. Šiuo metu AlGaIn/GaN HEMT yra plačiai naudojami itin tiksliais biologiniams sensoriams ir jutikliams, didelės galios aukštadažnių radiofizikos komponentų bei THz spinduliuotės generavimui [17–20]. HEMT pasižymi mažais triukšmais, dideliu stiprinimu, greitomis persijungimo trukmėmis, kurias būtent sąlygoja didelis elektronų judris. Judris priklauso nuo daug veiksnių: puslaidininkio cheminės sudėties, gardelės struktūros, auginimo technologijos, medžiagų įtempimo, storio, legiravimo, temperatūros bei krūvininkų koncentracijos [21].



2 pav. HEMT su 2DEG kanalu schema. Adaptuota pagal [13].

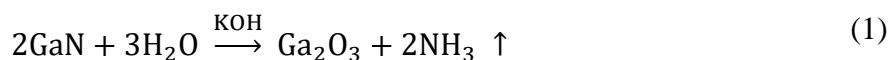
1. 2. Prietaisų izoliacijos gaminimo technikos: mezų formavimas ir jonų implantacija

Siekiant tinkamo puslaidininkinių prietaisų veikimo būtina atskirti komponentus vienus nuo kitų. Elektrinė komponentų izoliacija sukuriama formuojant mezus arba atliekant jonų implantaciją. Principinis skirtumas tarp šių technologijų pavaizduotas 3 pav.



3 pav. Jonų implantacijos (a) ir mezų formavimo (b) palyginimas. Adaptuota pagal [9].

Viena plačiausiai izoliacijos sukūrimui taikomų technologijų yra mezų formavimas. Formuojant mezus naudojamas šlapias cheminis arba sausas plazminis ėsdinimas, kurio metu yra pašalinamas nereikalingas puslaidininkinis sluoksnis taip, kad elektros srovė galėtų tekėti tik tarp numatytų kontaktų (3 pav. b). Naudojant šlapią ėsdinimą galima selektyviai pašalinti puslaidininkį pagal jo kristalografines plokštumas ar priemaišų tipus [22]. Kadangi GaN kristalas gali būti Ga arba N – paviršiaus (angl. *Ga – face* ir *N – face*), ne visada pavyksta cheminiu būdu ėsdinti kristalą. N – paviršiaus galio nitrido paskutiniame sluoksnyje esantys azoto atomai gali sudaryti vieną, o Ga – paviršiaus galio nitrido paskutiniame sluoksnyje esantys azoto atomai gali sudaryti tris cheminius ryšius dėl nesuporuoto azoto atomo jungties (angl. *Dangling bond*). Palacios et al. [23] parodė, kad MBE būdu užauginti N – paviršiaus GaN sluoksniai gali būti efektyviai ėsdinami vandeniniu KOH tirpalu, o Ga – paviršiaus GaN išlieka atsparus ėsdinimui. Patalpinus N – paviršiaus GaN į KOH tirpalą, hidroksido OH⁻ jonai yra stumiami paviršiuje esančių azoto atomų laisvų jungčių, tačiau stūmos jėga pakankamai maža ir OH⁻ jonai reaguoja su galio atomu. GaN ir H₂O reaguoja sudarydami Ga₂O₃ ir NH₃ dujas (1 lygtis). KOH veikia kaip katalizatorius ir gautas Ga₂O₃ ištirpsta KOH tirpale. Šis cheminis procesas vyksta, kol pasiekiamas norimas ėsdinimo gylis.



Tuo tarpu, Ga – paviršiaus galio nitride, hidroksido OH^- jonai pirmiausia reaguos su Ga. Nuėsdinus galio sluoksnį, azoto laisvi neigiami ryšiai stumia OH^- jonus, susidariusi stūmos jėga neleidžia OH^- jonams susijungti su galio atomais ir (1) reakcija nebevykta [24]. Ši problema sprendžiama naudojant fotoelektrocheminį (angl. – *photoelectrochemical* – *PCE*) ėsdinimą, kurio metu bandinys ėsdiklyje apšviečiamas UV spinduliais. Abejais atvejais, šlapio ėsdinimo greitis siekia $1-3 \mu\text{m}/\text{val}$. Sausas ėsdinimas vykdomas veikiant bandinį plazma. Šis procesas, palyginus su šlapio ėsdinimu, yra žymiai greitesnis, gaunamas geresnis atsikartojimas, taip pat tolygiau išėsdinami dideli bandiniai. Bandinį veikiant plazma kristalo cheminė ar kristalografinė sudėtis nedaro įtakos ėsdinimui. Tiek šlapio, tiek sauso ėsdinimo technologijos yra paprastos, pigios ir tinkamos masinei prietaisų gamybai. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad šlapiai ėsdinama ir horizontalioje plokštumoje, o ėsdinant plazma vykdomas tik vertikalus GaN ėsdinimas. Abejais būdais gaunamas didelis prietaiso struktūros paviršiaus plotas, atsiranda nuotėkio srovės bei atliekant kontaktų metalizaciją galima lengvai pažeisti būtiną 2DEG sluoksnį [8]. Taip pat, iškyla problema, kad nugremžus dalį puslaidininkio sluoksnio, kuris padengtas reaktoriuje išaugintu SiN sluoksniu, išgramžos vieta nebelieka apsaugota ir tolimesniuose gamybos žingsniuose turi būti formuojamas naujas apsauginis sluoksnis [25].

Norint išvengti minėtų problemų formuojant atskirus prietaisus yra siūloma alternatyva – jonų implantacija. Jos metu pasirinkti atomai yra jonizuojami ir suteikus jiems didelę energiją jie yra nukreipiami į bandinį. Implantavimo procesas gali neutralizuoti laidų puslaidininkio sluoksnį mechaniškai arba chemiškai. Neutralizuojant mechaniškai, sluoksnio varža įprastai didėja keliant atkaitinimo temperatūrą: dėl sukurtų defektų atsiranda gilieji pagavos centrai, sumažėja galimybė elektronams šuoliškai keliauti iš vieno atomo į kitą (angl. *Hopping conduction*). Atkaitinus per didelėje temperatūroje, sukurti defektai relaksuoja, sumažėja pagavos centrų tankis ir krūvininkai vėl gali šuoliškai judėti per atomus. Jeigu izoliacija pasireiškia chemiškai, puslaidininkio varža taip pat didėja keliant atkaitinimo temperatūrą, tačiau priešingai nei mechaniniu atveju, ties tam tikra temperatūra stabilizuojasi. Šio proceso metu susidaro termiškai stabilus gilusis lygmuo (angl. *Deep level*) iš kurio norint pašalinti elektroną reikia žymiai didesnės energijos nei kT [12], [26]. Jonizuotos dalelės praranda savo energiją jonizuodamos arba sužadindamos bandinio atomus, esančius netoli sklindančio jono trajektorijos. Jono prarandamą energiją atstumo vienetui nusako stabdomoji geba [27]:

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_e + \left(\frac{dE}{dx}\right)_n, \quad (2)$$

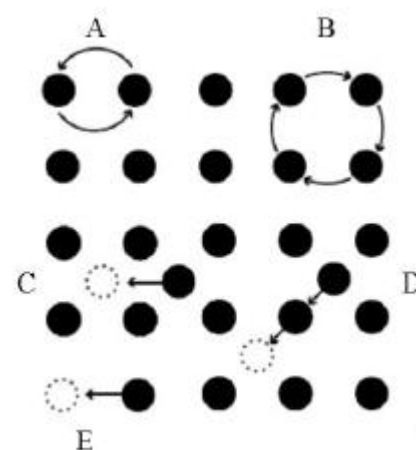
e ir n indeksai nurodo elektroninius bei branduolinius energijos nuostolius. Nuo implantuojamo jono energijos priklauso prarandamos energijos medžiagoje procesas. Tai gali būti neelastinė

sklaida, kurios metu jono energija perduodama atomo elektronams juos sužadinant arba išmušant iš atomo, arba elastiniai susidūrimai, kurių metu patiriami branduoliniai energijos nuostoliai, kai sąveikauja jonas ir medžiagos atomas. Jono ir branduolio sąveika aprašoma Kulono jėga tarp dviejų teigiamų krūvių. Dėl Kulono jėgos pakinta jono sklaidimo kryptis bei jonas netenka energijos. Judant jonui gali būti išmuštas sklaidantis atomas ir atsirasti gardelės pažeidimas. Vykdamt jonų implantaciją, minėti energijos nuostoliai yra naudojami skaičiuojant gardelės pažeidas. Elastinė jono sklaida aprašoma 3 formule [28]:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_n = n_A \int_{E_d}^{E_{max}^R} E_R L(E_R) \frac{d\sigma(E, E_R)}{dE_R} dE_R, \quad (3)$$

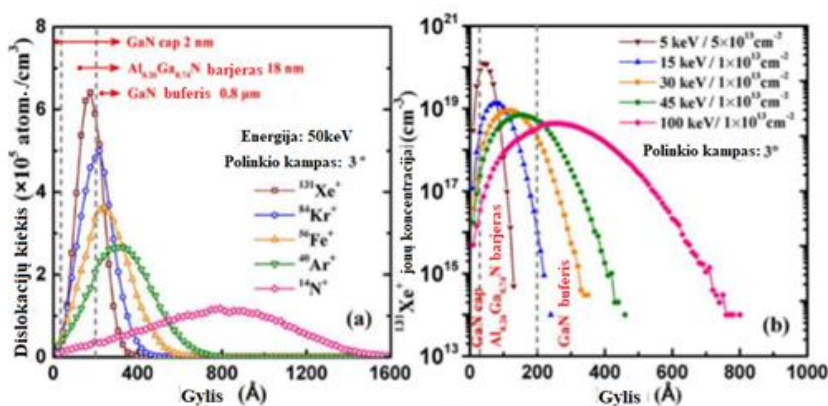
kur E – krintančios dalelės kinetinė energija, n_A – atomų tankis, E_R – atatrunkos atomo energija, E_{max}^R – maksimali atatrunkos atomui perduodama energija, E_d – atomo išmušimo iš gardelės energija, $L(E_R)$ – *Lindhard partition* funkcija, nurodanti, kokia energijos dalis yra perduodama sudūrimo metu tarp branduolių, $d\sigma(E, E_R)$ – diferencialinis Kulono sklaidos skerspjūvis jonams, protonams ir elektronams. $T = E_R L$ sandauga yra pažeidos energija, nurodanti, kiek energijos medžiagai atiduoda E_R kinetinės energijos atatrunkos branduolys išmušant atomus. Taigi, sąveikos metu gali įvykti nemažai reiškinų, kurių pagrindinis – gardelės defektų atsiradimas jonams perduodant energiją kristalui. Kiti procesai gali lemti fononų, eksitonų ir plazmonų, antrinių elektronų ir fotonų sukūrimą bei medžiagos lokalų įkaitimą. Kristaluose jonizuota dalelė gali lengvai išmušti atomą iš gardelės ir sukurti vakansiją, įsiterpti į gardelės struktūrą, atsirasti tarpmazgyje, suardyti cheminį ryšį. Šie defektai gali būti tiek pavieniai, tiek gali sudaryti defektų klasterius, amorfinės zonas, 3D defektus. Didelės energijos jonas pradžioje nesusiduria su taikiniu, o dėl stabdomosios spinduliuotės ir Kuloninės sąveikos jonizuoja greta esančius atomus. Susidūrimai pradeda vykti tik sumažėjus jono energijai ir tuomet vyksta nejonizuojantys susidūrimai. Dėl stabdomosios spinduliuotės bandinys gali lokaliai įkaisti iki tūkstančio kelvinių, yra pažeidžiama termodinaminė pusiausvyra. Šis vyksmas trunka 0,1-1 ps, o temperatūros stabilizavimasis įvyksta per 1-10 ps. Implantacijos metu sukuriama defektai anihiliuoja, priklausomai nuo medžiagos savybių: kai kur paprasti taškiniai defektai anihiliuoja jau kambario temperatūroje, tačiau sunaikinti sudėtingesnius defektus jau reikia aukštesnės temperatūros [29]. Tokie pažeidimai gali išlikti metų metus, jeigu nėra pakeičiama terminė pusiausvyra, t. y. bandinys nėra atkaitinamas [30]. Slenkstinė energija (angl. *Threshold displacement energy* – *TDE*), yra pagrindinis parametras, aprašantis mažiausią reikalingą energiją sukurti stabilų gardelės defektą. Ši energija priklauso nuo medžiagos anizotropijos, o kuriant teorinius jonizuotų dalelių sąveikos su medžiaga modelius, TDE yra žingsninė tikimybių funkcija, kuri lygi 0, kai dalelių energija mažesnė už TDE ir lygi 1, kai energija didesnė už TDE. TDE įprastai siekia 10 – 50 eV ir yra žymiai didesnė nei Frenkelio eksitonų formavimosi energija. Tai parodo, kad jonizacijos sukurtos

vakansijos negali spontaniškai rekombinuoti taip, kaip gali Frenkelio eksitonai. Puslaidininkinėse medžiagose dažniausiai susiformuoja amorfinės kišenės, kurios išlieka po kaskadinės atomų griūties. Nors šios amorfinės kišenės yra stabilios daugumoje tetrahedrinių gardelės puslaidininkių, GaAs kristaluose jos gali rekristalizuotis net kambario temperatūroje [31]. Kaskados pabaiga yra svarbi, nes tada susidarę defektai gali difunduoti, aglomeruoti arba rekombinuoti. Jeigu sukurti defektai yra termodinaminėje pusiausvyroje su aplinka ir yra lokalus defektų gradientas, įvyksta savidifuzija. Jos mechanizmai pavaizduoti 4 pav: A ir B vyksta linijinis bei žiedinis atomų apsikeitimai, jiems reikia daug energijos ir jie nepriklauso nuo defektų tankio kristale. C dalyje vyksta tarpmazgio judėjimas tarp atomų, jis reikalauja taip pat daug energijos ir įprastai vyksta su mažesniais už gardelę atomais. D dalyje atomai, kurie yra panašaus kaip gardelė dydžio, peršoka į gardelės atomo poziciją. E dalyje atomas peršoka į vakansijos vietą. D ir E tipo taškinių defektų judėjimai yra dažniausiai pasitaikantys kristale [32].



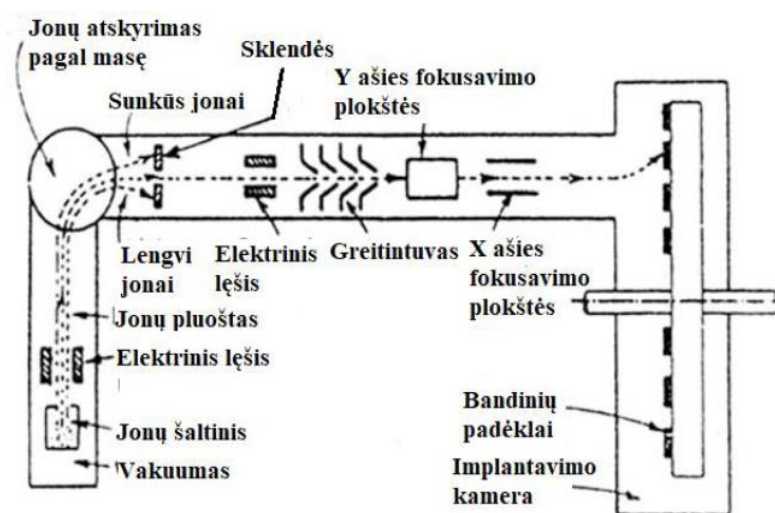
4 pav. Difuzijos mechanizmai:
A - linijinis pasikeitimas vietomis, B - žiedinis pasikeitimas vietomis, C - tarpmazgio judėjimas, D - tarpmazgio peršokimas į gardelę, E - atomo peršokimas į vakansijos vietą. Adaptuota pagal [25]

Atlikus jonų implantaciją, prietaisai pasižymi panašiais arba geresniais parametrais nei po mezos formavimo: gaunamos mažesnės nuotėkio srovės [33]. Nuo turimo puslaidininkio sudėties ir norimo implantacijos profilio, sukurtų defektų tankio, galima pasirinkti iš įvairių cheminių elementų, pavyzdžiui: aliuminio, deguonies, ar sunkiųjų elementų [9], taip pat tą patį bandinį implantuoti kelis kartus keičiant implantuojamų jonų energiją [8]. Didelės atominės masės jonai formuoja seklesnius defektus, o mažos atominės masės jonai skverbiasi giliau. 5 pav. pavaizduoti sumodeliuoti jonų implantacijos profiliai pagal jonų tipą ir implantacijos energiją:



5 pav. Implantacijos profilio modeliavimas esant skirtingiems implantuojamiems jonams bei jų energijai. Adaptuota pagal [9].

Implantacijos įrangos principinė schema pavaizduota 6 pav. Aukštame vakuume atomai yra jonizuojami, atplėšiant juos nuo šaltinio, vėliau elektriniais lėšiais sufokusuojami, atskiriami pagal masę, pagreitinimo metu jonams suteikiama norima energija, ir gautas jonų pluoštelis yra nukreipiamas į bandinį [34]. Dažniausiai galima keisti kampą, kuriuo yra apšaudomi bandiniai [8], [9], [35]. Kadangi norima suformuoti tik tam tikrą izoliacinę zoną, prieš implantavimą yra atliekama fotolitografija, kurios metu suformuojama kaukė, pro kurią negali praeiti jonai. Ši kaukė gali būti pagaminta iš fotorezisto [36], [37], kurio storis įprastai yra keli mikrometrai. Kadangi jonai implantuojami į nanometrų eilės gylį, kaukės formavimas yra veiksmingas būdas apsaugoti bandinį nuo implantacijos sukeltų pažeidimų laidžioje prietaiso dalyje. Pagrindinis jonų implantacijos trūkumas yra dideli jonų implantavimo įrenginio kaštai: reikalingas aukštas vakuumas, didelės pagreitinimo įtampos implantavimo metu. Tiek mezos, tiek izoliacijos formavimo metu yra naudojimas techniškai atidirbtas litografijos procesas, todėl tereiktų paruošti izoliacijai skirtą kaukės šablona ir užprogramuoti įrangą sutapatinti kaukės piešinį. Pagrindinė kliūtis sklandžiam implantacijos metodo atėjimui į pramonę būtų atskiros implantavimo įrangos integravimas į sustyguotą technologinį procesą.

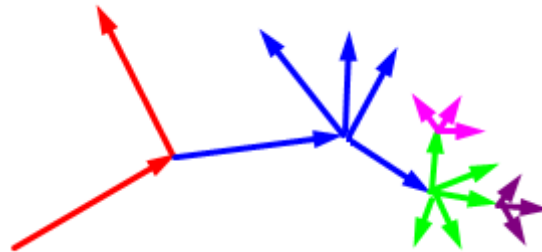


6 pav. Jonų implantavimo įranga. Adaptuota pagal [34].

1. 3. Pažeidų skaičiavimo modeliai

1955 m. G. H. Kinchin ir R. S. Pease pirmieji pasiūlė išsamų analitinį modelį apskaičiuoti, kaip sužadintos dalelės paveikia medžiagą [38]. Šis modelis, plačiai vadinamas KP, leido apskaičiuoti DPA (angl. *Displacements per atom*) – parametą, nurodantį, kiek atomų yra išmušta iš gardelės lyginant su bendru gardelėje esančių atomų skaičiumi. Pirminių išmuštų atomų PKA (angl. *Primary knock-on atom*) energija ir skaičius priklauso nuo krintančio jono energijos.

Remiantis KP modeliu, pirminiai jono – atomo susidūrimai vyksta izotropiškai perduodant vidinę energiją. Pirminis išmuštas atomas yra jonizuojamas, energija prarandama atiduodant ją elektronams, sąveikaujant su gardelės ir susiduriant su kitais atomais taip sukeliant išmuštų atomų kaskadą (7 pav.). Kai atomai nebeturi pakankamai energijos išmušti kitus atomus, vyksta atomų judėjimas, kol nusistovi termodinaminė pusiausvyra. Išmuštieji atomai difunduoja ir gali rekombinuoti su gardelės vakansijomis, patekti į tarpmazgius.



7 pav. Kaskadų formavimasis.

Remiantis KP modeliu tam tikrame intervale nuo slenkstinės iki viršutinės energijos sukurti Frenkelio porų skaičius tiesiškai priklauso nuo pradinės PKA energijos. Žemiau slenkstinės E_d energijos nauji išmušimai nevyksta, o jeigu PKA energija viršija viršutinę energijos ribą E_c , papildomų išmušimų neįvyksta. Daroma prielaida, kad su atomais susidūrimų neįvyksta, krintančių jonų energija jonizuoja ir sužadina aplinkui esančius atomus. Tuomet išmuštų atomų skaičiaus priklausomybė nuo pažeidos energijos parodyta 4 formulėje:

$$N(T) = \begin{cases} 0 & , & T < E_d \\ 1 & , & E_d < T < 2E_d \\ \frac{T}{2E_d} & , & 2E_d < T < E_c \\ \frac{E_c}{2E_d} & , & T \geq E_c \end{cases} \quad (4)$$

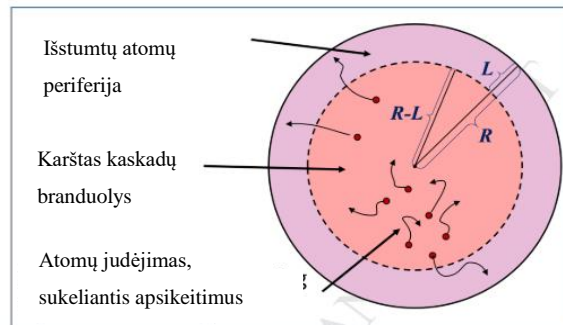
Po detalesnių tyrimų paaiškėjo, kad KP modelis yra netikslus. Nepaisant to, KP yra naudojamas ir šiandien, norint greitai įvertinti galimą medžiagos pažeidą implantuojant jonus įvairiose modeliavimo aplinkose [31]. M. J. Norgett, M. T. Robinson ir I. M. Torrens pasiūlė KP modelio modifikaciją, žinomą kaip NRT. Pagal NRT modelį sukurtų taškinių defektų skaičius kaskadoje [39] yra:

$$N = \frac{\kappa T}{2E_d}, \text{ kai } T > \frac{2E_d}{\kappa}, \quad (5)$$

kur κ yra išmušimo efektyvumas (angl. *displacement efficiency*). κ nepriklauso nuo temperatūros, energijos ir pačio taikinio. Simuliacijos parodė, kad yra 20% tikimybė, kad jonizacijos metu

išmuštas atomas grįš į savo vietą arba užims kito išmušto atomo vietą, todėl κ apytiksliai lygus 0,8. Pažeidos energija vienam jonui nustatoma iš pilnutinės jono energijos atimant energiją, kuri buvo prarasta dėl medžiagos jonizacijos. Tipinės E_d vertės yra taip 20 ir 100 eV, o DPA gali būti suskaičiuotas naudojantis pažeidimo energija norimame tūryje, pagal (4) lygtį apskaičiuojant defektų skaičių ir rezultatą normalizuojant vidutiniam atomo tūriui (angl. *average volume per atom*). Kadangi analizuojamame tūryje dar yra ir Frenkelio eksitonai, būtina atsižvelgti į juos. Tuomet „išgyvenę“ defektai gali būti skaičiuojami pagal 8 pav. ir iš (5) lygties atsiradęs $3\frac{L}{R}$ proporcingumo daugiklis daro įtaką, kai $\frac{2E_d}{\kappa} < T_d$, tuomet $\frac{\kappa T_d}{2E_d}$ virsta į $\frac{\kappa T_d}{2E_d} * 3\frac{L}{R}$ [31].

$$\xi_{išgyvenę} = \frac{V_{išor.} - V_{vid.}}{V_{išor.}} = \frac{\frac{4\pi R^3}{3} - \frac{4\pi(R-L)^3}{3}}{\frac{4\pi R^3}{3}} = 3\frac{L}{R} - 3\frac{L^2}{R^2} \approx 3\frac{L}{R} \quad (6)$$



8 pav. Išgyvenusių defektų tūryje įvertinimas. Adaptuota pagal [29].

2. TYRIMO METODIKA

Darbo metu buvo modeliuojama jonų implantacija, atliekama aliuminio jonų implantacija į bandinius ir analizuojami gauti rezultatai.

2.1. Modeliavimo aplinkos: SRIM ir TRIM

Modeliavimai buvo atliekami atviros prieigos programa „SRIM“, kuri pasiekama <http://www.srim.org>. „SRIM“ (angl. *The Stopping and Range of Ions in Matter*) naudoja Monte Karlo metodą. Programoje implantuojamų atomų judėjimas aprašomas kaip nepriklausomų dvinarių susidūrimų su atomais rezultatas – BCA (angl. *binary collision approximation*). Tai leidžia sukurtas Frenkelio poras laikyti stabiliomis, o tarp judančių jonų nevyksta susidūrimai. Stūmos potencialas $V(r)$ yra aprašomas kaip Kulono jėga tarp dviejų branduolių su ekranavimo funkcija φ :

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \varphi\left(\frac{r}{a}\right), \quad (7)$$

kur Z yra branduolių krūviai, e – elektrono krūvis, r – atstumas tarp branduolių, a – ekranavimo atstumas, o $\varphi\left(\frac{r}{a}\right)$ yra suma eksponenčių, aprašančių elektronų tarpusavio sąveiką esant nedideliems atstumams. Esant pakankamai dideliame atstumui, jonai nebesąveikauja.

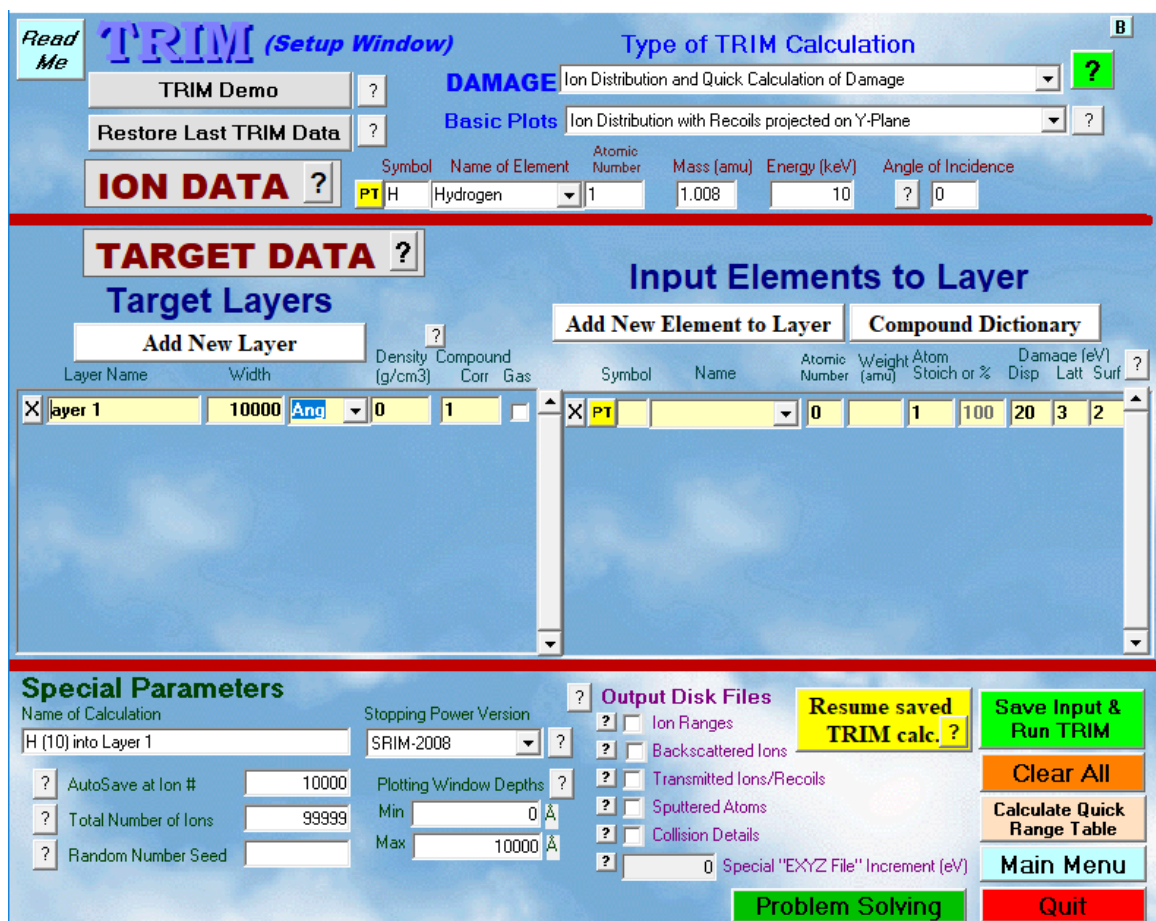
SRIM (10 pav.) leidžia sumodeliuoti jonų įsiskverbimo į homogenines medžiagas (bandinį) gylį, keičiant besiskverbiančių jonų jonizacijos energiją. Jonus galima parinkti iš visos cheminės elementų lentelės, o jų kinetinę energiją keisti nuo kelių dešimčių iki kelių šimtų elektronvoltų. Programoje įdiegta ganėtinai plati medžiagų biblioteka, kuri apima metalus, puslaidininkinius kristalus, organines medžiagas bei biologinius audinius. Programa yra nuolat tobulinama – nuo 1984 m. kas keletą metų atliekami dideli programos atnaujinimai papildant taikinių biblioteką bei gaunamus modeliavimo rezultatus suderinant su naujais jonų implantavimo eksperimentų duomenimis. Jeigu norimo taikinio nėra bibliotekoje, galima nesunkiai jį sudaryti pasirenkant iš cheminės elementų lentelės reikiamus elementus ir nurodant jų procentinę sudėtį (stechiometriją), agregatinę būseną (kieta ar dujinė) bei pakoreguojant tankį. Tankis, automatiškai nustatytas pagal elementų procentines dalis, gali neatitikti norimos medžiagos tankio dėl skirtingų atomų išsidėstymo ir tarpusavio sąveikos, pavyzdžiui, kristalo, turinčio skirtingus gardelių tipus

The screenshot shows the SRIM software interface. At the top, it is titled "Ion Stopping and Range Tables". Below the title, there are several input fields and buttons. The "Ion" section has a dropdown menu set to "H" (Hydrogen) with an atomic number of 1 and a mass of 1.008 amu. The "Ion Energy Range (keV)" is set from 10 to 10000. The "Target" section has a dropdown menu set to "Target" with a density of 0 g/cm³ and a "Gas Tgt." checkbox. There are buttons for "Add Element", "Compound Dictionary", and "Restore Last Target". Below these is a table with columns: "Delete Element", "Symbol", "Name", "Atomic Number", "Weight (amu)", "Stoich", and "Atom %". The table contains one entry with "PT" in the "Delete Element" column, "H" in "Symbol", "Hydrogen" in "Name", "1" in "Atomic Number", "1.008" in "Weight (amu)", "1" in "Stoich", and "100%" in "Atom %". At the bottom, there are buttons for "Calculate Table", "Clear All", "Main Menu", "Quit", and "Problem Solving". The "Stopping Power Units" are set to "MeV / (mg/cm²)" and "Compound Correction" is set to 1.

9 pav. Programos „SRIM“ pagrindinis langas.

tankis keičiasi: grafito tankis yra $2,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, o deimanto – $3,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [40]. Modeliuojant „SRIM“, jonus galima implantuoti tik į vieną medžiagą, o ne skirtingų, atskirų medžiagų sluoksnius. Kitas svarbus modeliavimo parametras – medžiagos pataisos faktorius CC (angl. *Compound Correction*). Jonų stabdymas junginiuose gali skirtis tarp kristalinės gardelės ir amorfinių medžiagų lengviems elementams. CC iš esmės nusako Braggo taisyklė: jonų stabdymas junginyje gali būti įvertintas pagal atskirų atomų, sudarančių junginį, stabdymo profilių tiesinę kombinaciją [41]. Braggo taisyklė yra labai svarbi modeliuojant jonų implantaciją. Turint pakankamai duomenų, kaip atitinkami jonai yra stabdomi grynose, vienos rūšies atomų, medžiagose, galima numatyti, kokią įtaką turės atsiradę cheminiai ryšiai junginiuose. Cheminiai ryšiai turi didesnę įtaką mažos molekulinės masės junginiams, ypač kurių atomai susieti vienvalečiais, divalečiais ar trivalečiais ryšiais. Įprastai nereikia atlikti jokių CC modifikacijų didelės molekulinės masės ir neorganiniams junginiams, pavyzdžiui, šiame darbe tiriamiems puslaidininkiniams kristalams. Jeigu norima, kad programa nedarytų jokios pataisos, reikia palikti $CC = 1$. Programa suskaičiuoja rezultatų lentelę – numatomus gylius, į kuriuos įsiskverbs implantuojamieji jonai (1 priedas). Įvertinus apytikslę kinetinę energiją, galima toliau tikslinti modeliavimą naudojant mažesnius kinetinės energijos režius ir taip rasti tinkamą implantuojamų jonų kinetinę energiją pagal norimą pasisiekti bandinio gylį. Iš „SRIM“ modeliavimų sužinojus optimalią implantuojamų jonų kinetinę energiją, galima tęsti bandymus ieškant optimalios implantuojamų jonų dozės, siekiant sukurti

norimą skaičių tūrinių defektų. Šie tūriniai defektai gali būti panaudoti sudarant izoliaciją puslaidininkinėje struktūroje. Tolimesni eksperimentai buvo vykdomi naudojantis „SRIM“ papildiniu „TRIM“. „TRIM“ (angl. *The Transport of Ions in Matter*) yra galingas ir populiarus įrankis modeliuoti jonų implantacijos pasiskirstymą puslaidininkinėse struktūrose [8], [9], [20], [26], [36], [42]. „TRIM“ iš esmės yra sudaryta iš 3 dalių (11 pav.). Pirmą dalis skirta implantuojamo jono aprašymui: pasirenkamas implantuojamas jonas, jo energija, implantacijos kampas. Antroji dalis skirta aprašyti taikinį. Taikinyje gali būti sudarytas iš keleto skirtingų medžiagų sluoksnių. Jei taikinio sluoksnio nėra bibliotekoje, jį galima susikonstruoti analogiškai kaip ir „SRIM“ aplinkoje. Trečioji dalis skirta techniniams parametrams: implantuojamųjų jonų skaičiaus pasirinkimui, modeliavimo lango pločio nustatymui (jeigu norima matyti specifinę, o ne viso bandinio zoną). Pats modeliavimo procesas gali trukti nuo kelių sekundžių iki kelių valandų, priklausomai nuo modeliuojamųjų jonų skaičiaus, energijos bei pasirinkto pažeidimų skaičiavimo būdo.



10 pav. Programos „TRIM“ pradinis langas

Yra 3 būdai, kuriems nereikia iš anksto parašyti specialaus programos kodo (TRIM.dat): greitas pažeidimų modeliavimas (KP modelis), kurio metu gaunamas jonų pasiskirstymo profilis, detalus griūtinių kaskadų modeliavimas (angl. *Full cascades – FC*) bei plonų (kelių dešimčių

angstremų storio) sluoksnių modeliavimas. Greitas KP bei pilnų kaskadų FC skaičiavimo modeliavimai – vieni populiariesnių, tačiau kuris yra tikslingesnis – reikia testuoti. Nors tiek KP, tiek FC remiasi Monte Karlo metodu, rezultatai gali žymiai skirtis. Vadovaujantis įvairių jonizacijos modelių aprašymais [31], [43], nuspręsta naudoti pilnų kaskadų modelį, kuris turėtų tiksliau modeliuoti šiame darbe nagrinėjamas situacijas. Programa taip pat siūlo dar 5 modeliavimo būdus, kuriems reikia iš anksto parašyti atskirą programinį kodą (TRIM.dat): greitai arba detalūs (pilnų kaskadų skaičiavimo) būdai, priklausantys nuo konkrečių atomų, energijų, implantavimo kampų bei gylio, nuo kurio yra jie implantuojami (praverstų modeliuojant pažeidimus struktūrų, ant kurių vėliau būtų auginami papildomi sluoksniai ir po užauginimo vėl būtų implantuojami jonai) arba skaičiuojamos susidūrimų kaskados (tiek greitos – dalinės, tiek pilnos), atsiradusios dėl neutronų poveikio arba dirbant su medžiagų monosluoksniais. Šiame TRIM.dat faile būtina aprašyti kiekvieną joną ir tai yra labai nepatogu bei praktiškai neįmanoma norint sumodeliuoti tūkstančius jonų. Apibendrinus, „SRIM“ ir „TRIM“ sukuria draugišką vartotojui aplinką, turi gerą naudojimosi vadovą, modeliavimo eksperimento sukūrimo pavyzdžius, kuriuose galima žingsnis po žingsnio išmokti modeliavimo pagrindų, pačios programos yra nuolat atnaujinamos.

2. 2. Modeliavimo eksperimento eiga

Visų pirma, norint įsitikinti, kad eksperimentai modeliuojami teisingai, buvo išanalizuoti kai kurių mokslinių straipsnių duomenys ir pamėginta atkartoti jų gautus jonų implantacijų sukurtų vakansijų profilius. A. Taube *et al.* [8] siekė sukurti kuo homogeniškesnę vakansijų, kurių tankis būtų ne mažesnis nei 10^{20} cm^{-3} , sluoksnį, siekiantį $0,7 \mu\text{m}$ gylį. Kadangi norima turėti kuo homogeniškesnę vakansijų profilį, reikia atlikti bent dvi implantacijas su skirtingomis energijomis. Implantuotų jonų profilių šlaitai sumuosius ir galima bus gauti bendrą implantacijos profilį per visą bandinio gylį. Minėtame straipsnyje modeliavimui naudota $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N} / \text{AlN} / \text{GaN} / \text{C-GaN} / \text{GaN}$ 36 / 0,6 / 700 / 1900 / 25 nm struktūra, o implantacija vykdoma su anglies (250 keV ir 520 keV) bei aliuminio (270 keV ir 800 keV) jonais. „SRIM“ aplinkoje buvo modeliuota anglies ir aliuminio jonų, kurių energija yra tarp 100 – 900 keV, implantacija į GaN sluoksnį. Didžioji dalis anglies jonų, implantuotų su 250 keV energija, sustos ties 365 nm, 520 keV – 660 nm (2 priedas, paryškintos eilutės), o aliuminio jonai, implantuoti 300 keV energija – ties 270 nm, 800 keV – 670 nm (1 priedas, paryškintos eilutės). Toliau buvo vykdomas „TRIM“ modeliavimas naudojant aukščiau nurodytas energijas: atkurta bandinio struktūra bei atlikti 4 modeliavimai: C⁺ 250 ir 520

keV, Al⁺ 300 ir 800 keV implantuojant po 10000 jonų. Pagal pirmu artiniu tiesinę priklausomybę tarp AlN ir GaN tankių apskaičiavau, kad Al_xGa_{1-x}N tankio išraiška turėtų būti:

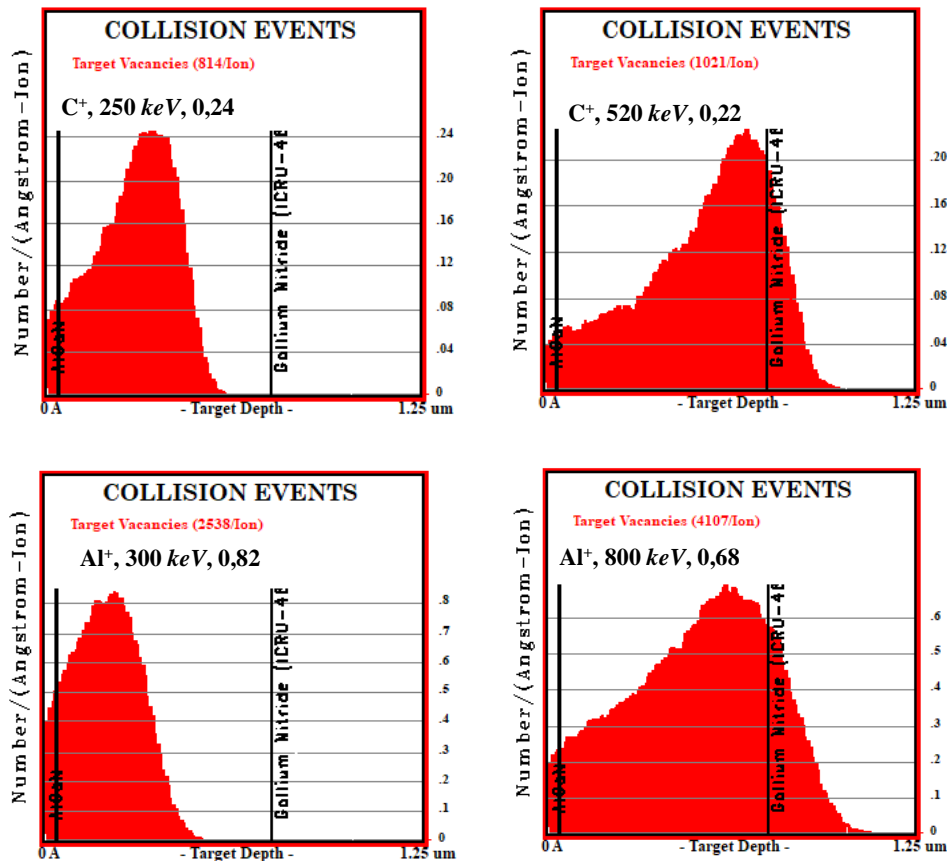
$$y = -2,89 * x + 6,15 \quad (7)$$

Pagal 7 formulę, Al_{0,16}Ga_{0,84}N tankis turėtų būti $5,69 \frac{g}{cm^3}$.

Dėmesio vertas yra „Collision events“ – susidūrimų grafikas, iš kurio galima gauti smailę, reikalingą išskaičiuoti reikiamą jonų dozę ir numatomą vakansijų koncentraciją pagal 8 lygtį. Ši smailė dar vadinama Braggo smaile. Iš esmės Braggo smailė sutampa su SRIM numatytais implantavimo gyliais („Projected Range“, 1 priedas).

$$\text{vakancijų koncentracija} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^3} \right) = \text{dozė} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^2} \right) * \text{Braggo smailės aukštis} \left(\frac{n}{A * \text{jonų sk}} \right) * 10^8 \quad (8)$$

Atlikus modeliavimus, buvo gauti jonų sukurtų vakansijų pasiskirstymo profiliai bei suskaičiuotos minimalios implantavimo dozės.

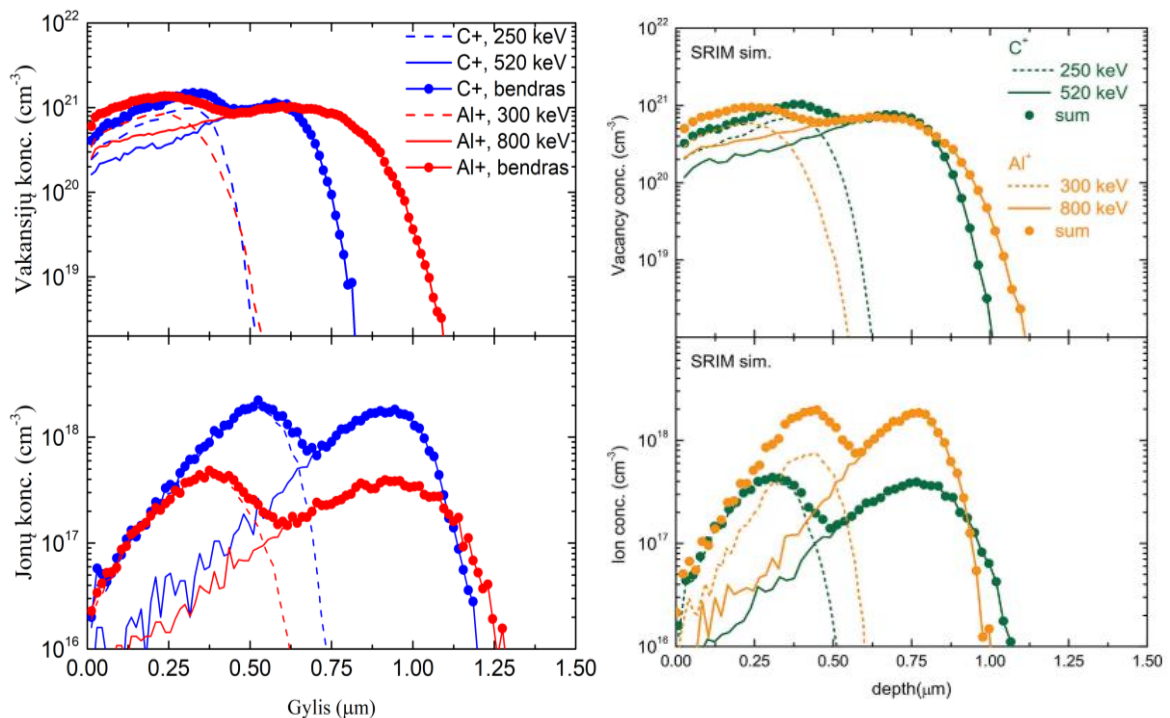


11 pav. Sumodeliuoti vakansijų pasiskirstymo profiliai implantuojant 250 keV ar 520 keV energijos anglies (rezultatai viršutinėje eilutėje) ir 300 keV ar 800 keV aliuminio jonus (rezultatai apatinėje eilutėje).

1 lentelė. Implantuojamų jonų tipas, energija bei numatomos dozės.

Jono tipas ir energija, keV	Apskaičiuota mažiausia dozė, $\left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^2}\right)$	Literatūroje [8] nurodyta dozė, $\left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^2}\right)$
C ⁺ , 250	$\frac{10^{20} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^3}\right)}{0,24 \left(\frac{n}{A * \text{jonų sk}}\right) * 10^8} = 4,2 * 10^{12}$	$4 * 10^{13}$
C ⁺ , 520	$\frac{10^{20} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^3}\right)}{0,22 \left(\frac{n}{A * \text{jonų sk}}\right) * 10^8} = 4,5 * 10^{12}$	$5 * 10^{13}$
Al ⁺ , 300	$\frac{10^{20} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^3}\right)}{0,82 \left(\frac{n}{A * \text{jonų sk}}\right) * 10^8} = 1,2 * 10^{12}$	$1 * 10^{13}$
Al ⁺ , 800	$\frac{10^{20} \left(\frac{\text{at}}{\text{cm}^3}\right)}{0,68 \left(\frac{n}{A * \text{jonų sk}}\right) * 10^8} = 1,5 * 10^{12}$	$1,5 * 10^{13}$

Mokslininkai pasirinko 10 kartų didesnes nei minimali dozės norėdami užtikrinti homogenišką vakansijų pasiskirstymą. Toliau su didesnėmis dozėmis buvo apskaičiuoti vakansijų bei implantuotų jonų profiliai (13 pav.), rezultatai palyginti su literatūra. Kaip matoma iš 13 pav., pavyko kokybiškai sumodeliuoti koncentracijų profilius. Gauti neatitikimai dėl įsiskverbimo gylio galėjo atsirasti dėl skirtingų pasirinktų medžiagų tankių. Kadangi straipsnyje nebuvo pristatyti medžiagų tankiai, buvo paimti tankiai iš žinytų [40].



12 pav. Vakansijų ir implantuotų jonų koncentracijų profiliai. Atliktų modeliavimų (kairėje) bei [8] (dešinėje) palyginimas.

2.3. Bandinių gamyba ir jonų implantacija

Tyrimui bandiniai buvo paruošiami Fizinių ir technologijų mokslų centro (FTMC) THz fotonikos laboratorijoje ir Atviros prieigos centre (Optoelektronikos skyriuje), jonai implantuojami FTMC Eksperimentinės branduolio fizikos laboratorijoje (Branduolinių tyrimų skyriuje). Tyrimui naudota puslaidininkinė AlGaIn/GaN struktūra TG2219 ($\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}$ / AlN / GaN buferinis sluoksnis / GaN /safyro padėklas 27/1/1000/1000 nm). Bandiniai, pagal Terahercų fotonikos laboratorijos bandinių eiliškumą, buvo pavadinti: U40, U41, U43, U46.

Tyrimo metu ant safyro padėklo užaugintų AlGaIn/GaN sluoksnių fotolitografijos būdu buvo suformuoti ominiai kontaktai. Kontaktų formavimą galima suskirstyti šiais etapais:

1. bandinių paviršiaus valymas;
2. UV negatyvi fotolitografija;
3. Ti/Al/Ni/Au užgarinimas, sluoksnių storiai 30/90/20/100 nm;
4. fotorezisto atkėlimas;
5. bandinių atkaitinimas, 30 s 830°C temperatūroje, N₂ aplinkoje;
6. UV negatyvi fotolitografija;
7. aliuminio jonų implantacija;
8. bandinių atkaitinimas (iki 900°C) – terminė jonų aktyvacija.

Darbo metu buvo tyrinėti skirtingi fotorezistų storiai (1,4 μm ir 3 μm), papildomo kaitinimo (angl. *Hardbake*) įtaka ir skirtinga implantuotų jonų dozė ($2 \cdot 10^{12}$ ir $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).

Jonų implantacijos metu iš aliuminio šaltinio paviršiaus nudulkinti (angl. *sputtered*) jonai magnetų ir lęšių sistema nukreipiami į greitinimo atkarpą, kurioje yra teigiamas potencialas. Neigiami jonai elektriniame lauke greitėja, tada susidurdami su perkrovimo dujomis (azotu) pakeičia krūvį į teigiamą, ir teigiamo potencialo yra stumiami (greitinami). Tuomet naudojantis magnetų ir lęšių sistema aliuminio jonai yra nukreipiami į Faradėjaus cilindą (srovės matavimui) arba į bandinį (implantavimui). Jonams keliaujant pro Faradėjaus cilindą yra matuojama srovė, kuri vėliau didelio dažnio skenuotoju yra išskleidžiama ant tam tikro ploto. Suintegrus šią nuolat kintančią srovę, gaunama implantuota jonų dozė. Bandiniai buvo implantuoti skirtingomis jonų dozėmis ($2 \cdot 10^{12}$ ir $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$). Implantacijos metu aliuminio jonams buvo suteikta 700 keV

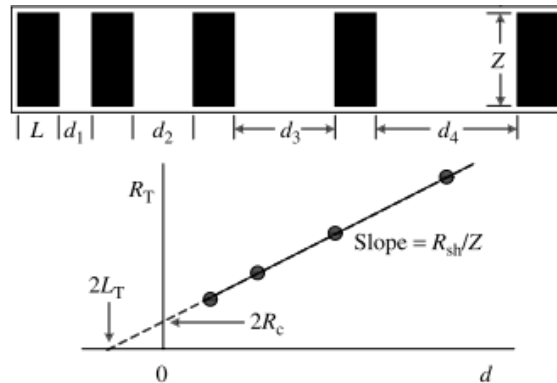
energija tikintis jonus implantuoti nedideliame, iki mikrometro, gylyje. Bandinių gamybos ypatumai apibendrinti 2 lentelėje.

2 lentelė. U40, U41, U43, U46 bandinių gamybos parametrai.

Bandinys	U40	U41	U43	U46
Fotorezisto storis, μm	3	1,4	3 + papildomas kietinimas	3
Al^+ dozė, cm^{-2}	$2 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$

2. 4. Implantuotos zonos varžos nustatymas

Bandinių implantuotos zonos varžos buvo matuotos perdavimo linijos (angl. *Transmission line model – TLM*) bei žiedinės perdavimo linijos (angl. *Circular transmission line model – CTLM*) metodais [44]. Šie metodai leidžia įvertinti bandinių kontaktų ir sluoksnio, ant kurio yra pagaminti kontaktai, varžas.



13 pav. TLM matavimo metodika. Pagal [44].

13 pav. vaizduoja puslaidininkio varžos, kaip priklausomybės funkcijos nuo atstumo tarp kontaktų aikštelių, matavimą TLM metodu. Matavimo kontaktai yra dedami ant gretimų kontaktų aikštelių. Čia Z – kontakto aikštelės plotis, L – kontakto aikštelės ilgis, d_i – atstumas tarp kontaktų aikštelių. Iš tiesės polinkio koeficiento

$$k = \frac{R_{sh}}{Z} \quad (9)$$

galima nustatyti savitąją paviršinę puslaidininkio varžą R_{sh} . Vieta, kurioje tiesė kerta Y ašį parodo dvigubą kontakto varžą R_c . Kadangi srovė teka ne tik statmenai tarp kontaktų, bet ir lanku, šio matavimo tikslumas yra ribotas. Alternatyvus būdas yra tirti žiedinių struktūrų varžas, kur visi srovės tekėjimo keliai yra vienodo ilgio. 14 pav. parodytas kontaktų išdėstymas CTLM schemeje. Juodas plotas vaizduoja metalizuotą sritį, o baltas – puslaidininkį. Varža išmatuojama

tarp metalinio žiedo centre ir stačiakampio kontūro. Atstumas tarp kontaktų d kinta, kadangi kinta išorinio metalinio apskritimo spindulys. Dėl žiedinių struktūrų geometrijos būtina įvesti korekcinį daugiklį C (10 lygtis).

$$C = \frac{L}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right), \quad (10)$$

kur L yra atstumas nuo kontakto centro iki metalizuotos srities (14 pav.). Kaip ir TLM metodu, kontakto dviguba aikštelės varža R_c randama iš tiesės susikirtimo su Y ašimi.



14 pav. CTLM struktūros. Pagal [44].

Puslaidininkio sluoksnio varža apskaičiuojama pagal

$$R_{sh} = \frac{2R_c * \pi * L}{L_T}, \quad (11)$$

kur L_T yra srovės perdavimo ilgis:

$$L_T = \frac{R_c}{k}. \quad (12)$$

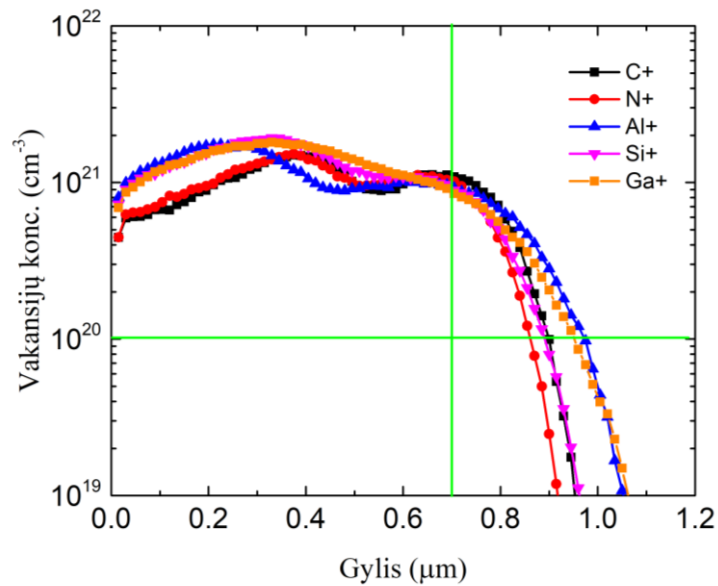
3. TYRIMO REZULTATAI

Darbe atliktas TRIM modeliavimas, panaudojant $\text{Al}_{0,204}\text{Ga}_{0,796}\text{N}$ / AlN / UID GaN / HR GaN / LT GaN / Al_2O_3 (padėklas), 25 / 1 / 500 / 1000 / 20 nm puslaidininkinę struktūrą. Buvo siekta gauti kuo labiau homogeniškesnį vakansijų profilį po du kartus (esant skirtingoms jonų energijoms) implantuojant C, N, Al, Si, bei Ga elementus. Buvo gautos minimalios implantavimo dozės siekiant gauti mažiausiai 10^{20} cm^{-3} defektų tankį. Atlikus literatūros analizę, pastebėta, kad optimali implantuojamų jonų dozė yra pasirenkama 10 kartų didesnė nei minimali. Rezultatai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Modeliavimo charakteristikų lentelė.

Jonas	Energija, <i>keV</i>	Braggo smailės nuotolis, <i>nm</i>	Braggo smailės aukštis, (<i>jon * ang</i>) ⁻¹	Implantuojama dozė, <i>cm</i> ⁻²	
				Minimali	Optimali
C	250	365	0,24	$4,2 * 10^{12}$	$4 * 10^{13}$
	520	660	0,22	$4,6 * 10^{12}$	$5 * 10^{13}$
N	270	370	0,31	$3,2 * 10^{12}$	$3 * 10^{13}$
	550	670	0,26	$3,9 * 10^{12}$	$4 * 10^{13}$
Al	300	270	0,8	$1,3 * 10^{12}$	$1,5 * 10^{13}$
	800	670	0,65	$1,5 * 10^{12}$	$1,5 * 10^{13}$
Si	450	360	0,83	$1,2 * 10^{12}$	$1 * 10^{13}$
	900	670	0,7	$1,4 * 10^{12}$	$1,5 * 10^{13}$
Ga	1000	380	2,4	$4,2 * 10^{11}$	$4,2 * 10^{12}$
	1750	670	2,2	$4,6 * 10^{11}$	$5 * 10^{12}$

Tūrinius defektus, suardančius puslaidininkinę gardelę ir dėl to apribojančius elektronų šuolinį judėjimą tarp atomų, lemia ne implantuotų jonų koncentracija, bet jų sukurtų vakansijų kiekis. 15 pav. parodytas implantuotų jonų sukurtų vakansijų profilis – vakansijų koncentracija yra pakankamai homogeniška ir visada didesnė nei 10^{20} cm^{-3} iki 700 nm gylio. Modeliuojami pažeidimai yra pirminiai, kurių dauguma techniškai iškart anihilioja, tad gaunami rezultatai yra orientacinio pobūdžio. Nepaisant to, šie duomenys leidžia teigti, jog pakankamai homogeniškas vakansijų profilis ir šį metodą galima taikyti ateityje.



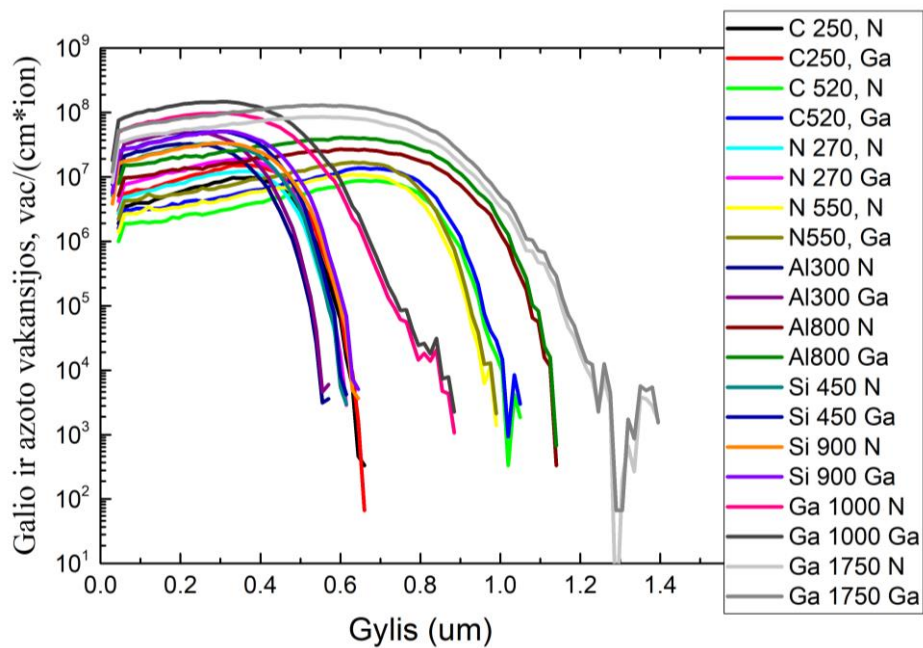
15 pav. Anglies, azoto, aliuminio ir silicio implantacijos metu sukurtų vakansijų koncentracijos profilis į AlGaN/GaN struktūrą.

Mokslo tiriamojoje praktikoje iškilo problema – pagrindinis apribojimas, stabdantis sukurtų profilių taikymą yra jonų implantavimo įrenginio techniniai duomenys: mažiausia bei didžiausia galima jonams suteikti energija. Energijų problemą galima būtų išspręsti atitinkamai pasirenkant didesnės ar mažesnės energijos reikalaujančius jonus arba ant viso bandinio uždėdant papildomą apsauginį sluoksnį, kuris absorbuotų perteklinę energiją ir neleistų sudaryti vakansijų kiaurai visą bandinį. Šis sluoksnis galėtų būti pagamintas tiek iš metalo, tiek iš organinio fotorezisto.

Todėl šiame baigiamajame darbe yra detaliau išanalizuota, kaip:

- sukurtų galio ir azoto vakansijų skaičius GaN priklauso nuo implantuojamų jonų tipo;
- papildomas (apsauginis) fotorezisto ar metalo sluoksnis keičia implantacijos metu sukuriamų vakansijų kiekį bei vakansijų susidarymo gylį teoriškai;
- implantuoti jonai suardo puslaidininkinę gardelę ir suformuoja izoliacines sritis.

Visų pirma, norint pamatyti, kaip galio nitride sukuriamų galio ir azoto vakansijų kiekis priklauso nuo implantuojamų jonų tipo, buvo atlikti modeliavimai su C, N, Al, Si ir Ga jonais. Iš 16 pav. ir 4 lentelėje matoma, kad didinant implantavimo energiją didėja ir sukuriamų vakansijų kiekis. Legendoje nurodoma koks jonas, su kokia energija sukuria galio arba azoto vakansiją GaN.



16 pav. Galio ir azoto vakansijų profilai implantuojant nurodytos energijos (*keV*) anglies, azoto, aliuminio, silicio arba galio jonais.

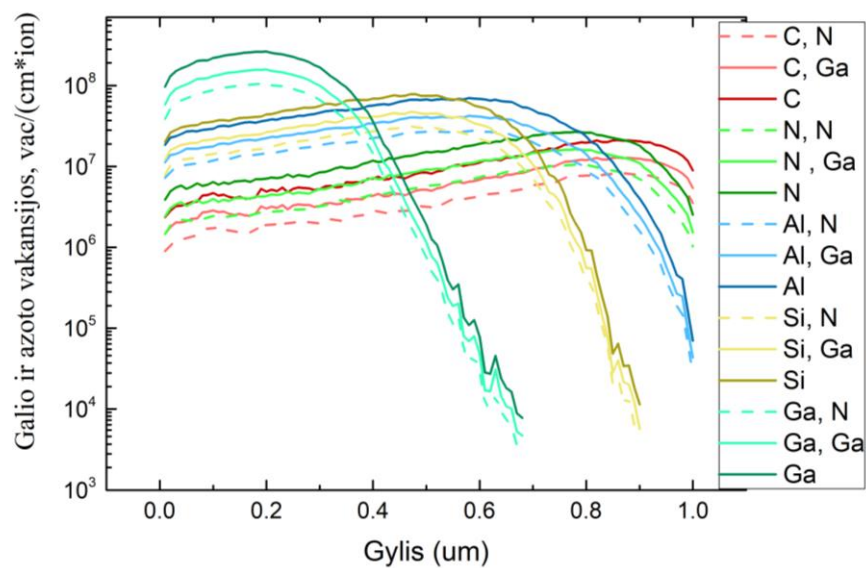
4 lentelė Sukuriamų vakansijų jonui santykis GaN.

Implantuojamas atomas	Energija, <i>keV</i>	Bendras vakansijų jonui santykis	Ga vakansijų jonui santykis	N vakansijų jonui santykis
C	250	822	493	239
	520	1026	625	401
N	270	1023	627	396
	550	1291	765	526
Al	300	2552	1544	1008
	800	4112	2419	1573
Si	450	2945	1774	1171
	900	4041	2447	1594
Ga	1000	9580	5988	3592
	1750	13571	8204	5367

Tolimesnio modeliavimo metu visiems elementams buvo suteikta tokia pati, 700 *keV*, energija siekiant eliminuoti vakansijų jonui priklausomybę nuo energijos. 700 *keV* energija pasirinkta dėl to, kad matytųsi tiek lengvo anglies atomo, tiek sunkaus galio atomo implantacija 1 μm gylyje. Duomenys pateikti 5 lentelėje bei 17 pav.

5 lentelė. N ir Ga sukuriamų vakansijų kiekis implantuojant įvairius jonus, turinčius 700 keV energiją.

Implantuojamas atomas	Branduolio masė	N vak. / (cm*jonų sk.)	Ga vak. / (cm*jonų sk.)	N + Ga vak. / (cm*jonų sk.)
C	12	$4,03 \cdot 10^8$	$6,38 \cdot 10^8$	$1,04 \cdot 10^9$
N	14	$5,37 \cdot 10^8$	$8,40 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^9$
Al	27	$1,55 \cdot 10^9$	$2,36 \cdot 10^9$	$3,91 \cdot 10^9$
Si	28	$1,45 \cdot 10^9$	$2,20 \cdot 10^9$	$3,66 \cdot 10^9$
Ga	70	$2,95 \cdot 10^9$	$4,42 \cdot 10^9$	$7,37 \cdot 10^9$

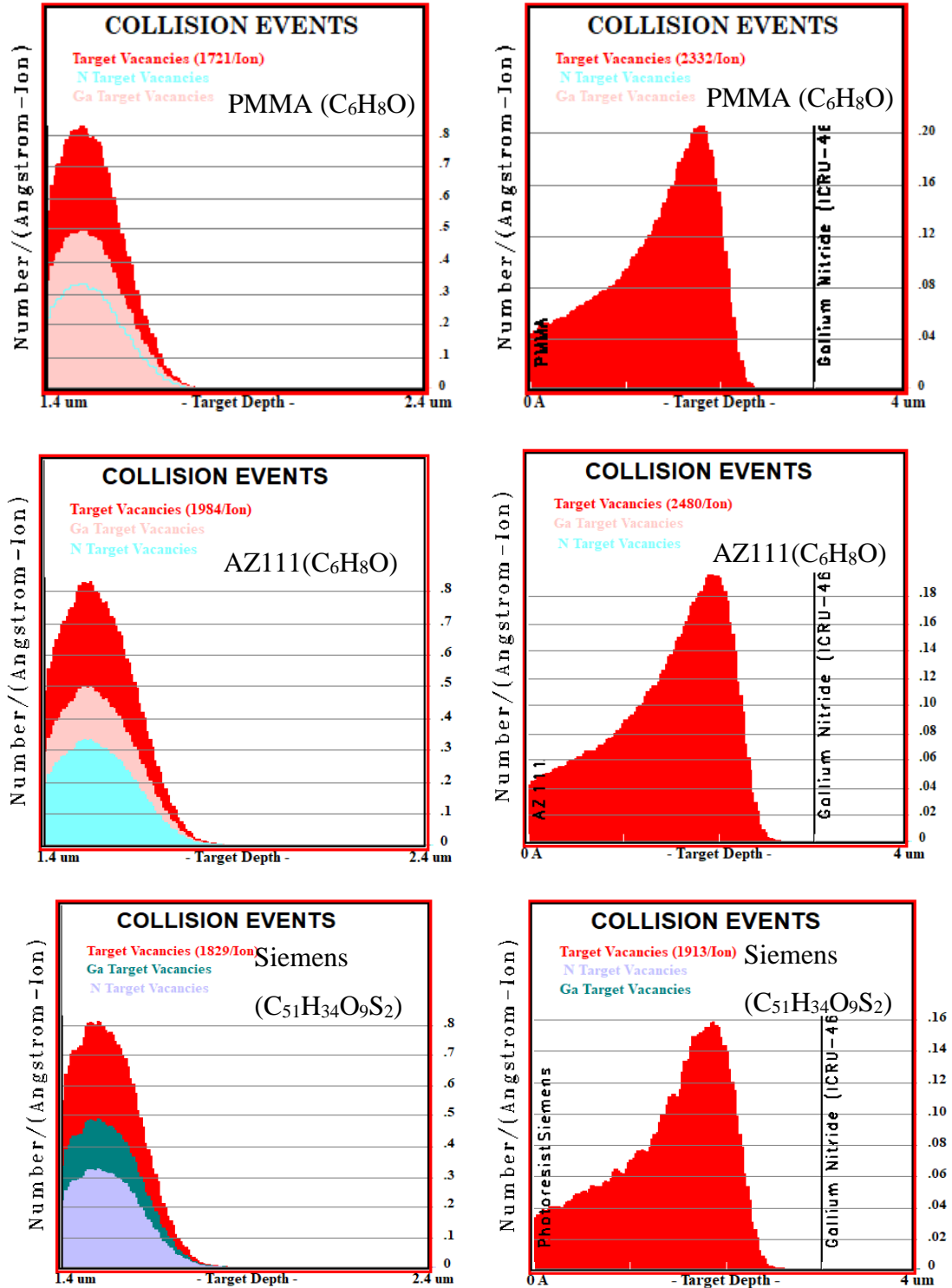


17 pav. Galio ir azoto vakansijų profiliai implantuojant skirtingus 700 keV energijos atomus.

Matoma, kad implantuojant jonus į GaN, visada yra sukuriama daugiau galio nei azoto vakansijų. Kulono sąveikos jėga tiesiogiai proporcinga branduolių krūviams (4 formulė), tad didesnį branduolio krūvį turintis galis labiau sąveikauja su implantuojamais atomais ir dėl to sukuriama daugiau galio nei azoto vakansijų. Implantuojant sunkesniais atomais susidaro daugiau seklių defektų, o implantuojant lengvesniais atomais defektai bandinyje susidaro giliau. Tai taip pat galima paaiškinti didesne ir mažesne veikiančia Kulono jėga.

Turint techninius implantavimo apribojimus, iškyla problema dėl implantavimo gylio kontroliavimo. Toliau buvo tiriama, kaip aliuminio jonai, turintys 700 keV energiją, elgiasi implantuojami į GaN, kai jis yra padengtas apsauginiu fotorezisto sluoksniu. Kadangi fotorezistas

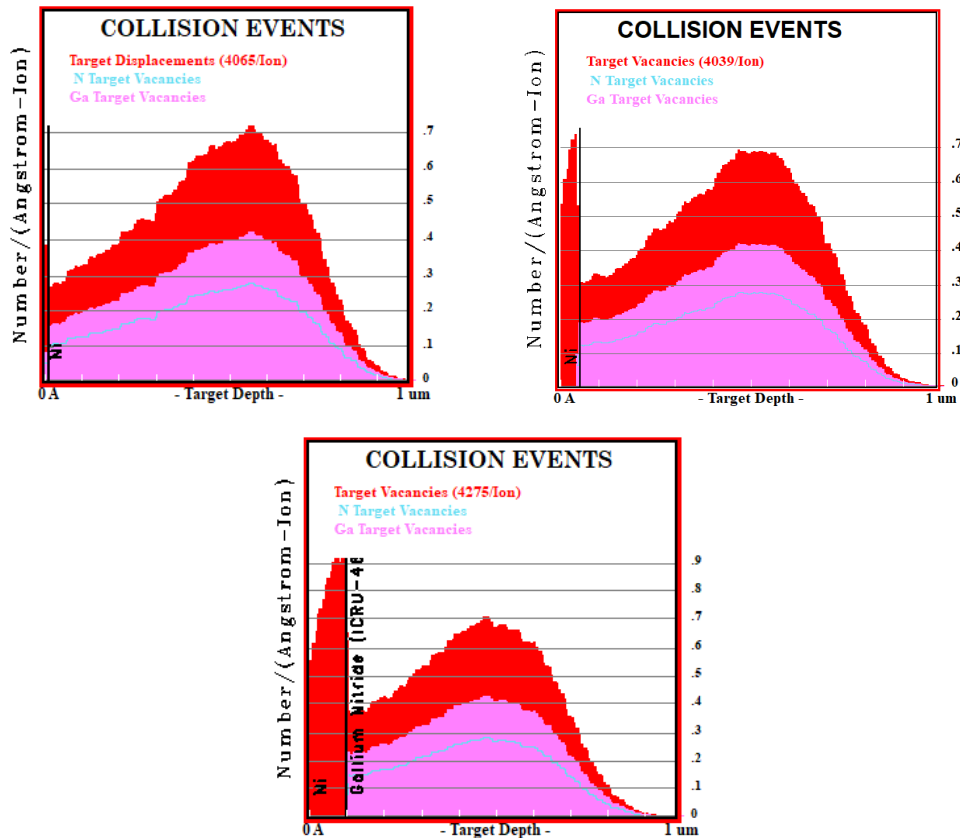
yra organinė medžiaga, kurioje svarbus pataisos faktorius CC, tyrimui buvo pasirinkti TRIM bibliotekoje esantys PMMA (C_6H_8O), AZ111 (C_6H_8O) ir SIEMENS ($C_{51}H_{34}O_9S_2$) fotorezistai. Modeliavimui buvo pasirinkti $1,4 \mu m$ ir $3 \mu m$ fotorezisto storiai – atitinkantys storius, susidarančius fotolitografijos metu gaminant bandinius.



18 pav. 700 keV aliuminio jonų implantacijos į GaN profiliai esant skirtingiems apsauginiams fotorezisto sluoksniams.

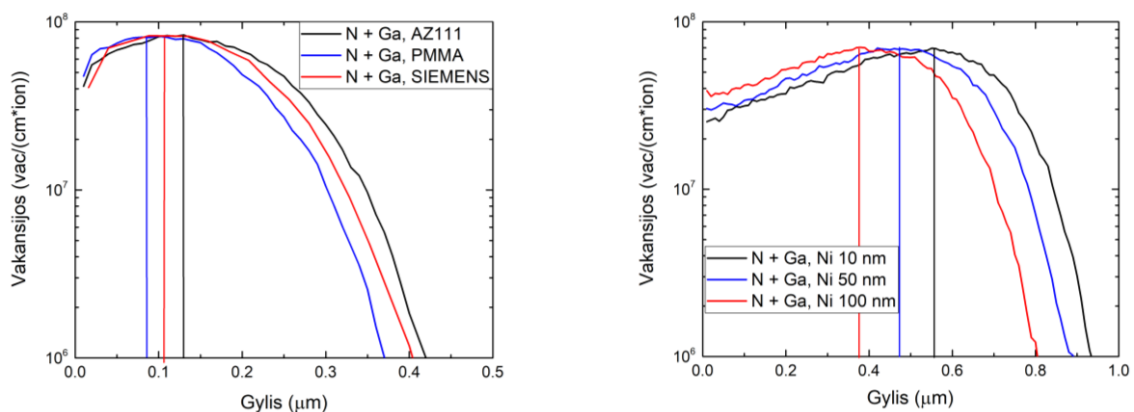
Modeliavimo rezultatai, parodyti 18 pav., rodo, kad $3 \mu\text{m}$ fotorezisto kaukė sėkmingai sulauko visus implantuojamus jonus, o pro $1,4 \mu\text{m}$ kaukę jonai prasiskverbė iki 100 nm bandinio gylio.

Alternatyva fotorezisto kaukei yra papildomas metalo sluoksnis. Tyrimo metu buvo modeliuotas GaN, padengtas skirtingo storio nikelio sluoksniu: 10 nm , 50 nm , 100 nm (19 pav.).



19 pav. 700 keV aliuminio jonų implantacijos į GaN profiliai esant skirtingiems apsauginio nikelio sluoksnio storiams: 10 , 50 , 100 nm .

Iš 18 ir 19 pav. duomenų buvo nubraižyti grafikai kaip po implantacijos pasislenka Braggo smailė, rezultatų suvestinė pateikiama 6 lentelėje.



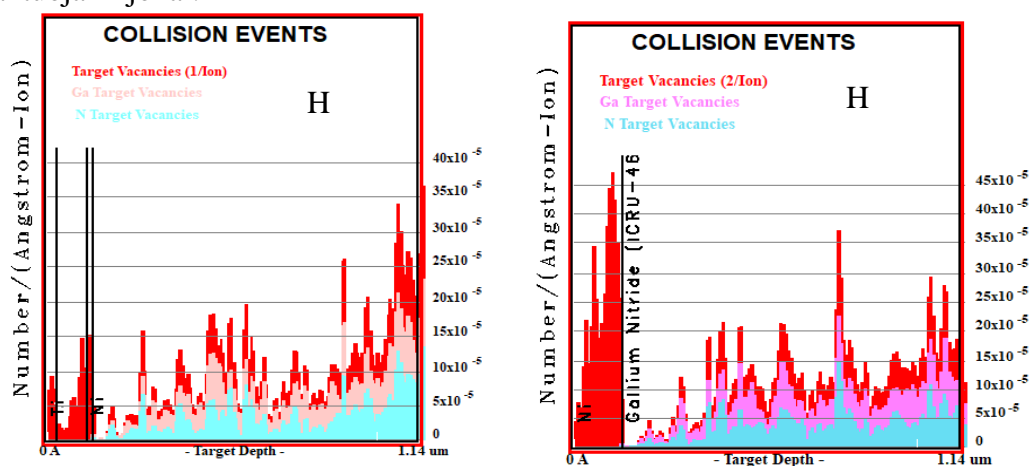
20 pav. Braggo smailės pasislinkimai naudojant skirtingas apsaugines medžiagas: $1,4 \mu\text{m}$ storio fotorezistus bei 10 nm , 50 nm , 100 nm Ni sluoksnius.

6 lentelė. Sukuriamų vakansijų kiekis esant skirtingiems apsauginiams sluoksniams

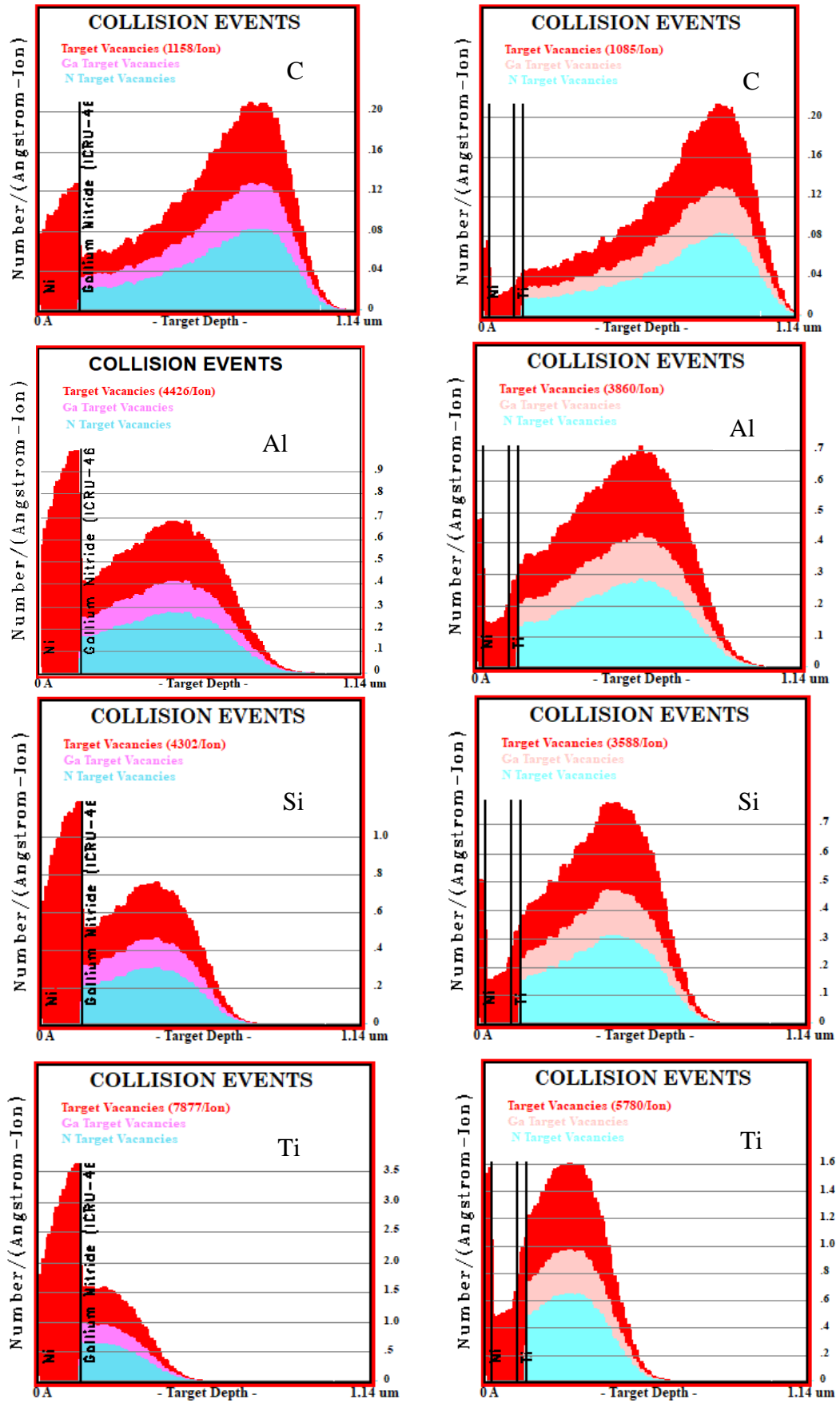
Dengiamas sluoksnis	N vak. / (cm*jonų sk)	Ga vak. / (cm*jonų sk)	N + Ga vak. / (cm*jonų sk)	Braggo smailės gylis, nm	Braggo smailės aukštis n/(A*ion)
AZ111	$7,87 \cdot 10^8$	$1,19 \cdot 10^9$	$1,98 \cdot 10^9$	120	0,82
PMMA	$6,82 \cdot 10^8$	$1,03 \cdot 10^9$	$1,71 \cdot 10^9$	90	0,82
SIEMENS	$3,07 \cdot 10^8$	$4,67 \cdot 10^8$	$7,74 \cdot 10^8$	100	0,82
Ni 10 nm	$1,54 \cdot 10^9$	$2,34 \cdot 10^9$	$3,88 \cdot 10^9$	570	0,705
Ni 50 nm	$1,48 \cdot 10^9$	$2,24 \cdot 10^9$	$3,72 \cdot 10^9$	480	0,69
Ni 100 nm	$1,39 \cdot 10^9$	$2,11 \cdot 10^9$	$3,49 \cdot 10^9$	380	0,7

Nuo fotorezisto priklauso implantacijos gylis (PMMA<SIEMENS<AZ111). Esant AZ111 (C₆H₈O) ir PMMA (C₆H₈O) sluoksniams sukuriamų vakansijų kiekis yra beveik vienodas, o esant SIEMENS (C₅₁H₃₄O₉S₂) fotorezisto sluoksniui gaunamas dvigubai mažesnis vakansijų kiekis. Tai galimai yra dėl fotorezistų cheminės sudėties. Nikelio sluoksnio storis neturi įtakos sukuriamų defektų kiekiui, bet turi įtaką sukuriamų defektų gyliui. Esant storesniam Ni sluoksniui, defektai susidaro arčiau bandinio paviršiaus: naudojant 10 nm Braggo smailė yra 570 nm gylyje, o naudojant 100 nm Ni sluoksnį, Braggo smailė yra ties 380 nm.

Siekiant imituoti kontaktus, buvo modeliuota jonų implantacija su Ti/Al/Ni 30/90/20 nm sluoksniu prieš GaN ir rezultatai palyginti su nikelio 140 nm (bendru Ti/Al/Ni storio) sluoksniu. Modeliavimui naudoti H, C, Si, Al, Ti (700 keV) kaip potencialūs ir dažnai literatūroje sutinkami implantuojami jonai.

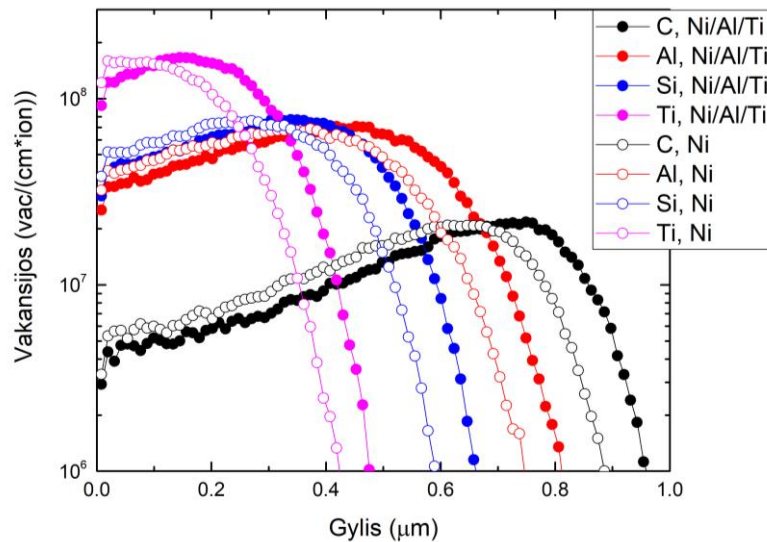


21 pav. Vandenilio (700 keV) implantacijos modeliavimas į GaN.



22 pav. Anglies, aliuminio, silicio ir titano (700 keV) implantacijos modeliavimas į GaN.

Iš 21 pav. matoma, kad vandenilis pereina kiaurai bandinį ir nesukuria norimų vakansijų, todėl tolimesniame tyrime jo atsisakyta. 22 pav. parodo, kaip didėjant implantuojamam atomui seklėja sukuriamų vakansijų gylis. 23 pav. leidžia palyginti metalinio kontakto ir tokio paties storio nikelio sluoksnio vakansijų profilius. Iš esmės profiliai yra labai panašūs, tik gryno nikelio sluoksnis labiau sustabdo implantuojamus jonus – vakansijos susidaro sekliu, tačiau jų yra nežymiai daugiau ties paviršiumi. Iš to seka, kad parenkant implantavimo dozę, nėra žymaus skirtumo, naudojama Ti/Al/Ni 30/90/20 nm ar Ni 140 nm danga.

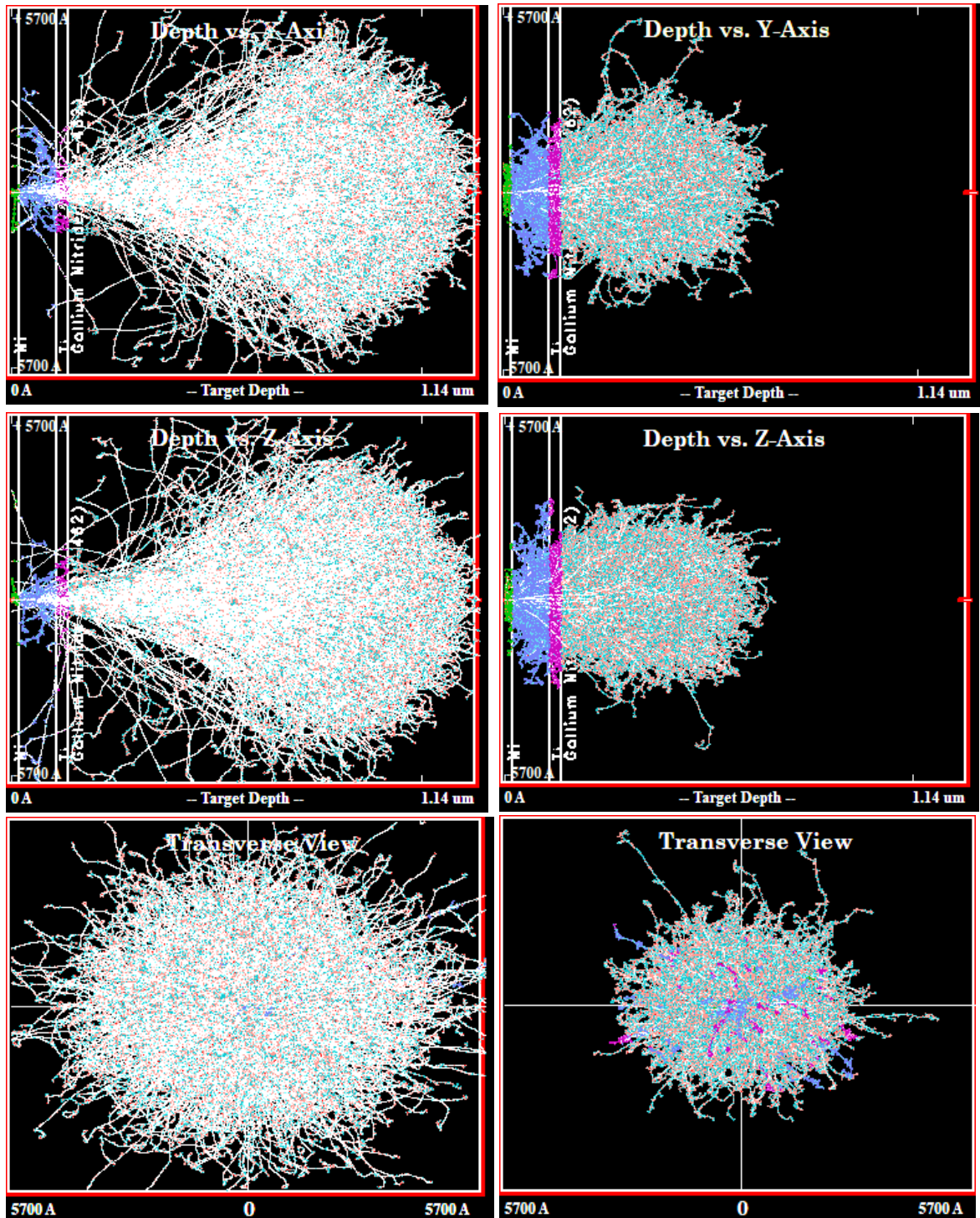


23 pav. Susidariusių vakansijų profilio priklausomybė nuo implantuojamų jonų ir apsauginio sluoksnio sudėties.

7 lentelė. Vakansijų susidarymo parametrai esant skirtingam dengiamam sluoksniui.

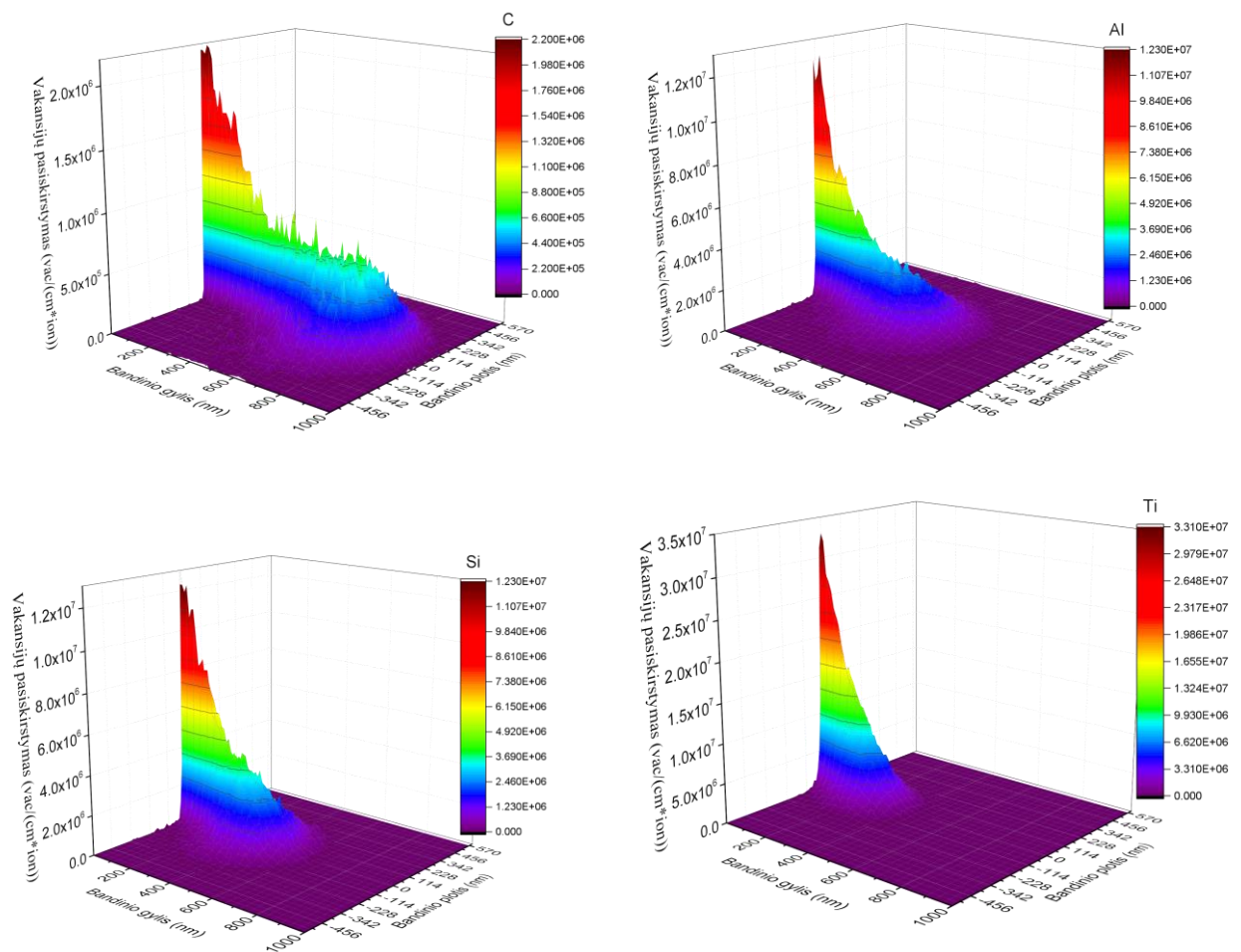
Dengiamas sluoksnis	Jonas	N vakansijos / (cm³*jonų sk)	Ga vakansijos / (cm³*jonų sk)	Bendros vakansijos / (cm³*jonų sk)	Braggo smailės gylis ~nm	Braggo smailės aukštis n/(A*ion)
Ti/Al/Ni 30/90/20 nm	C	3,54*10 ⁸	5,58*10 ⁸	9,12*10 ⁸	740	0,21
	Al	1,23*10 ⁹	1,88*10 ⁹	3,11*10 ⁹	430	0,7
	Si	1,13*10 ⁹	1,72*10 ⁹	2,85*10 ⁹	310	0,78
	Ti	1,66*10 ⁹	2,50*10 ⁹	4,16*10 ⁹	160	1,6
Ni 140 nm	C	3,44*10 ⁸	5,42*10 ⁸	8,87*10 ⁸	650	0,21
	Al	1,14*10 ⁹	1,73*10 ⁹	2,86*10 ⁹	370	0,69
	Si	1,09*10 ⁹	1,55*10 ⁹	2,57*10 ⁹	260	0,77
	Ti	1,28*10 ⁹	1,93*10 ⁹	3,22*10 ⁹	70	1,5

Apibendrinti duomenys (sukuriamų vakansijų kiekis bei gylis) pateikti 7 lentelėje. Bendras sukuriamų vakansijų kiekis yra labai panašus, tačiau skiriasi kiek giliai susidaro didžioji vakansijų dalis. Palyginus su Ti/Al/Ni tantemu, nikelio sluoksnis efektyviau stabdo implantuojamus jonus. Tai galimai yra dėl skirtingo Ti, Al ir Ni dydžio bei Kuloninės sąveikos tarp atomų.



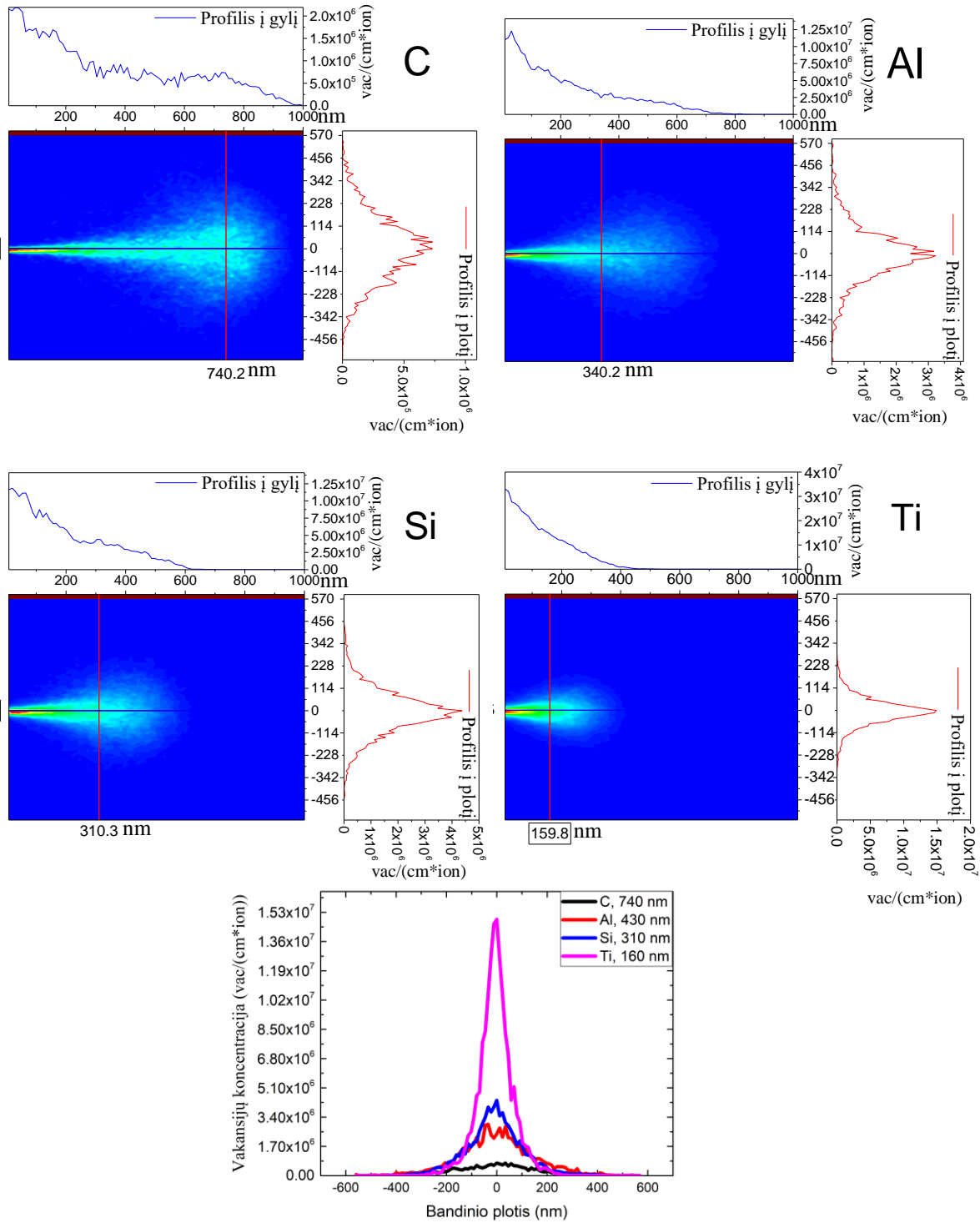
24 pav. Anglies (kairėje) ir titano (dešinėje) sukuriami vakansijų erdviniai pasiskirstymai. Pirmi du paveikslėliai – pjūviai Y ir Z plokštumose, trečias paveikslėlis – pjūvis statmenai implantavimo srautui.

Gavus 2D profilius toliau sekė 3D analizė – kaip sukuriamos vakansijos tūryje. Kadangi braizant grafikus programa dirba 10-50 kartų lėčiau, bendram vaizdui susidaryti buvo nubraižyti tik anglies ir titano (mažiausio ir didžiausio implantuojamo atomo) profiliai. 24 pav. naudojama legenda: X – koordinatė **į gylį**, Y, Z – koordinatės bandinio **plokštumoje**, *Lateral* – horizontalus, o *Longitudinal* – išilginis pjūvis. Balta spalva žymi implantuojamo jono trajektoriją, žalia – sustojusį Ni atomą, mėlyna – sustojusį Al atomą, violetinė – sustojusį Ti atomą. Praėjus pro metalus C jonai išplinta $\sim 325 \text{ nm}$ nuo implantavimo trajektorijos esant $\sim 1,1 \mu\text{m}$ **bandinio** gyliui ($\sim 950 \text{ nm}$ GaN), tiesiai po kontaktais C išplinta $\sim 90 \text{ nm}$. Praėjęs pro metalus Ti išplinta $\sim 250 \text{ nm}$ esant $\sim 390 \text{ nm}$ gyliui, o tiesiai po kontaktais išplinta $\sim 185 \text{ nm}$. Didėjant implantuojamo jono atominei masei ir dydžiui, didėja sukuriamų defektų kiekis bei sukuriami seklesni defektai. Toliau pateikti 3D vakansijų pasiskirstymai:



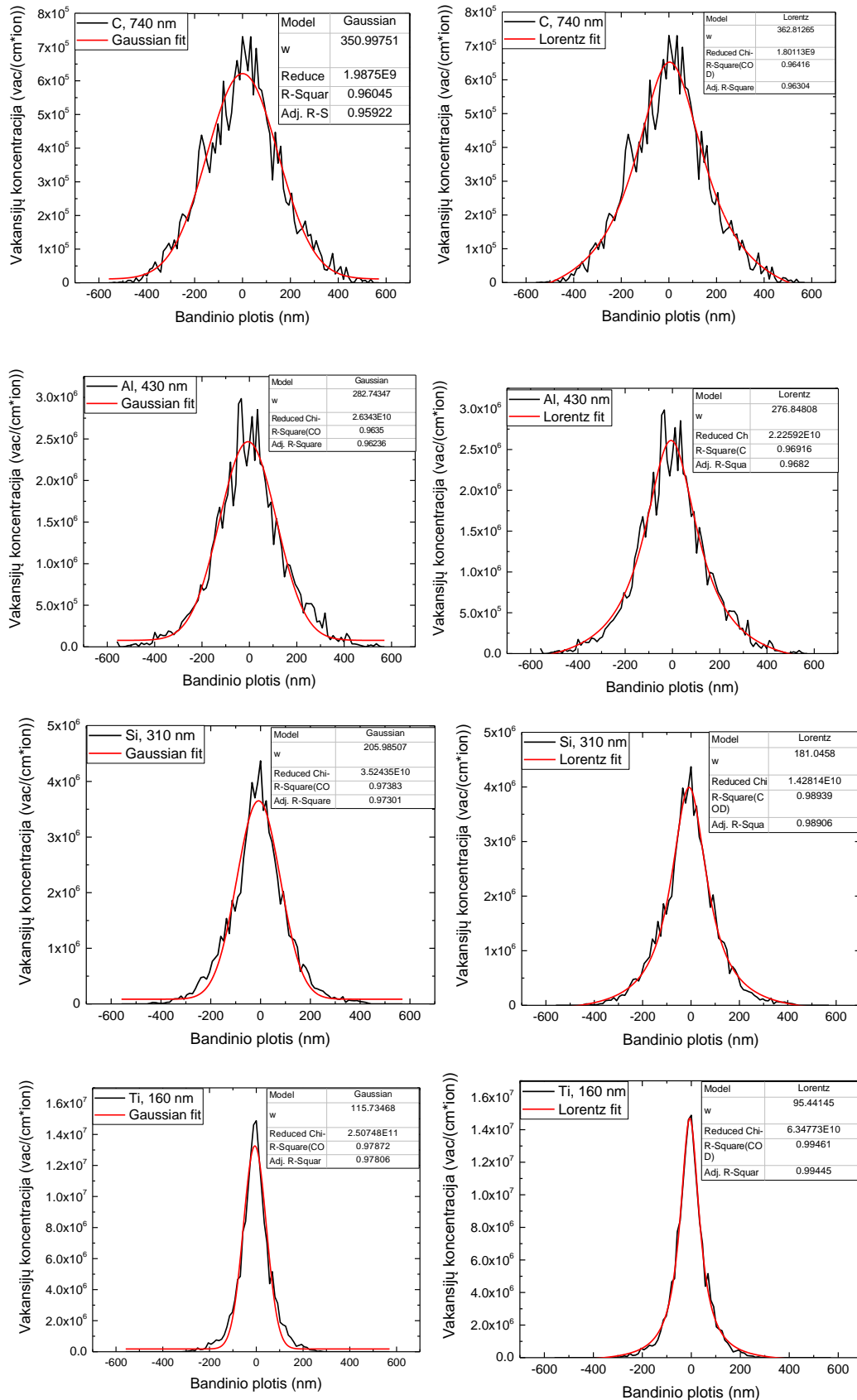
25 pav. C, Al, Si, Ti sukuriamų vakansijų pasiskirstymas GaN bandinyje.

25 pav. leidžia vizualiai pamatyti, koks yra 3D vakansijų pasiskirstymas. Tačiau sudėtinga palyginti, kokius profilius per Braggo smailės pjūvį sukuria implantuojami atomai. Tolimesnei analizei buvo padaryti matriciniai vakansijų profiliai į gylį implantavimo plokštumoje ir į plotį Braggo smailės gylyje, jie pavaizduoti 26 pav.



26 pav. Matriciniai vakansijų profiliai į gylį implantavimo plokštumoje ir į plotį Braggo smailės gylyje.

Iš pjūvių, esančių Braggo smailės gylyje, galima paskaičiuoti sukuriamų vakansijų išplitimą smailės pusplotyje (angl. *Full width at half maximum* – *FWHM*). Buvo pasinaudota programos Origin galimybe aprašyti esamus profilius aproksimacijos funkcijomis. Pagal galimų funkcijų aprašymus, buvo pasirinkta naudoti Gaussian ir Lorentz aproksimavimo funkcijas. Rezultatai pateikti 27 pav. ir 8 lentelėje.



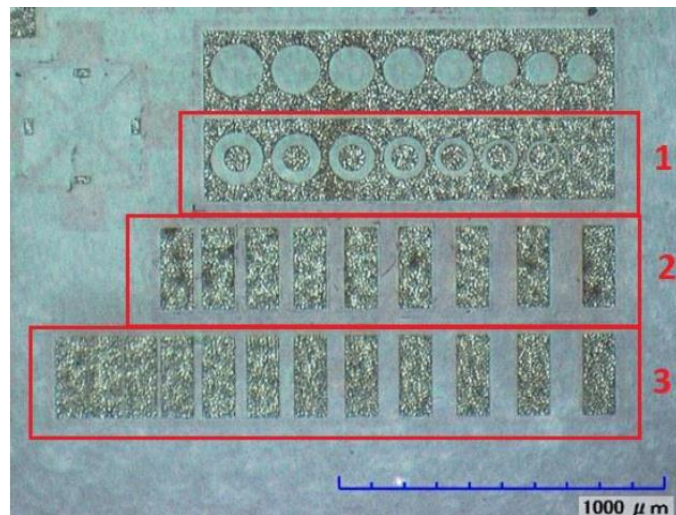
27 pav. FWHM aproksimacijos ties Braggo smailės gyliu.

8 lentelė. FWHM suvestinė.

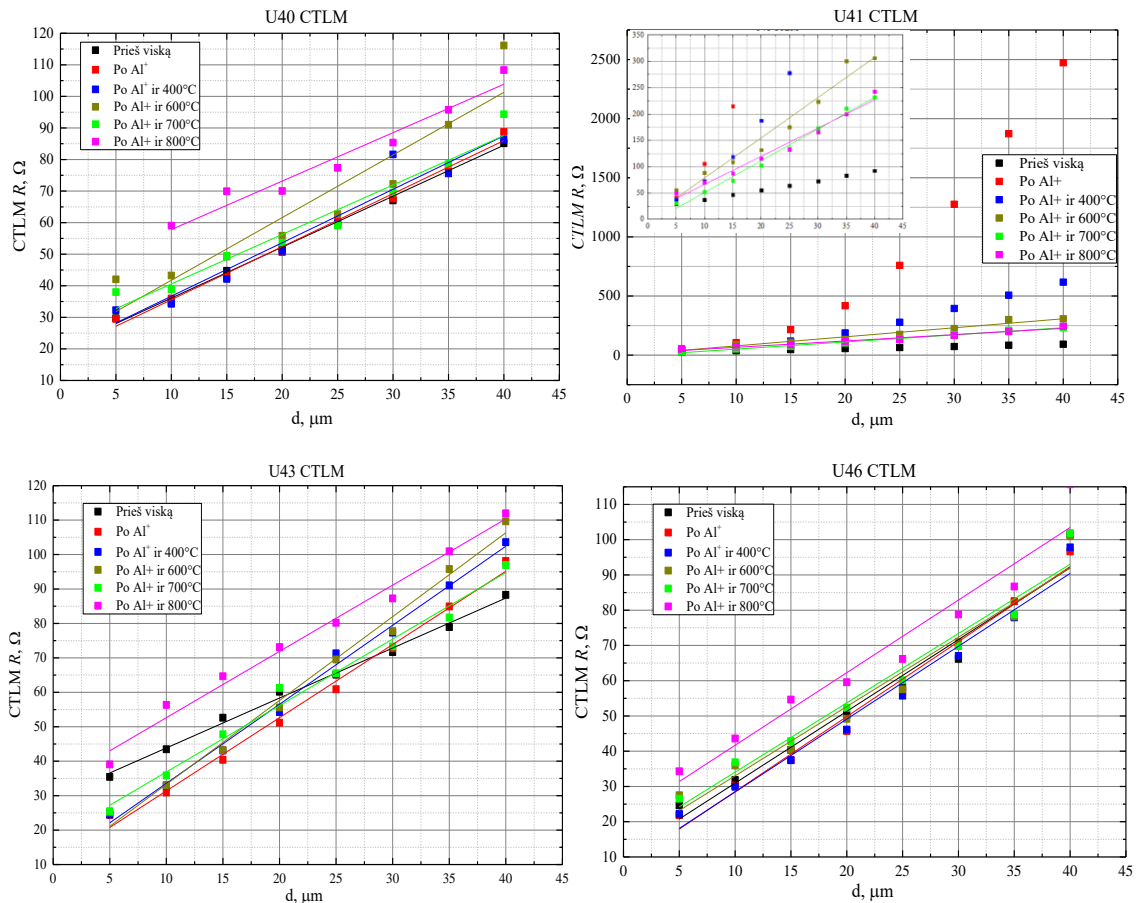
Implantuojamas atomas	Gaussian FWHM, nm	R-square, Gaussian	Lorentz FWHM, nm	R-square, Lorentz
C	351 ± 9.96	0.96045	362.81 ± 15.66	0.96416
Al	282.74 ± 7.50	0.9635	$276,85 \pm 10,65$	0.96916
Si	205.99 ± 4.61	0.97383	$181,05 \pm 3,92$	0.98939
Ti	115.73 ± 2.38	0.97872	$95,44 \pm 1,44$	0.99461

Aproximuojant **Lorentz** funkcija buvo gaunama **didesnė R-square** vertė nei Gaussian funkcija, tad Lorentz skirtinys tiksliau aprašo modeliavimo duomenis. Šie duomenys leidžia įvertinti, kiek smarkiai į šonus nukrypsta implantuojami jonai ir koks yra sudaromų vakansijų išplitimas.

Atlikus modeliavimo tyrimus, buvo pereita prie pagamintų U40, U41, U43, U46 bandinių analizės. Po aliuminio jonų implantacijos (energija: 700 keV, dozė: $2 \cdot 10^{12}$ ir $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) buvo atlikti TLM, CTLM matavimai, atlikus RTA 400°C, 600°C, 700°C, 800°C ir 900°C temperatūrose. 400°C – 800°C atkaitinimų CTLM matavimo rezultatai pateikti 29 pav.

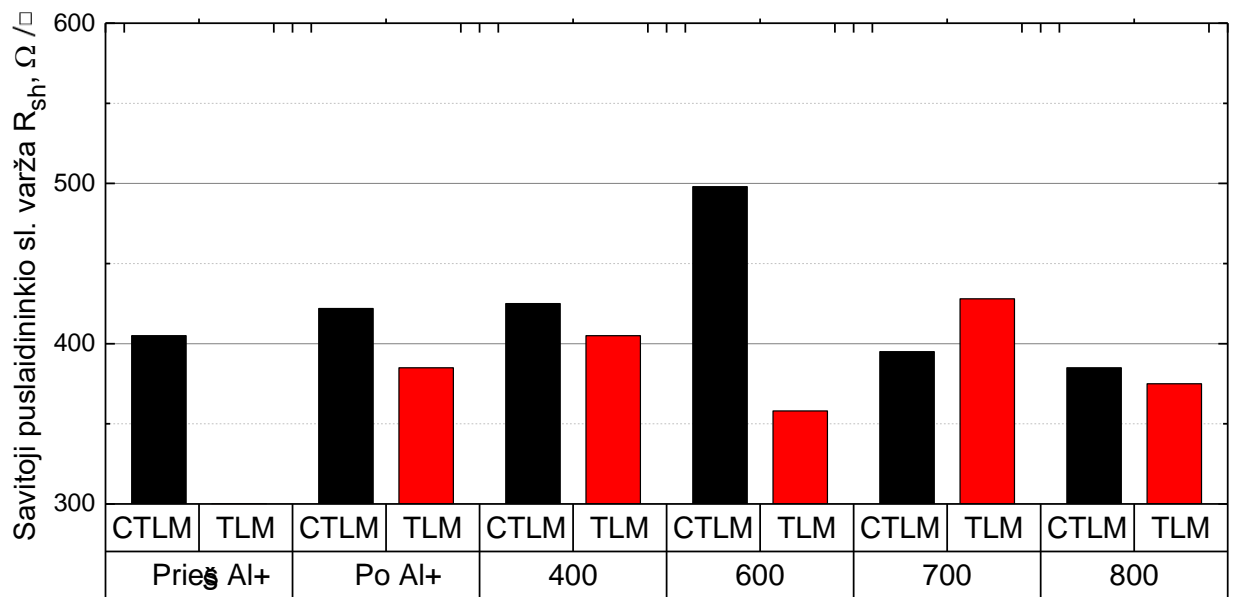


28 pav. U43 bandinio fragmentas po jonų implantacijos. 1 - CTLM struktūros, 2 - izoliacijos matavimo zona, 3 - TLM struktūros. Jonais implantuotos sritys yra tamsesnės.



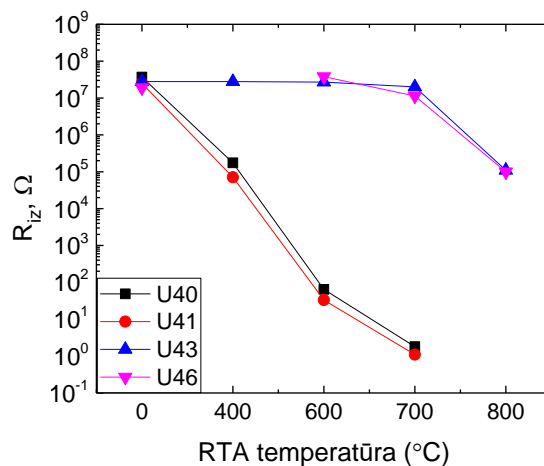
29 pav. U40, U41, U43, U46 bandinių CTLM matavimų rezultatai.

Iš 29 pav. U41 dalies grafiko matoma, kad plonas fotorezisto sluoksnis yra netinkamas izoliacijos formavimui jonų implantacijos būdu, gaunami pažeisti 2DEG kanalai: po jonų implantacijos ir atlikus RTA 400°C, varža turi parabolinę, o ne tiesinę (Ominę) priklausomybę. Tai patvirtina atliktus modeliavimus, kuriuose 1,4 μm storio fotorezistas neapsaugo norimų puslaidininkio sričių (žr. 18 pav.). Iš 29 pav. U40, U43 ir U46 grafiko dalies matoma, kad su mažesne implantuojamų jonų doze gaunamos didesnės varžos prie mažesnių kanalo ilgių nei su didesne implantuojamų jonų doze. Idealiu atveju varža, mažėjant atstumui tarp kontaktų, turėtų artėti į nulį, todėl mažesnė ($10^{12} cm^{-2}$) jonų dozė nėra tinkama tolimesniems kokybiškos izoliacijos tyrimams. Tai taip pat patvirtina iš atliktų modeliavimų: buvo gauta, kad minimali dozė, siekiant sukurti izoliacines sritis, yra $10^{13} cm^{-2}$. TLM matavimų kreivės rodė analogiškas priklausomybes CTLM kreivėms. Iš tiesių polinkio ir susikirtimo su Y ašimi pagal (9) – (11) formules buvo apskaičiuota puslaidininkio 2DEG kanalo varža. TLM matavimai prieš aliuminio implantaciją nebuvo atlikti, tačiau galima įvertinti sluoksnio varžos kitimą atlikus jonų implantaciją bei RTA. Duomenys pateikti priede esančiose 9 – 12 lentelėse. U40 bandinio puslaidininkio sluoksnio varža parodyta 30 pav.



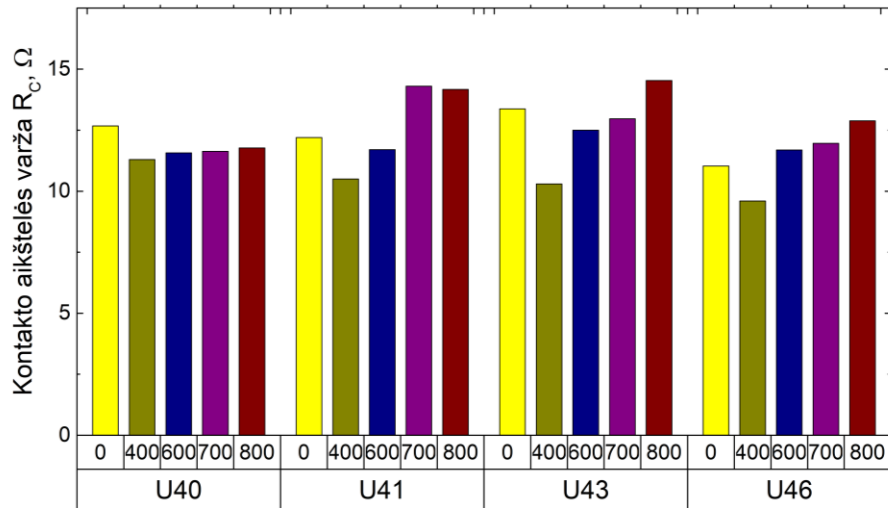
30 pav. U40 bandinio varžų pokyčiai po jonų implantacijos ir RTA, °C.

Apšvietus bandinius vyksta krūvininkų fotogeneracija, todėl izoliacijos matavimai buvo atliekami apšvietus ir neapšvietus bandinius zoninės matavimo stotelės mikroskopo lempa. Išjungus apšvietimo lempą varža tam tikrais atvejais išaugdavo virš 40 GΩ. Tai viršydavo naudoto matavimo prietaiso (KEITHLEY 2400) triukšmo lygį, todėl nebuvo įmanoma korektiškai išmatuoti bandinio varžos. Siekiant tikslumo, buvo parenkamos matavimo įtampos (U) ir apribojamas srovės stipris siekiant patikimai išmatuoti varžą – kad bandiniai nekaistų, nes varža priklauso nuo jų temperatūros. Implantuotų jonų izoliacijos matavimų rezultatai pateikti priede esančiose 13 – 16 lentelėse. Apibendrinta visų bandinių izoliacijos varžos priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros parodyta 31 pav.



31 pav. Izoliacijos varžos priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros.

31 pav. matome, kad bandiniai su mažesne implantuotų jonų doze pasižymėjo prastesnėmis izoliacinėmis savybėmis – izoliacija po pirmųjų atkaitinimų sumažėjo 6 eilėmis ir prilygo neimplantuoto sluoksnio varžai. Galima teigti, kad izoliacijos nebeliko. Bandinys su papildomu kietinimu buvo termiškai stabiliausias, išlaikė varžą po pirmojo atkaitinimo priešingai nei nekietintas U46. Tai leidžia daryti prielaidą, kad fotorezisto kaukės papildomas kietinimas turi teigiamą poveikį pagamintos izoliacijos parametrams.



32 pav. Kontakto aikštelės varžos priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros, °C.

Papildomai buvo matuojama metalinės kontakto aikštelės varžos priklausomybė nuo atkaitinimo temperatūros norint įvertinti izoliacijos gamybos metu galimą poveikį ominių kontaktų parametrams. 32 pav. matome, kad kontakto aikštelės varža pakito keliais omais, atsižvelgus į matavimo tikslumą, galima teigti, kad kontakto varžos pokytis dėl RTA nereikšmingas ir neturėjo įtakos izoliacijos įvertinimui. Įvykdžius bandinių RTA 900 °C temperatūroje buvo nebeįmanoma atlikti matavimų, nes nebeliko ominių kontaktų dėl prasidėjusio degradavimo, kuris matėsi struktūriniais kontakto pakitimais ir metalų sukritimu į lašus (33 pav.).



33 pav. Bandinių kontaktų aikštelės po RTA 800 °C (kairėje) ir 900 °C (dešinėje).

IŠVADOS

Šio darbo metu atlikti H, C, Al, Si, Ti jonų implantacijos į GaN modeliavimai ir iširta implantuojamų jonų bei apsauginių kaukių įtaka sukuriama galio ir azoto vakansijų kiekiui bei profiliams. Tyrimo metu pagaminti bandiniai su skirtingo storio kaukėmis bei skirtinga implantuojamų jonų doze. Darbe:

- modeliuojant nustatyta, kad naudojant apsauginę $1,4 \mu\text{m}$ storio AZ111 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$) arba PMMA ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$) fotorezisto kaukę, sukuriama vakansijų kiekis yra beveik vienodas ($\sim 1,8 \cdot 10^9$ vak. / ($\text{cm} \cdot \text{jonų sk}$)), o Braggo smailės vieta atitinkamai yra 120 nm ir 90 nm gylyje. Naudojant tokio paties storio, bet kitokios cheminės sudėties SIEMENS ($\text{C}_{51}\text{H}_{34}\text{O}_9\text{S}_2$) fotorezisto kaukę sukuriama mažesnis vakansijų kiekis ($7,74 \cdot 10^8$ vak. / ($\text{cm} \cdot \text{jonų sk}$)), o defektų gylis – apie 100 nm ;
- modeliuojant nustatyta, kad nikelio nuo 10 nm iki 100 nm storio kaukės sluoksnio storis neturi įtakos sukuriama defektų kiekiui ($3,7 \cdot 10^9$ vak. / ($\text{cm} \cdot \text{jonų sk}$)), bet turi įtaką sukuriama defektų gyliui (atitinkamai, nuo 570 nm iki 380 nm). Naudojant Ti/Al/Ni $30/90/20 \text{ nm}$, kurio suminis storis 140 nm , arba Ni 140 nm storio apsauginę kaukę, sukuriama vakansijų kiekis nežymiai skiriasi, tačiau skiriasi kiek giliai susidaro didžioji vakansijų dalis: palyginus su Ti/Al/Ni kauke, nikelio sluoksnis efektyviau stabdo implantuojamus jonus;
- eksperimentiškai patvirtinta, kad implantuojami aliuminio jonai, turintys 700 keV energiją, nepraeina pro fotorezisto kaukę, kurios storis yra bent $3 \mu\text{m}$;
- eksperimentiškai nustatyta, kad implantuojamų aliuminio jonų 10^{13} cm^{-2} dozės pakanka sudaryti didelės varžos (virš $10^9 \Omega$) izoliacines sritis.

LITERATŪRA

- [1] M. Tonouchi, “Cutting-edge terahertz technology,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 97–105, 2007.
- [2] K. Kawase, Y. Ogawa, and Y. Watanabe, “Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints,” *Opt. Express*, vol. 11, no. 20, pp. 2549–2554, 2003.
- [3] Y. Y. Chen Wang, Ruiyun Zhou, Yuxin Huang, Lijuan Xie, “Terahertz spectroscopic imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among sausages,” *Food Control*, 2018.
- [4] D. Suzuki, S. Oda, and Y. Kawano, “A flexible and wearable terahertz scanner,” *Nat. Photonics*, vol. 10, no. 12, pp. 809–813, 2016.
- [5] P. C. Ashworth *et al.*, “Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 15, pp. 12444–12454, 2009.
- [6] H. J. Song and T. Nagatsuma, “Present and future of terahertz communications,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 256–263, 2011.
- [7] M. Nafari, G. R. Aizin, and J. M. Jornet, “Plasmonic HEMT Terahertz Transmitter based on the Dyakonov-Shur Instability : Performance Analysis and Impact of Nonideal Boundaries,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 10, no. 1, p. 1, 2018.
- [8] A. Taube *et al.*, “Ion implantation for isolation of AlGa_N/Ga_N HEMTs using C or Al,” *Phys. Status Solidi*, vol. 212, no. 5, pp. 1162–1169, 2015.
- [9] Y. Li *et al.*, “Improved planar device isolation in AlGa_N/Ga_N HEMTs on Si by ultra-heavy ¹³¹Xe⁺ implantation,” *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 214, no. 8, 2017.
- [10] X. G. He, D. G. Zhao, and D. S. Jiang, “Formation of two-dimensional electron gas at AlGa_N/Ga_N heterostructure and the derivation of its sheet density expression,” *Chinese Phys. B*, vol. 24, no. 6, pp. 1–6, 2015.
- [11] O. Ambacher *et al.*, “Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_N/Ga_N heterostructures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 1, pp. 334–344, 2000.
- [12] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, “Ga_N: Processing, defects, and devices,” *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 1, pp. 1–78, 1999.

- [13] V. Jakštas, I. Kašalynas, I. Šimkienė, V. Strazdienė, P. Prystawko, and M. Leszczynski, “SCHOTTKY DIODES AND HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS OF 2DEG AlGaN/GaN STRUCTURES ON SAPPHIRE SUBSTRATE,” *Lith. J. Phys.*, vol. 54, no. 4, pp. 227–232, 2014.
- [14] C. Jiang, T. Liu, C. Du, X. Huang, and M. Liu, “Piezotronic effect tuned AlGaN / GaN high electron mobility transistor,” 2017.
- [15] C. Y. Chien *et al.*, “Breaking Through the Multi-Mesa-Channel Width Limited of Normally Off GaN HEMTs Through Modulation of the Via-Hole-Length,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 12, 2017.
- [16] T. Mimura, “The early history of the high electron mobility transistor (HEMT),” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 780–782, 2002.
- [17] B. S. Kang, H. T. Wang, F. Ren, and S. J. Pearton, “Electrical detection of biomaterials using AlGaN/GaN high electron mobility transistors,” *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 3, 2008.
- [18] Y. Lu *et al.*, “High RF Performance AlGaN/GaN HEMT Fabricated by Recess-Arrayed Ohmic Contact Technology,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, no. 6, pp. 811–814, 2018.
- [19] Y. Zhang *et al.*, “Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface,” vol. 8, no. 1, pp. 153–170, 2018.
- [20] A. B. Piotrowska *et al.*, “Manufacturing microwave AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) on truly bulk semi-insulating GaN substrates,” *ECS Trans.*, vol. 75, no. 12, pp. 77–84, 2016.
- [21] K. Nomoto, M. Satoh, and T. Nakamura, “Reduction of on-resistance in ion-implanted GaN/AlGaN/GaN HEMTs with low gate leakage current,” *Electron. Commun. Japan*, vol. 93, no. 6, pp. 19–24, 2010.
- [22] D. A. Stocker, E. F. Schubert, and J. M. Redwing, “Crystallographic wet chemical etching of GaN,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 18, pp. 2654–2656, 1998.
- [23] T. Palacios *et al.*, “Wet etching of GaN grown by molecular beam epitaxy on Si(111),” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 996–1000, 2000.
- [24] H. Yu and T. Duan, *Gallium Nitride Power Devices*. 2017.

- [25] D. Visalli, M. Van Hove, P. Srivastava, D. Marcon, and K. Geens, “GaN-on-Si For High-Voltage Applications,” *ECS Trans.*, vol. 41, no. 8, pp. 101–112, 2011.
- [26] J. C. Zolper, A. G. Baca, and S. A. Chalmers, “Thermally stable oxygen implant isolation of p-type Al_{0.2}Ga_{0.8}As,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 20, pp. 2536–2538, 1993.
- [27] S. P. Gault, B., Moody, M.P., Cairney, J.A., and Ringer, *Ion Implantation in Diamond, Graphite and Related Materials*. 1992.
- [28] C. Leroy and P.-G. Rancoita, *Silicon Solid State Devices and Radiation Detection*. World Scientific Publishing, 2012.
- [29] Y. Wang *et al.*, “Defect Characterization of Multicycle Rapid Thermal Annealing Processed p-GaN for Vertical Power Devices,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. P70–P76, 2019.
- [30] M. Sumiya, K. Fukuda, H. Iwai, T. Yamaguchi, T. Onuma, and T. Honda, “Structural evaluation of ions-implanted GaN films by photothermal deflection spectroscopy,” *AIP Adv.*, vol. 8, no. 11, 2018.
- [31] K. Nordlund *et al.*, “Primary radiation damage: A review of current understanding and models,” *J. Nucl. Mater.*, 2018.
- [32] G. S. Was, *Fundamentals of Radiation Materials Science*. 2017.
- [33] S. ASHOK, J. CHEVALLIER, K. SUMINO, and E. WEBER, “COMPARISON OF MESA-ETCHED AND ION-IMPLANTED GEXSI1-X HETEROJUNCTION BIPOLAR-TRANSISTORS,” in *MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM PROCEEDINGS*, vol. 262, pp. 785–790.
- [34] “<http://www.circuitstoday.com/ion-implantation>. Žiūrēta 2019-05-20.” .
- [35] D. Fink, J. P. Bffirsack, H. Kranz, J. De Souza, M. Behar, and F. C. Zawislak, “Tilted angle ion implantation,” *Radiat. Eff.*, vol. 106, no. 3, pp. 165–181, 2007.
- [36] S. Tan, X. Deng, B. Zhang, and J. Zhang, “Thermal stability of F ion-implant isolated AlGa_N / Ga_N heterostructures,” vol. 61, no. 12, 2018.
- [37] C. F. Lo *et al.*, “Isolation blocking voltage of nitrogen ion-implanted AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor structure,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 26, 2010.
- [38] G. H. Kinchin and R. S. Pease, “The Displacement of Atoms in Solids by Radiation,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 18, no. 1, p. 1, 1955.

- [39] M. J. Norgett, M. T. Robinson, and I. M. Torrens, "A proposed method of calculating displacement dose rates," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 33, no. 1, pp. 50–54, 1975.
- [40] D. R. Lide *et al.*, "CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005," *CRC Press. Boca Raton, FL*, 2005.
- [41] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and M. D. Ziegler, *SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter*. 2008.
- [42] N. Sharma, S. K. Dhakad, C. Periasamy, and N. Chaturvedi, "Refined isolation techniques for GaN-based high electron mobility transistors," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 87, no. January, pp. 195–201, 2018.
- [43] R. E. Stoller, M. B. Toloczko, G. S. Was, A. G. Certain, S. Dwaraknath, and F. A. Garner, "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B On the use of SRIM for computing radiation damage exposure," *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B*, vol. 310, pp. 75–80, 2013.
- [44] D. K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization, Third Edition." John Wiley & Sons, Inc., 2006.

Justina Malakauskaitė

JONŲ IMPLANTACIJOS POVEIKIO IZOLIACINIŲ SRIČIŲ SUSIDARYMUI AlGa_N/Ga_N PUSLAIDININKINĖSE STRUKTŪROSE TYRIMAS

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas yra skaitinio modeliavimo būdu parinkti optimalias sąlygas jonų implantavimo eksperimentui, sukurti šiluminiam stresui atsparias izoliacines sritis didelio elektronų judrio tranzistorinėse (angl. *High electron mobility transistor – HEMT*) struktūrose, kurios bus naudojamos kietakūniuose terahercų emiteriuose bei detektoriuose. Darbo metu naudojantis modeliavimo programa SRIM ir jos papildiniu TRIM buvo sumodeliuoti vandenilio, anglies, aliuminio, silicio, galio bei titano implantuotų jonų erdviniai profiliai bei sukuriami defektai puslaidininkinėje AlGa_N/Ga_N heterostruktūroje, taip pat apsauginių fotorezistų ir metalų kaukių įtaka sukuriamiems defektams. Modeliuojant nustatyta, kad naudojant apsauginį 1,4 μm storio AZ111 (C₆H₈O) arba PMMA (C₆H₈O) fotorezistą, sukuriamų vakansijų kiekis yra beveik vienodas (~1,8*10⁹ vak. / (cm*jonų sk)), Braggo smailės vieta atitinkamai yra 120 nm ir 90 nm gylyje. Naudojant SIEMENS (C₅₁H₃₄O₉S₂) fotorezistą sukuriamas mažesnis vakansijų kiekis (7,74*10⁸ vak. / (cm*jonų sk)), Braggo smailė yra ties 100 nm. Apsauginės nikelio kaukės, kurių storis yra nuo 10 nm iki 100 nm, neturi įtakos sukuriamų defektų kiekiui (3,7*10⁹ vak. / (cm*jonų sk)), bet turi įtaką sukuriamų defektų gyliui. Esant storesniam Ni sluoksniui, defektai susidaro arčiau bandinio paviršiaus, iki 380 nm. Parenkant implantavimo dozę, nėra žymaus skirtumo, naudojama Ti/Al/Ni 30/90/20 nm ar Ni 140 nm storio apsauginė kaukė. Atlikus aliuminio jonų implantaciją eksperimentiškai patvirtinta, kad implantuojami aliuminio jonai, turintys 700 keV energiją, nepraeina pro fotorezistą, kurio storis yra ne mažesnis nei 3 μm bei nustatyta, kad implantuojamų aliuminio jonų 10¹³ cm⁻² dozės pakanka sudaryti didelės varžos (virš 10⁹ Ω) izoliacines sritis.

Justina Malakauskaitė

INVESTIGATION OF ION IMPLANTATION EFFECTS FOR ISOLATION ZONES IN AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES

SUMMARY

The aim of this work is by using SRIM software packages find optimal ion implantation conditions in order to make thermally stable isolation zones for high electron mobility transistors (HEMTs). In this work was modelled implantation of hydrogen, carbon, aluminum, silicon, gallium and titanium ions into AlGaN/GaN heterostructure. Here is shown differences between vacancy profiles, implanted ions range by using different ion dose, energy and protective masks from photoresist and metals. Using protective 1,4 μm thickness AZ111 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$) and PMMA ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$) photoresists, the amount of creating vacancies is almost the same ($\sim 1,8 \cdot 10^9$ vac. / ($\text{cm} \cdot \text{ion}$)), Bragg peak is at 120 nm and 90 nm depth. Using SIEMENS ($\text{C}_{51}\text{H}_{34}\text{O}_9\text{S}_2$) photoresist there is less created amount of vacancies ($7,74 \cdot 10^8$ vac. / ($\text{cm} \cdot \text{ion}$)), and Bragg peak is near 100 nm . After performed aluminum ion implantation into AlGaN/GaN heterostructure, it was investigated how the implantation dose and different protective masks affect the wanted isolation areas. The thickness of protective Ni mask doesn't affect the amount of created vacancies ($\sim 3,7 \cdot 10^9$ vac. / ($\text{cm} \cdot \text{ion}$)), but has influence to the vacancies formation depth. Using 10 nm thickness mask Bragg peak reaches 570 nm while using 100 nm of Ni, Bragg peak reaches 380 nm . Tuning the dose of implantation there is no significant difference do one use protective Ti/Al/Ni 30/90/20 nm layer or pure Ni 140 nm protective mask. The implantation of 700 keV aluminum ions showed that photoresist mask, thicker than 3 μm successfully protects target and the 10^{13} cm^{-2} aluminum dose is enough to create high resistivity (over $10^9 \Omega$) isolation areas.

Priedai

1 priedas – SRIM duomenys, Al į GaN

SRIM rezultatas, kai modeliuojamas aliuminio jonų įsiskverbimo gylis į GaN esant skirtingoms aliuminio energijoms:

```
=====
Calculation using SRIM-2006
SRIM version ---> SRIM-2008.04
Calc. date ---> May 01, 2019
=====
```

Disk File Name = SRIM Outputs\Aluminum in Ga- N

Ion = Aluminum [13] , Mass = 26.982 amu

Target Density = 6.5100E+00 g/cm3 = 9.3645E+22 atoms/cm3

===== Target Composition =====

Atom Name	Atom Numb	Atomic Percent	Mass Percent
Ga	31	050.00	083.27
N	7	050.00	016.73

=====

Bragg Correction = 0.00%

Stopping Units = MeV / (mg/cm2)

See bottom of Table for other Stopping units

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range	Longitudinal Straggling	Lateral Straggling
100.00 keV	4.554E-01	7.110E-01	835 A	434 A	321 A
110.00 keV	4.814E-01	6.878E-01	924 A	472 A	352 A
120.00 keV	5.063E-01	6.663E-01	1014 A	510 A	382 A
130.00 keV	5.303E-01	6.464E-01	1104 A	546 A	412 A
140.00 keV	5.536E-01	6.278E-01	1195 A	582 A	441 A
150.00 keV	5.762E-01	6.105E-01	1285 A	618 A	471 A
160.00 keV	5.983E-01	5.943E-01	1377 A	652 A	500 A
170.00 keV	6.199E-01	5.790E-01	1468 A	686 A	530 A
180.00 keV	6.411E-01	5.647E-01	1560 A	719 A	558 A
200.00 keV	6.825E-01	5.385E-01	1744 A	783 A	616 A
225.00 keV	7.325E-01	5.095E-01	1973 A	860 A	685 A

250.00 keV	7.810E-01	4.840E-01	2201 A	933 A	753 A
275.00 keV	8.283E-01	4.613E-01	2429 A	1002 A	819 A
300.00 keV	8.745E-01	4.411E-01	2654 A	1068 A	884 A
325.00 keV	9.195E-01	4.228E-01	2877 A	1131 A	946 A
350.00 keV	9.636E-01	4.062E-01	3098 A	1190 A	1006 A
375.00 keV	1.007E+00	3.911E-01	3317 A	1246 A	1064 A
400.00 keV	1.049E+00	3.773E-01	3533 A	1300 A	1121 A
450.00 keV	1.131E+00	3.528E-01	3957 A	1400 A	1228 A
500.00 keV	1.210E+00	3.317E-01	4372 A	1492 A	1329 A
550.00 keV	1.287E+00	3.134E-01	4776 A	1575 A	1424 A
600.00 keV	1.360E+00	2.972E-01	5170 A	1652 A	1514 A
650.00 keV	1.432E+00	2.829E-01	5554 A	1723 A	1598 A
700.00 keV	1.501E+00	2.701E-01	5930 A	1788 A	1677 A
800.00 keV	1.635E+00	2.481E-01	6655 A	1906 A	1824 A
900.00 keV	1.764E+00	2.298E-01	7348 A	2008 A	1956 A

 Multiply Stopping by for Stopping Units

6.5098E+01	eV / Angstrom
6.5098E+02	keV / micron
6.5098E+02	MeV / mm
1.0000E+00	keV / (ug/cm2)
1.0000E+00	MeV / (mg/cm2)
1.0000E+03	keV / (mg/cm2)
6.9515E+01	eV / (1E15 atoms/cm2)
3.0183E-01	L.S.S. reduced units

=====
 (C) 1984,1989,1992,1998,2008 by J.P. Biersack and J.F. Ziegler

2 priedas – SRIM duomenys, C į GaN. Fragmentas.

SRIM rezultatas, kai modeliuojamas anglies jonų įsiskverbimo gylis į GaN esant skirtingoms anglies energijoms:

=====
 Calculation using SRIM-2006
 SRIM version ---> SRIM-2008.04
 Calc. date ---> May 01, 2019
 =====

Disk File Name = SRIM Outputs\Carbon in Ga- N

Ion = Carbon [6] , Mass = 12 amu

Target Density = 6.5100E+00 g/cm3 = 9.3645E+22 atoms/cm3

```

===== Target Composition =====
Atom Atom Atomic Mass
Name Numb Percent Percent
---- ---- -
Ga 31 050.00 083.27
N 7 050.00 016.73
Ion dE/dx dE/dx Projected Longitudinal Lateral
Energy Elec. Nuclear Range Stragglng Stragglng
-----
200.00 keV 8.624E-01 8.395E-02 2999 A 1053 A 984 A
225.00 keV 9.134E-01 7.805E-02 3328 A 1114 A 1056 A
250.00 keV 9.620E-01 7.304E-02 3648 A 1168 A 1124 A
275.00 keV 1.008E+00 6.871E-02 3958 A 1217 A 1186 A
300.00 keV 1.053E+00 6.493E-02 4260 A 1262 A 1244 A
400.00 keV 1.218E+00 5.359E-02 5395 A 1408 A 1444 A
450.00 keV 1.294E+00 4.944E-02 5924 A 1467 A 1527 A
500.00 keV 1.367E+00 4.595E-02 6431 A 1518 A 1603 A
520.00 keV 1.395E+00 4.470E-02 6628 A 1536 A 1631 A
550.00 keV 1.437E+00 4.297E-02 6918 A 1563 A 1672 A
600.00 keV 1.505E+00 4.040E-02 7387 A 1603 A 1735 A
-----

```

CTLM ir TLM matavimų duomenų lentelės

9 lentelė. U40 bandinio CTLM ir TLM matavimų rezultatai.

U40	R_c, Ω		$R_{c \text{ norm.}}, \Omega\text{mm}$		$R_{sh}, \Omega/\square$	
	CTLM	TLM	CTLM	TLM	CTLM	TLM
Prieš Al ⁺ implantaciją	9.98	N/A	2.51	N/A	405	N/A
Po Al ⁺ implantacijos	9.39	7.77	2.36	1.94	422	385
Po Al ⁺ RTA 400°C	9.88	6.7	2.48	1.68	425	405
Po Al ⁺ RTA 600°C	10.95	9.54	2.75	2.38	498	358
Po Al ⁺ RTA 700°C	12.45	6.74	3.13	1.68	395	428
Po Al ⁺ RTA 800°C	21.24	10.22	5.34	2.56	385	375

10 lentelė. U41 bandinio CTLM ir TLM matavimų rezultatai.

U41	R_c, Ω		$R_{c \text{ norm.}}, \Omega\text{mm}$		$R_{sh}, \Omega/\square$	
	CTLM	TLM	CTLM	TLM	CTLM	TLM
Prieš Al ⁺ implantaciją	9.88	N/A	2.48	N/A	452	N/A
Po Al ⁺ implantacijos	Netiesinė priklausomybė					
Po Al ⁺ RTA 400°C	Netiesinė priklausomybė					
Po Al ⁺ RTA 600°C	0.93	-3.52	0.23	-0.88	1920	2475
Po Al ⁺ RTA 700°C	-4.72	4.27	-1.19	1.07	1516	1318
Po Al ⁺ RTA 800°C	6.33	19.21	1.59	4.8	1345	818

11 lentelė. U43 bandinio CTLM ir TLM matavimų rezultatai.

U43	R_c, Ω		$R_{c \text{ norm.}}, \Omega\text{mm}$		$R_{sh}, \Omega/\square$	
	CTLM	TLM	CTLM	TLM	CTLM	TLM
Prieš Al ⁺ implantaciją	14.67	N/A	3.69	N/A	364	N/A
Po Al ⁺ implantacijos	5.06	7.4	1.27	1.85	535	392
Po Al ⁺ RTA 400°C	5.32	8.51	1.34	2.13	576	397
Po Al ⁺ RTA 600°C	4.47	7.61	1.12	1.9	611	402
Po Al ⁺ RTA 700°C	8.79	10.17	2.21	2.54	485	400
Po Al ⁺ RTA 800°C	16.7	12.96	4.2	3.24	483	398

12 lentelė. U43 bandinio CTLM ir TLM matavimų rezultatai.

U46	R_c, Ω		$R_{c \text{ norm.}}, \Omega\text{mm}$		$R_{sh}, \Omega/\square$	
	CTLM	TLM	CTLM	TLM	CTLM	TLM
Prieš Al ⁺ implantaciją	5.3	N/A	1.33	N/A	513	N/A
Po Al ⁺ implantacijos	3.65	9.83	0.92	2.46	535	329
Po Al ⁺ RTA 400°C	3.89	9.49	0.98	2.37	520	342
Po Al ⁺ RTA 600°C	6.68	6.99	1.68	1.75	495	385
Po Al ⁺ RTA 700°C	7.21	8.15	1.81	2.04	495	370
Po Al ⁺ RTA 800°C	10.56	9.7	2.65	2.43	518	393

13 lentelė. U40 bandinio izoliacijos matavimų rezultatai.

U40										
U = 40 V; Cmpl = 0.01mA; GΩ					U = 30 V; Cmpl = 1 mA; kΩ		U = 0.5 V; Cmpl = 20mA; kΩ			
	Po Al ⁺ implantacijos		Po Al ⁺ , RTA 400°C		Po Al ⁺ , RTA 600°C		Po Al ⁺ , RTA 700°C		Po Al ⁺ , RTA 800°C	
μm	U40 apš.	U40 tamsa	U40 apš.	U40 tamsa	U40 apš.	U40 tamsa	U40 apš.	U40 tamsa	U40 apš.	U40 tamsa
25	37	inf.	0.175	inf.	64.4	197	1,8	3,7	403	497
35	43	inf.	0.195	inf.	67.4	200	3,2	5,7	768	915

14 lentelė. U41 bandinio izoliacijos matavimų rezultatai.

U41										
U = 40 V; Cmpl = 0.01mA; GΩ					U = 30 V; Cmpl = 1 mA; kΩ		U = 0.5 V; Cmpl = 20mA kΩ			
	Po Al ⁺ implantacijos		Po Al ⁺ , RTA 400°C		Po Al ⁺ , RTA 600°C		Po Al ⁺ , RTA 700°C		Po Al ⁺ , RTA 800°C	
μm	U41 apš.	U41 tamsa	U41 apš.	U41 tamsa	U41 apš.	U41 tamsa	U41 apš.	U41 tamsa	U41 apš.	U41 tamsa
25	25	20	0.071	2	33.2	90	1,1	2,1	304.3	355
35	28	inf.	0.074	5	33.5	92	1,4	2,5	407	467

15 lentelė. U43 bandinio izoliacijos matavimų rezultatai.

U43										
U = 40 V; Cmpl = 0.01mA; GΩ					U = 30 V; Cmpl = 1 mA; GΩ		U=40V; Cmpl=10mA, GΩ		U = 15 V; Cmpl = 20 mA; MΩ	
	Po Al ⁺ implantacijos		Po Al ⁺ , RTA 400°C		Po Al ⁺ , RTA 600°C		Po Al ⁺ , RTA 700°C		Po Al ⁺ , RTA 800°C	
μm	U43 apš.	U43 tamsa	U43 apš.	U43 tamsa	U43 apš.	U43 tamsa	U43 apš.	U43 tamsa	U43 apš.	U43 tamsa
25	37	inf.	28	inf.	27	inf.	20	inf.	109	inf.
35	40	inf.	30	inf.	30	inf.	21	inf.	122	inf.

16 lentelė. U46 bandinio izoliacijos matavimų rezultatai.

U46										
U = 40 V; Cmpl = 0.01mA; GΩ			U = 40 V; Cmpl = 0.001mA; GΩ			U = 40 V; Cmpl = 0.001mA; GΩ		U = 15 V; Cmpl = 20 mA; MΩ		
	Po Al ⁺ implantacijos		Po Al ⁺ , RTA 400°C		Po Al ⁺ , RTA 600°C		Po Al ⁺ , RTA 700°C		Po Al ⁺ , RTA 800°C	
μm	U46 apš.	U46 tamsa	U46 apš.	U46 tamsa	U46 apš	U46 tamsa	U46 apš.	U46 tamsa	U46 apš.	U46 tamsa
25	19	23	inf.	inf.	38	inf.	11.4	35	102	inf.
35	35	inf.	inf.	inf.	40	inf.	11.7	inf.	122	inf.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju FTMC Terahercinės fotonikos laboratorijos vadovui dr. Irmantui Kašalynui už suteiktą galimybę atlikti magistro darbą FTMC bei šio darbo vadovavimą, patarimus ir suteiktą kryptį. Taip pat dėkoju prof., habil. dr. Gintarui Valušiui bei dr. Renatai Butkutei už vertingas paskaitas ir įdomias diskusijas. Dėkoju dr. Vitalij Kovalevskij už pagalbą atliekant jonų implantavimo eksperimentus. Už suteiktas vertingas TRIM modeliavimo konsultacijas dėkoju dokt. Danieliui Lingiui. Už metalo kontaktų garinimą dėkoju dr. Andriui Bičiūnui. Ypatingai dėkoju Terahercinės fotonikos laboratorijos kolegai dr. Vytautui Jakštui už pagalbą atliekant fotolitografijos procesus, Justinui Jorudui už pagalbą atliekant matavimus bei kitiems kolegoms už nuolatinį palaikymą, motyvaciją ir šiltą priėmimą į kolektyvą. Ačiū.