Vilniaus universitetas

Fizikos fakultetas

Puslaidininkių fizikos katedra

Marius Pikčiūnas

InN/GaN heterosandūros formavimas ir tyrimas

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

Fizikos studijų programa

Studentas	Marius Pikčiūnas
Darbo vadovas	dr. Ignas Reklaitis
Recenzentas	doc. Renata Butkutė
Katedros vedėjas	prof., habil. dr. Gintautas Tamulaitis

Vilnius 2017

Turinys

Turinys 1

Įvadas 3

1 Teorinis įvadas ir literatūros apžvalga 5

1.1 Puslaidininkiniai detektoriai 5

1.1.1 Fotoefektas 6

1.1.2 Galimos detektorių struktūros 8

1.2 Plazminis ėsdinimas 11

1.3 Kaitinimas 13

1.4 Skenuojanti elektroninė mikroskopija 14

1.4.1 SEM veikimo principas 15

1.4.2 SEM registruojami signalai 18

1.5 Linijinis transmisijos modelis 22

1.6 Foto atsakas 23

2 Darbo eiga 24

2.1 Bandinio formavimas 24

2.2 Foto-elektriniai matavimai 25

3 Rezultatų aptarimas 27

3.1 GaN/InN heterosandūros energijos lygmenys 27

3.2 Charakterizavimas skenuojančiu elektronų mikroskopu 27

3.3 Kontaktų varžos tyrimas 29

3.4 Foto atsako tyrimas 32

Išvados 35

Summary 36

4 Bibliografija 37

Įvadas

Elektronikos srityje yra nepaprastai didelis susidomėjimas indžio nitridu (InN), dėl puikių elektrinių savybių, kietos struktūros ir galimybės taikyti didelio greičio elektronikoje [1], bei saulės elementuose [2]. Tai III-V grupės puslaidininkis, turintis siaurą ir tiesų draustinės energijos juostos tarpą, mažą elektronų efektinę masę. Turėdamas siaurą draustinės energijos juostos tarpą ~0,7 eV [3], InN panaudojimas galėtų išplėsti III grupės nitridų optoelektronikos prietaisų bangos ilgių ruožą iki artimosios infraraudonosios srities. Nors InN elektronų pernašos charakteristikos yra puikios, tačiau p-laidumo tipo InN iš esmės neįmano realizuoti, tai itin apsunkina šios medžiagos panaudojimą optoelektroniniams taikymams [4]. Iš III-V grupės puslaidininkių šeimos plačiai tiriamas ir taikomas šviesos dioduose yra GaN, kurio draustinės energijos juostos tarpas yra artimoje ultravioletinėje srityje, jos dydis 3,38 eV [5]. GaN turi labai tvirtą kristalinę gardelę ir yra atsparus didelės energijos spinduliuotei. Taip pat turi tinkamas savybes kietos radiacijos detektoriui. GaN elektronų judrumas gali būti palyginamas su Si, tačiau draustinės juostos plotis yra tris kartus didesnis, tai atveria galimybes būti panaudotam didelės energijos matavimams, o didelis temperatūrinis stabilumas padaro jį tinkamą panaudoti matavimams karštose aplinkose [6]. GaN ir InN savybių perspektyva elektronikos taikymuose skatina aktyvų šių medžiagų tyrinėjimą ir auginimo tobulinimą.

Mano darbo tikslas buvo suformuoti bandinį tinkamą optoelektroniniams tyrimams, nustatyti ar suformuota hetero sandūra veikia, kaip p-n diodas. Tam buvo pasitelktas skenuojantis elektronų mikroskopas (SEM), Rentgeno energijos dispersijos spektroskopija (angl. *Energy Dispersive X-ray Spectrometry*, EDX), elektronų pluoštelio indukuotos srovės matavimai (angl. *Electron Beam Induced Current*, EBIC). Kontaktų savybės charakterizuotos linijiniu transmisijos modeliu (angl. *Transmission Line Model,* TML). Galiausiai buvo išmatuota bandinio kvantinio efektyvumo (Q.E.) charakteristikos ir jos palygintos su komerciniu silicio fotodiodo QE.

Mano tiriamas bandinys buvo užaugintas metaloorganinio cheminio nusodinimo iš garų fazės (angl. *Metalorganic Chemical Vapor Deposition,* MOCVD) reaktoriumi, epitaksiškai ant p-laidumo tipo GaN užauginant n-laidumo tipo InN. Bandinys buvo apdorotas sausuoju ėsdinimu reaktyviais jonais (angl. *Reactive-ion etching,* RIE), ant jo buvo suformuoti dviejų rūšių kontaktai, kurie galiausiai buvo iškaitinti.

1 Teorinis įvadas ir literatūros apžvalga

1.1 Puslaidininkiniai detektoriai

Puslaidininkiniai detektoriai – prietaisai, pagaminti iš puslaidininkio, kurie geba aptikti elektromagnetinius spindulius, bei dalelių srautą. Jų panaudojimas yra labai platus moksle ir kasdieniniame gyvenime. Pagrindinis visų radiacijos detektorių principas yra dalelių ar fotonų prarandamos energijos puslaidininkinėje medžiagoje panaudojimas sukurti elektronų-skylių poras, kurių kiekis yra proporcingas prarastai energijai. Sugeneruoti nepusiausvyrieji krūvininkai atskiriami ir surenkami elektroduose naudojant elektrinį lauką puslaidininkyje.

Energijos netekimas medžiagoje stipriai priklauso nuo radiacijos tipo ir jos energijos. Paprastai yra registruojami trijų rūšių radiacijos tipai:

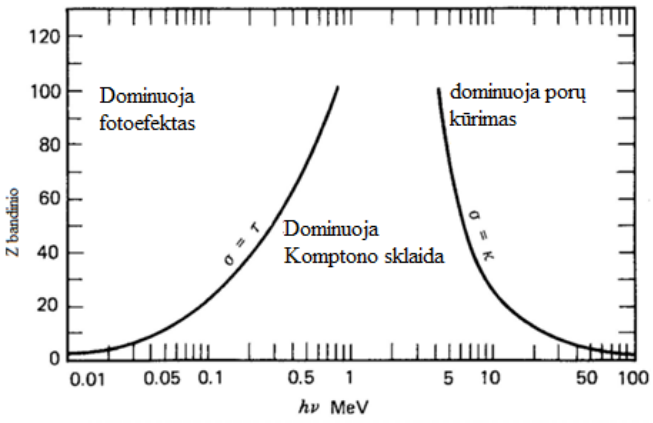
- Krūvininkai (α dalelės, elektronai)
- Fotonai
- Neutronai

Sunkūs krūvininkai ir greiti elektronai dėl krūvio nuolat sąveikauja Kulono jėga su puslaidininkyje esančiais elektronais. Neturinčios krūvio dalelės (fotonai ir neutronai) nesąveikauja Kulono jėga, todėl jie turi tiesiogiai susidurti su medžiagoje esančiais elektronais arba branduoliais. Šios sąveikos skirstomos į:

- Fotoefektą
- Komptono sklaidą
- Porų kūrimą

Šių procesų veikimo ribos pavaizduotos 1 paveiksle, kuriame galima matyti, kad tik didelės energijos elektromagnetinės spinduliuotės ruože pradeda veikti Komptono sklaida. Daugumai medžiagų fotoefektas dominuoja iki 20 keV, tokios energijos yra gerokai didesnės nei

ultravioletinės bangos. Dėl to puslaidininkiniams optiniams detektoriams fotoefektas yra svarbiausia sąveikos rūšis.



1 pav. Medžiagos atominio skaičiaus priklausomybė nuo spinduliuojančios energijos [7].

1.1.1 Fotoefektas

Fotoefektas vyksta, kai fotonas sąveikauja su medžiagos atomu ir fotono energija yra pakankamai didelė, kad sužadintų atomo apvalkalinį elektroną ir jis ištrūktų iš jo orbitalės. Šis ištrūkęs elektronas vadinamas fotoelektronu, ištrūkusio elektrono energija apibrėžiama formule:

$$E_{\text{fotoelektrono}} = E_{\gamma} - E_{\text{g}} \tag{1}$$

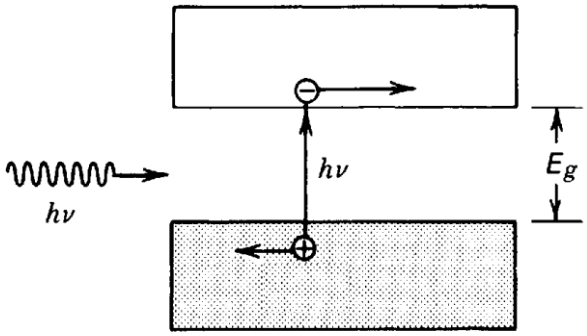
Kur E_{γ} – kritusio fotono energija, E_g – ryšio energija. Išspjautas elektronas praranda energiją sklaidomas medžiagoje dviem galimais procesais. Pirmas procesas yra elektrono-fonono sklaida, kai elektronas sklaidomas atominės gardelės jonų. Antras procesas – kai elektronas smogia į atomo valentinį elektroną, jį sužadindamas į aukštesnę orbitalę, taip sukuriant elektrono-skylės porą. Fotoelektrono susidūrimo tikimybė didėja augant absorbuojančios medžiagos atominiam skaičiui (Z).

$$\tau \sim \text{konstanta} \cdot \text{Z}^{\text{n}}/\text{E}_{\gamma}^{3.5} \tag{2}$$

Kur 4<n<5, priklausomai nuo fotono energijos [7].

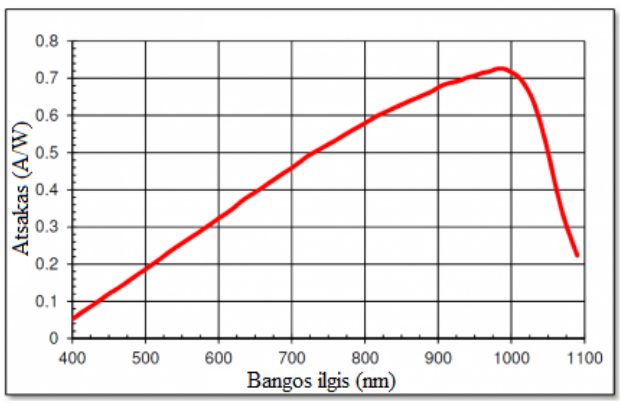
Dauguma šiuolaikinių puslaidininkinių detektorių veikia vidinio fotoefekto principu, kai fotonų sužadinti krūvininkai lieka bandinyje. Fotolaidumas svarbiausias parametras šiam

procesui. Detektoriai remiasi šviesos sukeltu elektrinio laidumo padidėjimu, kurį patiria daugumą puslaidininkių. Fotono sugertis puslaidininkio viduje generuoja laisvą elektroną sužadintą iš valentinės į laidumo juostą, kai tuo tarpu skylė generuojama valentinėje juostoje (žr. 2 pav.). Elektrinis laukas medžiagoje, elektronus ir skyles perneša priešingomis kryptimis elektrinėje grandinėje [8].



2 pav. Elektrono-skylės fotogeneracija puslaidininkyje [8].

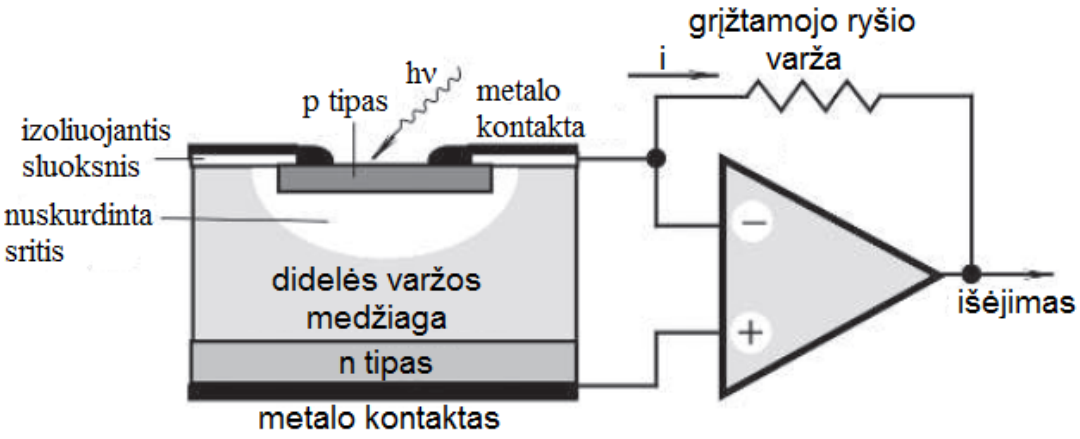
Energijos draustinis tarpas veikia kaip slenkstis, žemiau šio slenksčio medžiaga nėra optiškai jautri. Tačiau šis slenkstis nėra staigus. Vykstant fotonų sužadinimui galioja momento tvermės dėsnis. Elektronų ir skylių tankis bei momentas yra didesni valentinės ir laidumo juostos viduryje ir mažėja iki nulio viršutinėse ir apatinėse juostos dalyse. Todėl tikimybė sužadintam valentinės juostos elektronui rasti laidumo juostos vietą su tokiu momentu yra didžiausia juostos viduryje ir mažėja kraštuose. Silicio tipinis spektro atsakas pavaizduotas 3 pav. Šviesos atsako spektro vaizdas gali būti stumdomas ir keičiama forma įterpiant kitas medžiagas [9].



3 pav. Foto diodo spektro atsakas [10].

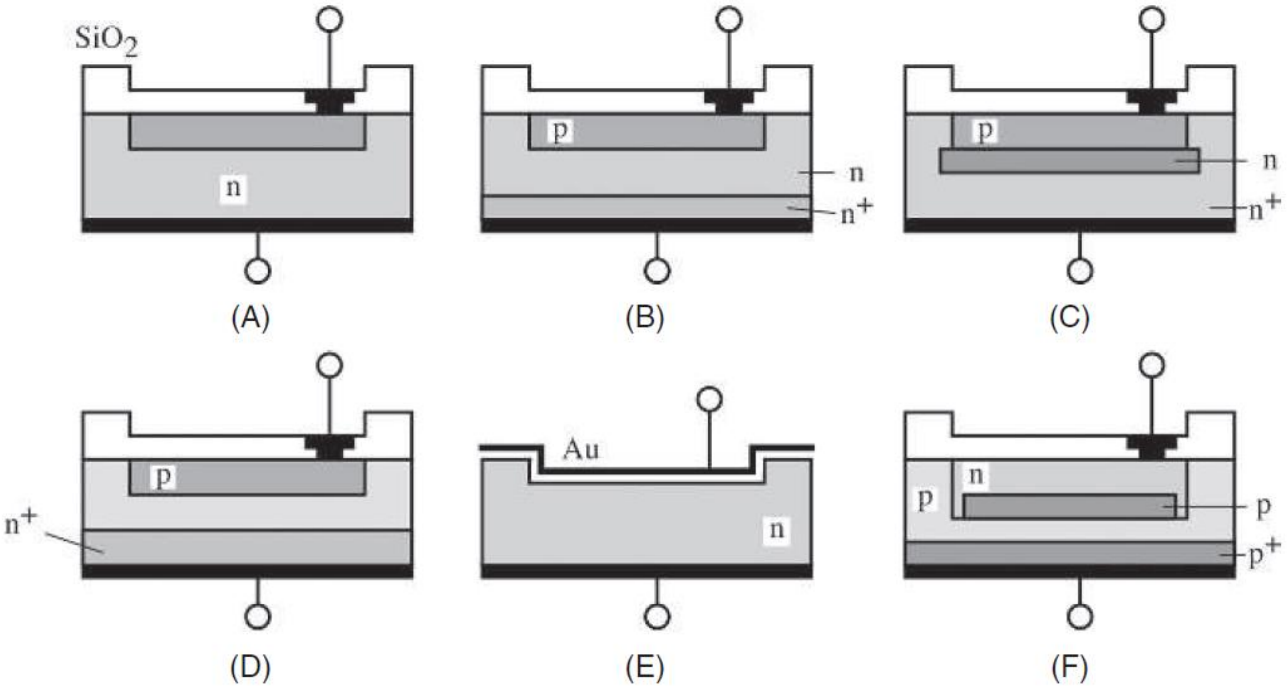
1.1.2 Galimos detektorių struktūros

Puslaidininkinį detektorių galima pagaminti iš įvairių medžiagų ir įvairiais būdais, šiame skyriuje apžvelkime galimas foto detektorių struktūras.



4 pav. PIN diodo struktūra prijungta prie srovės-įtampos keitiklio [9].

Išsamiau struktūrinės diodo dalys pavaizduotos 4 pav., kuriomis remiantis galime atvaizduoti visas šešias foto diodų rūšis (žr. 5 pav.), kurios skirstomos pagal funkcijas ir konstrukciją.



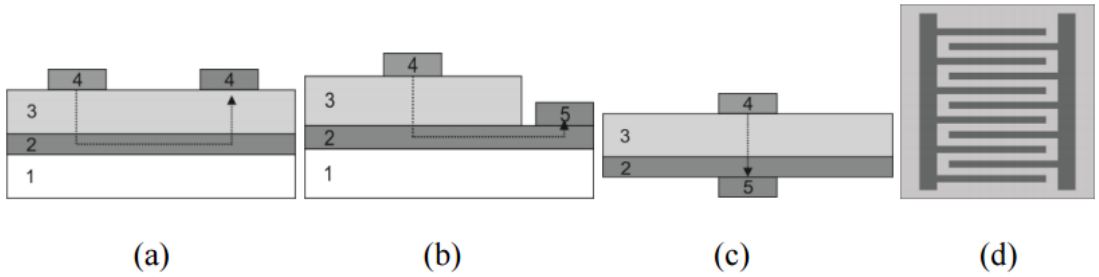
5 pav. Supaprastinti foto diodų tipai [9].

Foto diodų klasifikacija:

1. PN foto diodas gali būti padengtas SiO_2 paviršiuje (žr. 5 pav. A), tai sumažina parazitines sroves. Norint pagaminti didelio greičio diodo versiją nuskurdinta sritis praplečiama, tai sumažina sandūros talpą (žr. 5 pav. B). Siekiant pagaminti diodą, kuris yra jautresnis ultravioletinei šviesai, p sluoksnis gali būti pagaminamas ypatingai plonas, tai pnn^+ diodas (žr. 5 pav. C). Kuris mažiau jautrus infraraudonoje srityje ir jautresnis ultravioletinėje srityje. Taip yra dėl storo n^+ silicio sluoksnio mažos varžos, kas priartina nn^+ ribą arčiau nuskurdintos srities.
2. PIN foto diodas (žr. 5 pav. D) yra pagerinta (B) diodo versija, panaudojant papildomą didelės varžos sluoksnį tarp p ir n sluoksnių, taip pagerinant atsako laiką. Šis prietaisas dar geriau veikia neigiamoje srityje, bei pasižymi mažesne tamsine srove ir didesne pramušimo įtampa.
3. Schottky tipo foto diodas (žr. 5 pav. E) turi ploną aukso ar kito metalo sluoksnį ant n sluoksnio, suformuotį Schottky tipo metalas-puslaidininkis sandūrą. Dėl mažo atstumo tarp viršutinio sluoksnio ir sandūros šio tipo detektoriaus jautrumas UV srityje yra itin didelis.
4. Griūtinis foto diodas (žr. 5 pav. F) taip pavadintas, nes šiam detektoriui užregistravus net pavienį mažos energijos kvatą, dėl stipraus elektrinio lauko elektronai ir skylės judėdami link elektrodų generuos antrinius krūvininkus. Šie bus vėl greitinami, taip susidarys nepaprastai greitas griūtinis srovės padidėjimas. Tokie diodai gerai veikia kaip stiprintuvai, naudingi aptinkant mažus šviesos intensyvumus, geriausia veikia pavienių fotonų skaičiavimui [9].

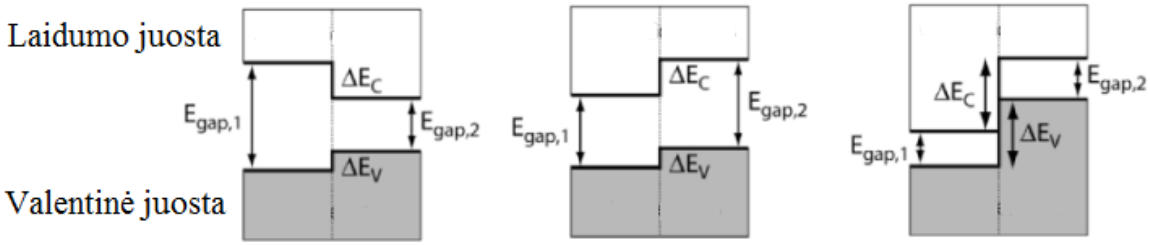
GaN technologijoje yra itin sunku pagaminti ominius p-laidumo tipo kontaktus, todėl sažniausiai naudojamos Schottky tipo diodinių detektorių struktūros, kurių geometrijos variantai pavaizduoti 6 pav. Dvigubai Schottky kontaktų struktūrai, elektrinis laukas yra stačias bandiniui

ir sujungia abu Schottky kontaktus per didelės koncentracijos GaN sluoksnio krūvininkus [11]. *Mesa* struktūrai ėsdinimas naudojamas, kad pasiektų apatinį sluoksnį ir suformuotų vieną ominį kontaktą. Sumuštinio (angl. *sandwich*) struktūra gali būti suformuota ant neturinčio izoliuojančio padėklo GaN bandinio [12]. Plokščioje (angl. *coplanar*) struktūroje abu kontaktai prijungiami prie viršutinio paviršiaus [13].



6 pav. Galimos detektoriaus struktūros Schottky diodui [13]. (a) Dvigubas Schottky; (b) *Mesa*; (c) Sumuštinio (angl. *sandwich*); (d) Plokštuminis (angl.*coplanar*); 1-pagrindas, 2- Didelė krūvininkų koncentracija GaN, 3-Maža krūvininkų koncentracija GaN, 4-Schottky kontaktas, 5-Ominis kontaktas.

Negalint suformuoti p-laidumo tipo InN sluoksnį, galima mėginti realizuoti heterosandūrą panaudojant kitą puslaidininkinę medžiagą su p-laidumo tipu. Taip vadinama dviejų puslaidininkinių kristalų su skirtingomis draustinėmis juostomis struktūra, pagrindinis jos skirtumas nuo homosandūrinė struktūra, kad skirtingo laidumo puslaidininkių draustinės juosto nėra vienodos. Heterosandūra naudinga nes leidžia medžiagoms skirtingose pusėse būti optimizuotomis tam tikram tikslui. Pavyzdžiui, vienas iš puslaidininkių gali būti naudojamas skleisti šviesą, o kitas gali būti naudojamas kaip viršutinis kontaktas ir/arba būti pasirinktas pralaidžiu spinduliuojamai šviesai, bei geram laidumui. Yra trys galimi išsidėstymai tiesiatarpes energijos juostas turintiems puslaidininkiams heterosandūroje, jie pavaizduoti 7 pav. [14].



7 pav. Galimi heterosandūros laidumo ir valentinės juostos išsidėstymo tipai [14].

Energijos lygmenis ir diodo savybes formuoja sandūroje esančių medžiagų specifikacijos, aptarkime kai kuriuos puslaidininkius. InN draustinės juostos tarpas ~0,7 eV, GaN draustinės juostos tarpas 3,38 eV. Teoriškai laidumo juostos skirtumas (ΔE_C) tarp InN ir GaN buvo suskaičiuotas 2,3 eV [15]. Praktiškai matuojant aukštos skyros rentgeno spindulių foto emisijos spektroskopu kambario temperatūroje gauta 2,22 eV [16]. Nesutapimai gali būti dėl defektų, bei organinės paviršiaus taršos.

1 lentelė, kai kurių puslaidininkių savybės [17].

Savybės	Si	GaN	InN	Deimantas	Ge	GaAs
Z	14	31/7	49/7	6	32	31/33
Draustinės juostos plotis, E_g (eV)	1,12	3,39	0,7	5,5	0,66	1,42
Tankis (g/cm^3)	2,3	6,15	6,81	3,5	5,32	5,32
$\mu_e(\frac{cm^2}{Vs})$	1450	440	3200	1800-2200	3900	9200
$\mu_h(\frac{cm^2}{Vs})$	450	30	220	1200-1600	1800	320

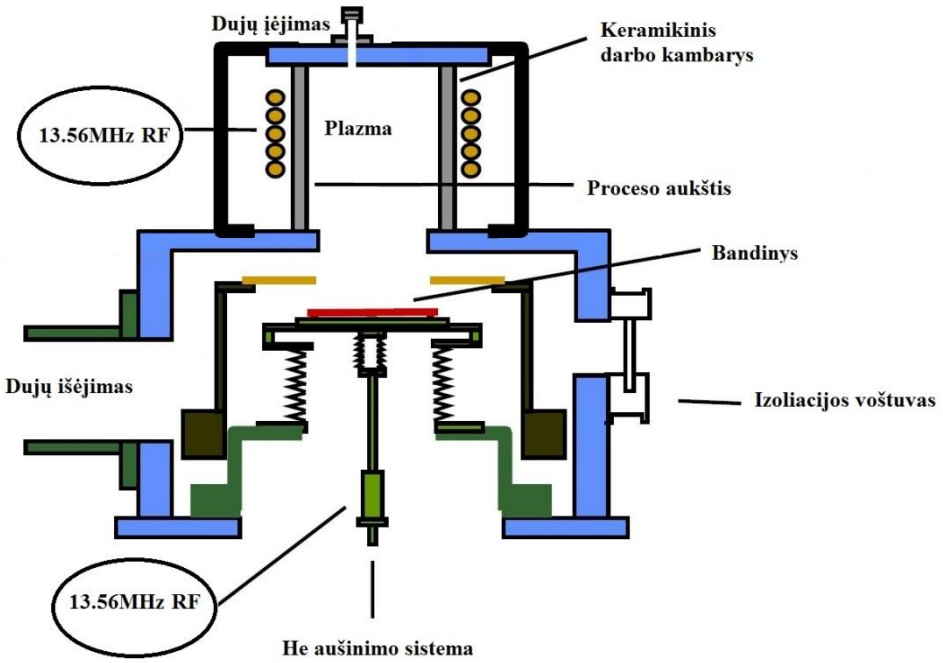
1.2 Plazminis ėsdinimas

Plazminio ėsdinimo metu bandinio paviršius veikiamas kryptingu fiziškai ir/ar chemiškai aktyvių jonų srautu. Plazma gaunama jonizuojant dujų atomus arba molekules. Keli iš plazmos gavimo būdų: radijo dažnio bangų kaitinimas, lazerio apšvitinimas, dujų kaitinimas. Ėsdinimo procesams dažniausiai naudojama elektriniu būdu generuojama plazma. Plazmos generatorius, galima išskirti į dvi grupes, pagal plazmos sudarymo šaltinį į „nuolatinės srovės“ (angl. *direct current,* DC) ir „radijo dažnio“ (angl. *radio frequency,* RF), kurio dažnis siekia 13,56 MHz.

Aplinkoje visuomet būna atsitiktinių laisvų elektronų, pavyzdžiui, dėl kosminio spinduliavimo, šiluminio sužadinimo ar kitų priežasčių. Kai elektrinis laukas veikia dujas, šie

atsitiktiniai elektronai įgauna energijos ir judėdami atsitrenkia į neutralius dujų atomus arba molekules. Jeigu elektrono energija yra pakankamai didelė, jis gali jonizuoti dujas išmušdamas papildomų elektronų. Vykstant tokiai grandininei reakcijai susiformuoja dujų plazma. Antrinis elektronų papildymas vyksta bandinio medžiagos paviršiuje. Elektronai yra prarandami šiems susidūrus su prietaiso sienele arba prisijungus prie darbinių dujų molekulių. Kuomet elektronų praradimas lygus jų generavimui, nusistovi stabili plazmos būsena. Tai išpildoma suderinant elektrinio lauko dažnį ir/ar parinkus dujų slėgį [18].

DC plazmos generatorius yra pigesnis, nes nuolatinės srovės šaltinį paprasčiau pagaminti nei RF. DC atveju bandinys turi būti laidus elektros srovei, todėl nėra tinkamas visoms medžiagoms. RF plazmos generatorius buvo sukurtas ėsdinti dielektrines medžiagas, tačiau gali ėsdinti ir metalus, tai jo pagrindinis pranašumas. Įprastai naudojamas RF dažnis yra 13.56 MHz, tokiame aukštame dažnyje jonai ir elektronai dėl savo masių skirtumo juda skirtingais greičiais. Centriniam regione plazma yra neutrali, arčiau prie bandinio paviršiaus tai pradeda stipriai kisti. Taip atsitinka, nes elektronai yra daug lengvesni už jonus ir jie greičiau ištrūksta iš plazmos. Taip elektronai atsiskyrę nuo plazmos ir priartėję prie bandinio sukuria neigiamą krūvį, kuris traukia teigiamus jonus. Tokiu būdu ant nelaidaus paviršiaus susidaro neigiama įtampa. Nors šis būdas yra daug brangesnis už DC metodą, tačiau tik RF būdu galima sausai ėsdinti nelaidžias medžiagas [19].



8 pav. Principinė sausojo ėsdinimo aparato schema.

Plazma, kuri yra chemiškai agresyvi, pasitarnauja selektyviam medžiagos ėsdinimui kaukės atžvilgiu, tai labai pravartu puslaidininkių gamyboje. Susiformavę reakcijų produktai turėtų būti lengvai garuojantys arba pašalinami, vykstant jonų bombardavimui. Šios liekanos išsiurbiamos vakuumine sistema.

1.3 Kaitinimas

Greitasis šiluminis atkaitinimas (angl. *Rapid Thermal Annealing,* RTA) yra svarbi gamybos technologija pažangioms integruotoms grandinėms, su plačia taikymo sritimi, kaip metalų silikatų ir nitridų formavimas, jonų implantavimo defektų atkaitinimas ir priemaišų aktyvavimas, dielektrikų formavimas [20]. GaN technologijoje RTA įprastai naudojamas p tipo legiruojančiojo magnio aktyvacijai taip padidinant sluoksnio laidumą [21]. Dėl to pagerėja elektronų judris ir bandinio elektrinės charakteristikos [22], sumažėja kontaktų Schottky barjero aukštis ir aukštose temperatūrose, kai disocijuoja GaN (980°C), susiformuoja tuneliniai kontaktai [23]. Taip pat greitasis šiluminis atkaitinimas sumažina kristalinės gardėlės defektus [24], kaitinant GaN išlaisvinami vidiniuose sluoksniuose likę įtempimai, pagerėja struktūrinė kokybė [25].

Formuojant GaN Ni/Au kontaktus yra galimybė kaitinti ir suformuoti NiO paviršių. 10 min kaitinamas deguonies:azoto atmosferoje 1:4 santykiu. Ni difunduoja per Au į paviršių ir oksiduodamasis suformuoja NiO sluoksnį, eksperimentiškai parodyta, kad toks trijų medžiagų išsidėstymas suformuoja gerą ominį kontaktą ant p tipo GaN sluoksnio [26].

1.4 Skenuojanti elektroninė mikroskopija

Skenuojančio elektronų mikroskopo (SEM) skiriamoji geba gali siekti mažiau nei vieną nanometrą, tai yra nepasiekiama naudojant optinį mikroskopą. Maksimalus modernaus optinio mikroskopo pasiekiamas didinimas yra iki 1000x. Jį riboja ne tik lęšių kokybė, bet ir šviesos bangos ilgis. Yra įprasta regimąjį šviesos spektrą apibrėžti nuo 380 nm iki 780 nm [27]. Teoriškai rezoliucija aprašoma Reilėjaus kriterijumi. Kontrastas tarp maksimumo ir minimumo intensyvumo turi būti bent 26 % mažesnis nei maksimumas.

$$r = \frac{1.22\lambda}{2n\ \sin\theta} \tag{3}$$

Čia r – mažiausias atstumas tarp dviejų atpažįstamų taškų, λ – bangos ilgis, n – terpės atspindžio koeficientas, θ – kampas, kuriuo signalas pasiekia detektorių. Kadangi elektrono bangos ilgis yra labai mažas ir apibrėžiamas de Broilio bangos ilgiu, dažniausiai skiriamąją gebą riboja ne jų bangos ilgis, o mikroskopo lęšių kokybė. Nepaisant to, SEM skiriamoji geba yra gerokai didesnė nei optinio mikroskopo ir matavime galima išskirti du itin artimus taškus [28]. 9 pav. vaizduoja, kaip artėjant dviem taškams dėl skiriamosios gebos ribojimo tampa nebeįmanoma jų išskirti [29].

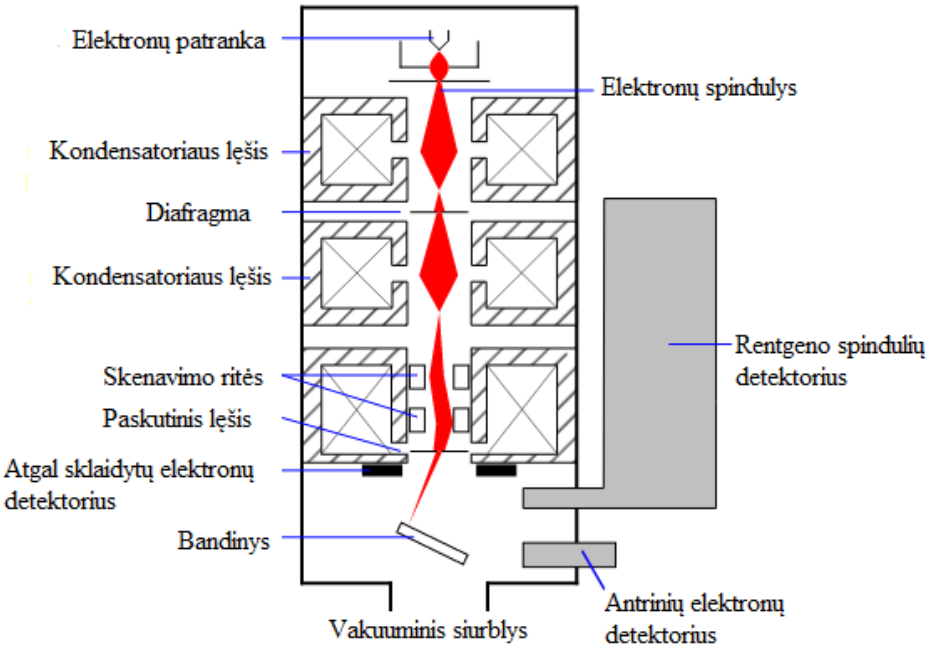


9 pav. Du taškai parodantys optinio aptikimo ribą [29].

SEM turi nepaprastai daug taikymo sričių, pagrindinis jo pranašumas prieš peršviečiantį elektronų mikroskopą yra tai, jog nereikia ploninti bandinio, kad jį galėtų peršviesti elektronų srautas. SEM kuriamas vaizdas yra panašus į tą, kokį gautume darydami nespalvotą fotografiją su nanometrine skyra. SEM naudoja sufokusuotą aukštos energijos elektronų spindulį, kuris skenuoja visą objektą, o tuomet detektorių sistema antriniai ar atgal nuo bandinio sklaidyti elektronai yra surenkimi. Detektorių signalas yra sustiprinamas ir kompiuterio ekrane parodomas kaip juodai baltas bandinio atvaizdas [27]. SEM panaudojimo galimybes smarkiai praplečia, tai kad prie jo galima prijungti šiuos detektorius : 1) Elektronų pluoštelio indukuotos srovės detektorių, EBIC; 2) Katodoliuminescencijos detektorių; 2) Rentgeno spindulių spektroskopą, EDX [30].

1.4.1 SEM veikimo principas

SEM elektronus emituojančios patrankos būna dviejų rūšių – terminės ir lauko emisijos. Elektronų spindulio energija įprastai varijuoja nuo 0,2 keV iki 100 keV ir yra sufokusuojama vienu ar dviem kondensatorių lęšiais iki 0,4 nm diametro spindulio. Bandinio skenavimas realizuojamas dviejų ričių pagalba, kurios nukreipia spindulį x ir y ašimis. Galiausiai spindulys praeina pro paskutinį lęšį, kuris sufokusuoja spindulį į bandinį [31].



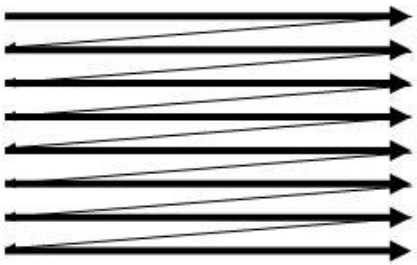
10 pav. Elektronų įgreitinimo vamzdžio supaprastinta schema [31].

Mažos energijos antriniai elektronai (bandinyje sugeneruoti elektronų pluošto) bei aukštos energijos atgal sklaidyti elektronai (elektronai, atspindėti nuo bandinio paviršiaus) (žr. 12 pav.) yra registruojami detektorių sistemos. Tam, kad būtų padidinta antrinių elektronų registravimas, prieš detektorius paprastai yra sumontuojamas teigiamai įkrautas tinklelis, nukreipiantis elektronus į scintiliatoriaus diską, kurio liuminescencija yra registruojama fotodaugintuvu.

Fotodaugintuvu pasiekiamas ypatingai aukštas stiprinimas (scinciliatoriaus emituotas fotonas iš fotokatodo išmuša foto-elektroną, kuris antrinių katodų yra dauginamas daugybę kartų, kol pasiekiamas norimo stiprumo elektrinis signalas). Tuomet didelio juostos pločio stiprintuvas signalą perduoda į analogas-kodas keitiklį (angl. *Analog-to-Digital Converter* – ADC), kur duomenų rinkimo laikas yra sinchronizuojamas su elektronų pluošto „vaikščiojimu“ po bandinį. Skaitmenizuotas vaizdo signalas yra saugomas kompiuterio atmintyje ir yra išvedamas į monitorių.

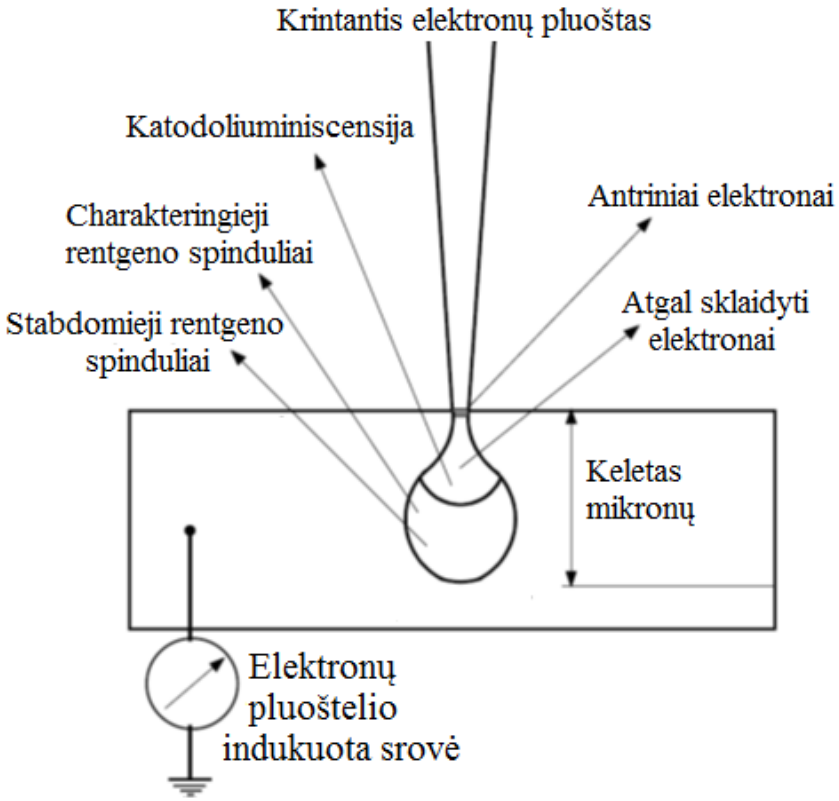
Skiriamoji geba priklauso nuo sufokusuoto elektronų pluošto diametro. Naudojant suderintą volframo termoemisijos elektronų patranką, jis gali būti mažesnis nei 4 nm. Vaizdo ryškio gylis yra realizuojamas dėl itin mažo pluošto fokusavimo kampo, kuris (dažniausiai 10 mrad eilės) yra

mažiausiai 300 kartų geresnis nei pasiekiamas optiniame mikroskope. Didinimas yra pasiekiamas iš santykio tarp ploto, kuris yra rodomas ekrane, bei to, kuris yra skenuojamas bandinyje. Skenuojamo ploto dydis gali svyruoti nuo 12 mm × 9,5 mm ir mažiau kaip 400 nm × 320 nm, kas atitiks didinimą nuo mažiau nei 10x iki daugiau nei 300 000x. Bandinio plotas yra skenuojamas elektronų pluošteliu eilutė po eilutės (angl. *raster scan*) (žr. 11 pav.). SEM yra atsiurbiamas vakuuminės sistemos iki slėgio, mažesnio nei 5-10 mbar, kad būtų užtikrinamos tinkamos sąlygos elektroninės sistemos veikimui, t.y. padidinamas elektronų laisvo lėkio nuotolis, kad nevyktų elektronų sugėrimo ar nebūtų sklaidos erdvėje tarp elektronų patrankos ir bandinio [32].



11 pav. Stačiakampinio skenavimo schema (angl. *raster scan*) [33].

Kai pirminis elektronų spindulys sąveikauja su bandiniu, elektronai netenka energijos atsitiktiniu pasikartojančiu sklaidymu ir sugėrimu lašo formos tūryje, kuris vadinamas sąveikos tūriu (angl. *interaction volume*). Nepaisant to, jog spindulys yra sufokusuojamas tik į labai nedidelį plotelį, siekiantį kelis nanometrus, pats sąveikos tūris gali apimti dešimčių mikronų gylį medžiagoje, priklausomai nuo elektronų energijos, bandinio atominio numerio ir jo tankio. Energijos mainai tarp elektronų spindulio ir bandinio sukuria: Aukštos energijos tamprią elektronų sklaidą, antrinių elektronų emisija netamprią sklaidą, elektromagnetinės radiacijos emisiją. Visi šie signalai gali būti aptikti tam skirtais detektoriais ir panaudoti kaip papildomą bandinį charakterizuojanti informacija.

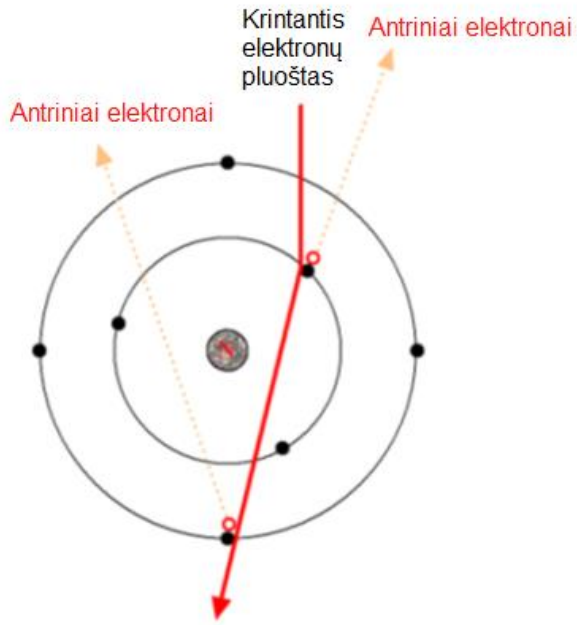


12 pav. Sąveikos tūrio supaprastina schema [32].

1.4.2 SEM registruojami signalai

SEM signalo vizualizavimui įprastai yra naudojamas antrinių elektronų signalas. Antriniai elektronai yra žemos energijos (<50 eV), kurie yra išstumti iš bandinio atomo k sluoksnio, netampria sklaida sąveikaujant su krentančių elektronų pluoštu. Dėl mažos energijos elektronai sklinda iš kelių nanometrų gylio nuo bandinio paviršiaus. Vėliau jie keliauja į jau aptartą scintiliatoriaus, fotodaugintuvo sistemą ir gauname dvimatį taškų intensyvumo pasiskirstymą. Signalo intensyvumas priklauso nuo elektronų kiekio, kuris pasiekė detektorių. Kai spindulys krenta į bandinį stačiu kampu, jis apšviečia lygų aplink ašį plotą ir iš jo ištrunka tam tikras kiekis elektronų. Kai kritimo kampas didėja, išauga apšviečiamas plotas, o tai lemia daugiau iš bandinio ištrūkusių antrinių elektronų. Todėl nuožulnios vietos ir aštrūs kampai yra matomos ryškesnės negu lygūs paviršiai. Taip gaunama trimačio vaizdo projekcija plokščiame

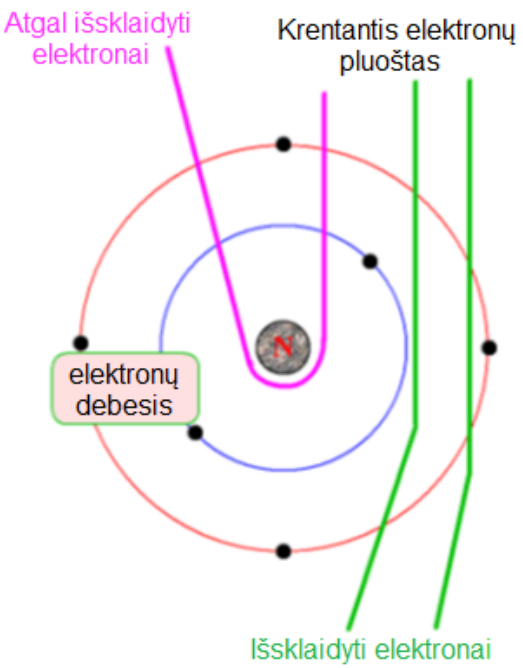
kompiuterio ekrane. Naudojant antrinių elektronų signalą skiriamoji geba gali siekti net iki 0,5 nm [30].



13 pav. Antrinių elektronų atsiradimo schema [32].

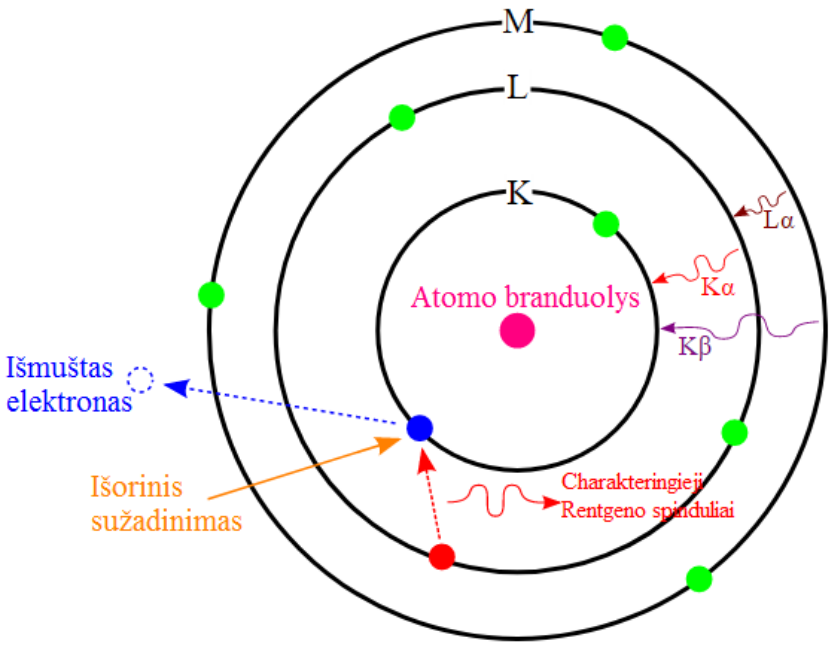
Atgal sklaidyti elektronai yra aukštos energijos elektronai, kurie yra kilę iš elektronų pluošto, jie yra atspindimi arba atgal sklaidomi iš bandinio sąveikos tūrio, sąveikaujant su bandinio atomais tampriu sklaidymu. Kadangi sunkūs elementai atgal sklaido elektronus daug stipriau už lengvesnius, jų vaizdas atrodo ryškesnis. Tai suformuoja atominio numerio Z kontrastą kuriamame vaizde, taigi ši savybė gali būti naudojama aptikti kontrastui tarp skirtingų cheminių elementų bandinyje. Antrinių elektronų detektorius neefektyviai aptinka atgal sklaidytus elektronus, nes jis įmontuotas kameros šone. Taigi mažai elektronų atšoka tokiu dideliu kampu ir teigiamai įelektrintas detektorius nepajėgus pritraukti aukštos energijos elektronų. Atgal sklaidytų elektronų detektorius yra sumontuotas žiedu aplink elektronų patranką, taigi į jį patenka tik mažu kampu atspindėti elektronai. Detektoriai, panašiai kaip ir antrinių elektronų atveju, paprastai būna scinciliatoriaus arba puslaidininkinio tipo. Papildomai topografinio kontrasto paryškinimui gali būti sumontuojamas asimetrinis detektorius, kuris iš vienos bandinio pusės surenka daugiau elektronų nei iš kitos. Kartais žiedinis detektorius gali

būti sudalintas į atskirai valdomus segmentus, kuriuos įjungiant arba išjungiant galima keisti pusę, iš kurios padidinamas topografinis kontrastas [34].



14 pav. Atgal sklaidytų ir išsklaidytų elektronų schema [32].

Vienas iš galimų signalų naudojamų medžiagotyroje yra energijos dispersijos rentgeno spektroskopija (angl. *Energy Dispersive X-ray Spectrometry*, EDX). Šio signalo veikimo principas yra panaudojant išspinduliuotą rentgeno spektrą iš kieto kūno bandinio, kuris bombarduojamas sufokusuota elektronų banga, kad gauti lokalizuotą cheminių elementų analizę. Visi elementai turintys atominį skaičių nuo 4 (Be) iki 92 (U) gali būti aptikti, tačiau ne visi įrenginiai geba aptikti lengvus atomus ($Z<10$). Kokybinė analizė vyksta spektro linijas priskiriant cheminiam elementui, matuojant linijos intensyvumą ir lyginant su žinomos koncentracijos bandinio intensyvumu. Skenuojant bandinį ir atvaizduojant pasirinkto elemento spektro linijos intensyvumą, susiformuoja cheminio elemento pasiskirstymas bandinyje [35]. Išmuštus elektronus taip pat galima panaudoti elementų analizei, matuojant jų kiekį ir kinetinę energiją galima nustatyti jų išlaisvinimo energiją, kuri yra specifinė kiekvienam elementui [36].



15 pav. EDX veikimo principinė schema [37].

Taip pat puslaidininkinių sandūrų tyrimui dažnai naudojama elektronų pluoštelio indukuotos srovės metodas (angl. *Electron Beam Induced Current*, EBIC). EBIC matavimas suteikia galimybę vizualizuoti puslaidininkinės struktūros elektriškai aktyvias sritis, defektus ir tarpkristalines sritis. Didelės energijos elektronai, sąveikaudami su puslaidininkine medžiaga, sukuria elektronų ir skylių poras. Sugeneruotos poros, nesant elektriniam laukui, rekombinuos, kadangi neveikia jėgos, kurios atskirtų elektroną ir skylę. Jeigu tos poros yra generuojamos struktūroje, kurioje yra vidinis elektrinis laukas, pavyzdžiui p-n sandūros nuskurdintoje srityje ar netoli jos, tada elektronas ir skylė bus atskirti. Prijungus tą struktūrą prie ampermetro galima matuoti tekančios srovės dydį. Išmatavus srovę skirtinguose bandinio taškuose ir apibendrintus rezultatus galima atvaizduoti elektronų pluoštelio indukuotų srovių žemėlapį. Iš gautų rezultatų galima nustatyti kurioje tiriamo bandinio vietoje yra ir kaip atrodo p-n sandūros sritis, kur yra defektai arba rekombinacijos sritys ir paskaičiuoti jų tankį, įvertinti krūvininkų difuzijos nuotolius ir gyvavimo trukmes [38].

1.5 Linijinis transmisijos modelis

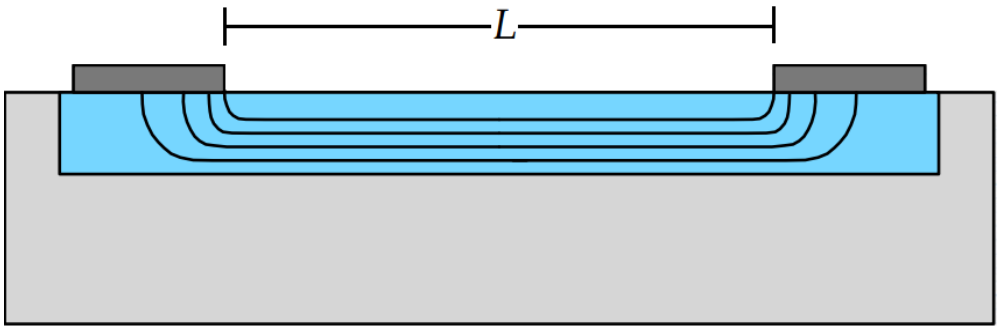
Siekiant sužinoti ominio kontakto varžą įprastai naudojamas linijinis transmisijos modelis (angl. *Transmission Line Model,* TML), pagal kurį pilnoji varža susideda iš kelių komponentų.

$$R = 2R_m + 2R_C + R_{semi} \tag{4}$$

Kur, R_m yra varža dėl kontakto su metalu, R_C yra dėl metalo/puslaidininkio sąsajos, R_{semi} puslaidininkio varža. Paprastai $R_C \gg R_m$, todėl R_m galime nepaisyti. Puslaidininkio varža apskaičiuojama:

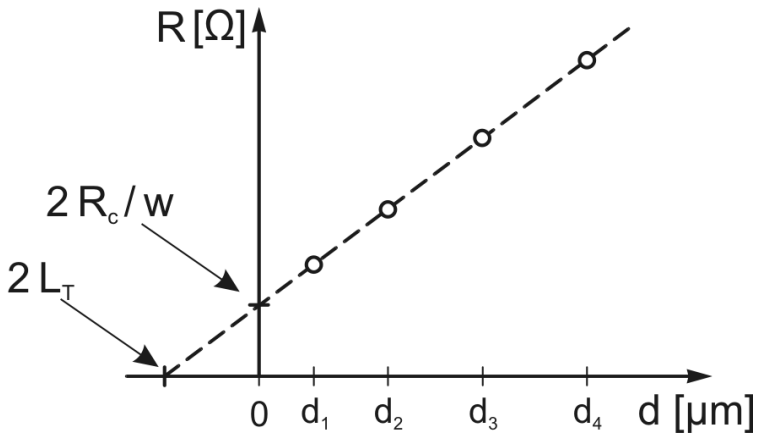
$$R_{semi} = R_S \frac{L}{W} \tag{5}$$

Kur R_S dangos varža, L atstumas tarp kontaktų, w kontakto plotis.



16 pav. Pavaizduotas atstumas tarp kontaktų [39].

Jeigu matuosime kelis skirtingu atstumu atidėtus kontaktus, visi kiti parametrai išliktų tokie patys, gautume tokį vaizdą.



17 pav. Pilnosios varžos priklausomybė nuo atstumo tarp kontaktų [39].

Kur L_T yra pernašos ilgis, tai vidutinis atstumas kurį nukeliauja krūvininkas puslaidininkyje po kontaktu, kol nuteka į kontaktą [40]. Tiesinis koeficientas 17 pav priklausomybėje yra:

$$k = R_S/w \tag{6}$$

Iš šios lygties gauname dangos varžą:

$$R_S = k \cdot w \tag{7}$$

Nustatyti pilnąją bandinio varžą, matuojama voltamperinė charakteristika. Iš voltamperinės charakteristikos pasirinkus tiesinę dalį, pagal Omo dėsnį apskaičiuojame varžą:

$$R = \frac{U}{I} \tag{8}$$

Kur *I* yra srovės stipris, *U* įtampa, *R* pilnoji varža.

1.6 Foto atsakas

Bandinio reakcija į elektromagnetinę spinduliuotę yra apibūdinama atsako (R_λ) ar kvantinio efektyvumo (*Q.E.*) priklausomybėmis nuo šviesos bangos ilgio. Iš šių priklausomybių galima matyti kurioje spektro dalyje bandinys jautriausias šviesai, tai svarbu norint įvertinti ar GaN ir InN bandinys heterosandūroje jautrus plačiame spektro ruože.

Iš voltamerinės charakteristikos apskaičiuojamas foto srovės stipris, pamatavus tamsoje srovės stiprio priklausomybę nuo įtampos ją lyginame su gauta, kai bandinys apšviestas, iš 9 formulės gauname foto srovės stiprio išraišką.

$$I = I_{tamsos} + I_{ph} \tag{9}$$

Kur *I* srovės stipris gautas apšvietus bandinį, I_{tamsos} srovės stipris gautas matavus tamsoje, I_{ph} foto srovės stipris.

Atsaką skaičiavome pagal formulę:

$$R_\lambda = \frac{I_{ph}}{P} \tag{10}$$

Kur R_λ atsakas, *P* šviesos galia. Kvantinis efektyvumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$Q.E. = \frac{R_\lambda išmatuotas}{R_\lambda idialus} = R_\lambda \frac{hc}{\lambda q} = 1240 \frac{R_\lambda}{\lambda} \tag{11}$$

Kur h=6.63 x 10^{-34} J·s, Planko konstanta, c=3 x 10^{8} m/s, šviesos greitis, q=1.6 x 10^{-19} C, elektrono krūvis, R_λ atsakas *A/W* matavimo vienetais ir λ šviesos bangos ilgis nanometrais [41].

2 Darbo eiga

2.1 Bandinio formavimas

Puslaidininkiniai dariniai buvo užauginti metaloorganinio cheminio nusodinimo iš garų fazės (angl. *Metalorganic Chemical Vapor Deposition,* MOCVD) reaktoriumi. Bandinį užaugino technologas Marek Kolenda. Ant safyro padėklo buvo užaugintas 5 μm GaN sluoksnis, jį sekė 100 nm storio p tipo GaN sluoksnis ir 300 nm InN sluoksnis. Auginimo parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė, p tipo GaN(Cp2Mg srautas 7.7·10^{-7} mol/min) ir InN auginimo parametrai.

	Auginimo T (^{o}C)	Ciklų skaičius	TMIn tiekimo trukmė, t_1(s)	Pauzės trukmė, t_2 (s)	V/III santykis	Auginimo slėgis (mbar)	Storis (nm)
GaN	1030	-	-	-	6298 (NH_3 0.268 [mol/min] / TMGa 4.25·10^{-5} [mol/min])	150	100
InN	610	600	7	20	9968 (NH_3 0.268 [mol/min] / TMIn 2.688·10^{-5} [mol/min])	400	300

Norint prijungti kontaktą prie p tipo GaN, reikia nuėsdinti 300 nm InN sluoksnį iki p tipo GaN, tam naudojome VU TMI sauso ėsdinimo įrenginį *Oxford Instruments Plasmalab System100* (angl. *Reactive ion etching*, RIE). Procesui naudotas rėžimas: Cl_2 dujų srautas – 10 cm^3/min, Ar dujų srautas – 5 cm^3/min, bandinio aušinimui naudotų He dujų slėgis - 10 Torr (~13 mbar), darbinės kameros slėgis 4 mbar, RF šaltinio galia 100 W, ICP šaltinio galia 250 W,

ėsdinimo proceso trukmė 50 s. Safyro šešėlinė kaukė buvo naudojama, kad uždengti InN plotą kurio nenorime ėsdinti.

P tipo kontaktų formavimui vienam iš bandinių naudojome sidabro pastą „*Electrolube“*, antram FTMC elektronų spindulio (*E-beam*) garinimo įrenginį (*VST Model TFDS–870*). Tikslas buvo užgarinti mažus kvadrato formos kontaktus ant nuėsdinto ploto, p tipo GaN paviršiaus. Kaip garinimo šabloną naudojome išpjaustytą metalinę plokštelę, kurios kvadratinių kiaurymių matmenys buvo 1,5 x 1,5 mm. Ant bandinio pritvirtinus garinimo šabloną, pritvirtinome jį plonais metaliniais laikikliais ir įdėjome į elektronų spindulio garinimo įrenginį. Procesas vyksta aukštame vakuume. Elektronų spinduliu bombarduojant anodą, kuriame patalpinta garinama medžiaga, įkaitina iki tokios temperatūros kada vyksta tolygus garavimas [42]. Iš pradžių buvo garinamas nikelio 20 nm sluoksnis, po to aukso 80 nm sluoksnis. Aukso ir GaN sandūra duoda labai didelę varžą, todėl pirmiau padengiamas mažas sluoksnis Ni, tada ant viršaus Au.

Abiem bandiniams n tipo kontaktas buvo suformuotas karštu lituokliu (450°C) iš lydinio: In:Sn 95:5.

Prietaisų kontaktai buvo kaitinami Vilniaus universiteto turima spartaus iškaitinimo krosnimi *Unitemp RTP-1200-100*. Procesas vyko argono dujų atmosfetroje, temperatūros ir laiko rėžimas: 550°C 300s.

2.2 Foto-elektriniai matavimai

Turėjome du vienodai suformuotus bandinius su skirtingais p laidumo tipo kontaktais (Ni/Au ir Ag, žr. skyrių 4.1). Tam, kad palyginti kontaktų varžas ir ištirti kaip kinta bandinio varža po greitojo šiluminio atkaitinimo buvo atlikti TLM tipo matavima. Matavimus atlikome su “keithley-2400” multimetru. Prijungus multimetrą prie kompiuterio naudojome kompiuterinę programą, kurioje buvo nustatyti matavimo rėžiai nuo -20V iki 20V, matavimo žingsnis 0,2V, matavome srovės stiprio priklausomybę nuo įtampos. Iš voltamperinės charakteristikos tiesinės

dalies apskaičiavome skirtingu atstumu esančių kontaktų varžas. Lyginome skirtingų kontaktų varžas ir kaip pakito bandinio varža po iškaitinimo.

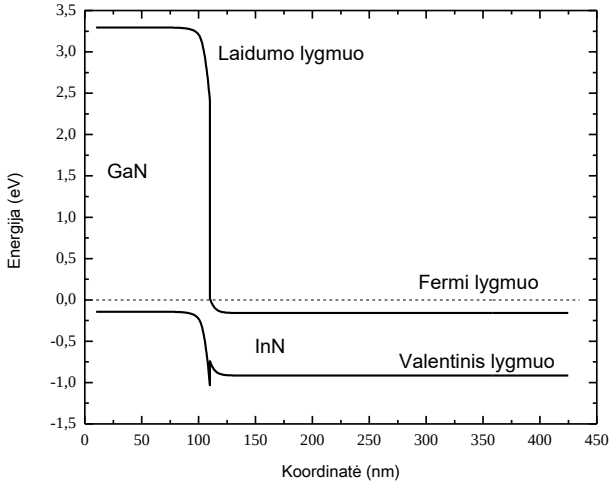
Fotoelektriniems matavimas buvo naudojama halogeninė lempa, tad pirmiausia reikėjo ištirti jos šviesos spektrinį galios pasiskirstymą. Tai reikalinga norint sužinoti kvantinį efektyvumą. Šiame eksperimente naudojome monochromatorių *Jobin Yvon H10 VIS* ir optinės galios matuoklį *Ophir PD300-1W*. Monochromatoriaus išėjimo spindulį nutaikius į galios matuoklį ir keičiant bangos ilgį kas 10 nm, matuojant nuo 400 nm iki 930 nm, gaunama halogeninės lempos galios priklausomybė nuo bangos ilgio.

Norint sužinoti bandinio efektyvumą ir kaip jis priklauso nuo apšviečiamos bangos ilgio, matavome voltamperines charakteristikas apšvietus bandinį. Šiam eksperimentui pasirinkome artimiausią didelį Ni/Au kontaktą (3 mm atstumu nuo InN sluoksnio), prie jo prijungėme multimetro teigiamą laidą, o prie In kontakto neigiamą laidą. Apšvietėme bandinį jau ištirta halogeninės lempos ir monochromatoriaus sistema. Šviesos spindulį nutaikius į tiriamą bandinį buvo keičiamas šviesos bangos ilgis nuo 400 nm iki 900 nm su 50 nm žingsniu ir matuojamos voltamperinės charakteristikos. Gautus rezultatus lyginome su gautais tamsoje.

3 Rezultatų aptarimas

3.1 GaN/InN heterosandūros energijos lygmenys

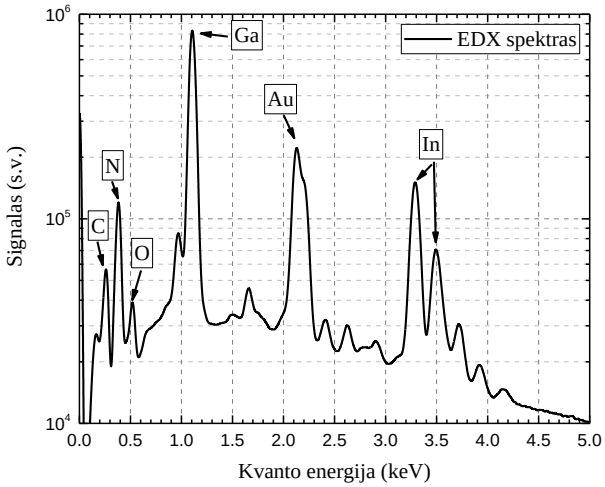
Sumodeliavus p tipo GaN ir InN heterosandūros valentinio ir laidumo energijos lygmenų išsidėstymą *nextnano* programa, gautą rezultatą pateikiame 18 pav. Modeliavimo parametrai: p-tipo (Mg) koncentracija $7{,}5\cdot10^{18}$ cm^{-3}, InN visada yra n tipo, jo donorai yra visi jonizuoti, todėl donoru ir elektronų koncentracija sutampa ir yra $5{,}57\cdot10^{18}$ cm^{-3}.



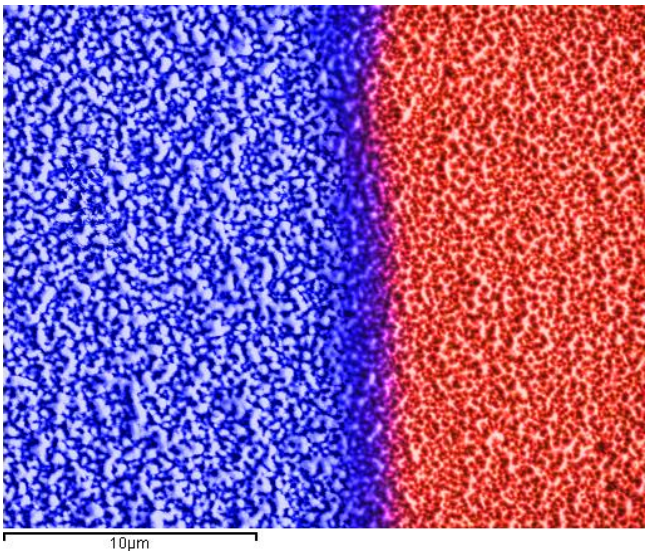
18 pav. Heterosandūros energijos lygmenų išsidėstymas.

3.2 Charakterizavimas skenuojančiu elektronų mikroskopu

19 pav. pateikiamas bandinio be kontaktų paviršiaus EDX matavimo spektras. Jame matomos C ir O linijos yra sąlygotos organinės bandinio paviršiaus taršos, dėl bandinio sąveikos su atmosfera. Ryški Au linija stebima todėl, kad bandinys buvo padengtas Au danga ir įžemintas, kad sumažinti bandinio krovimąsi jį skanuojant su SEM. 20 pav. pateikta SEM nuotrauka, kurioje mėlynai pažymėta stritis, kurioje EDX registravo Ga liniją, tuo tarpu raudonai – sritis kurioje yra In. Kaip matosi iš paveikslo, mėlynos ir raudonos sritys nepersikloja, tai rodo, kad kairėje nuotraukos pusėja InN buvo pilnai pašalintas ir p-tipo kontaktai suformuoti ant p-GaN.

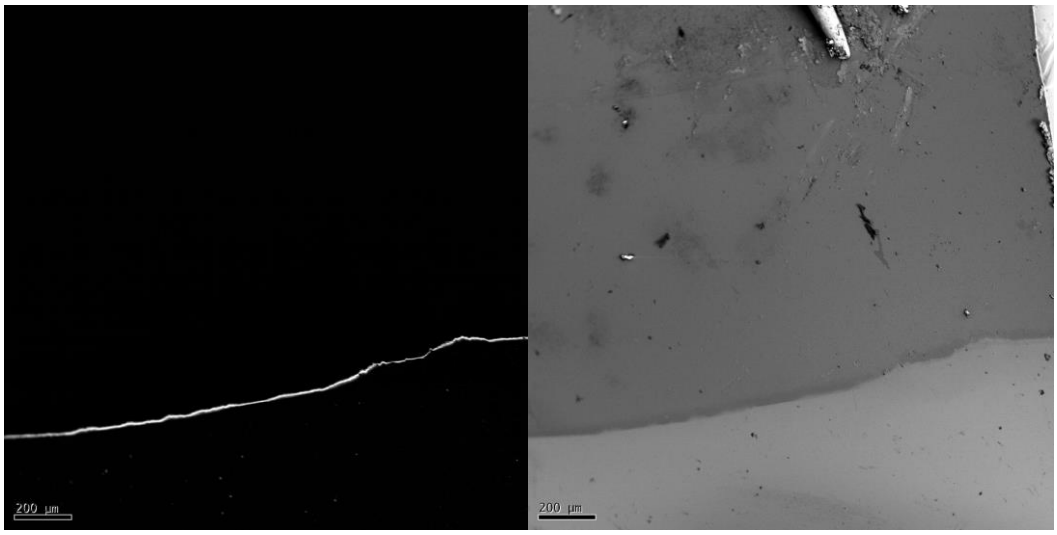


19 pav. Bandinio pavirišiaus EDX spektras.

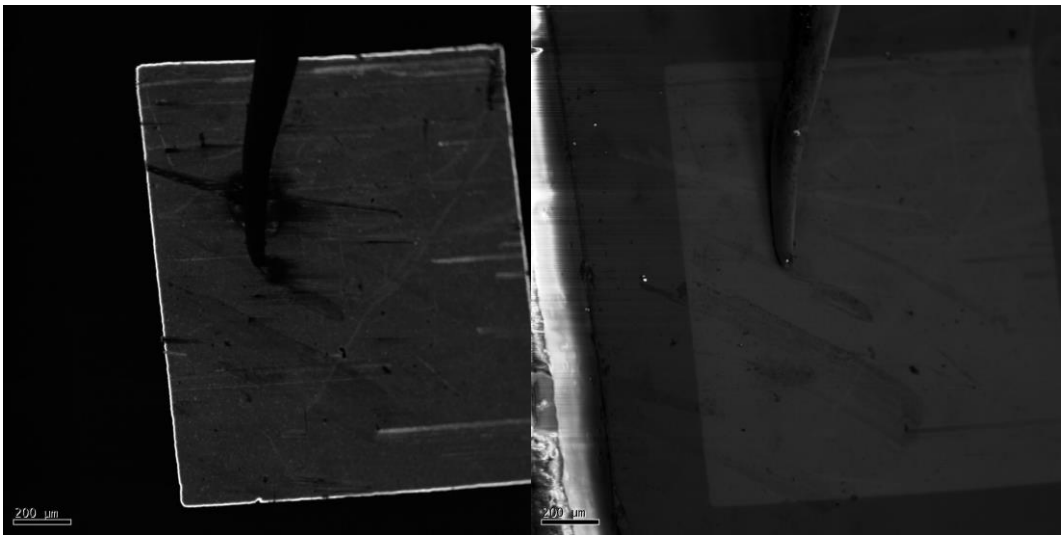


20 pav. GaN ir InN sandūros SEM vaizdas, EDX signalas pateiktas spalvomis, mėlyna Ga, raudona In.

21 pav. pateikiami bandinio su suformuotais kontaktais EBIC matavimų rezultatai. Paveikslo dešinėje matome ryškią liniją, kuri atvaizduoja vidinį elektrinį lauką atskiriantį krūvininkus. Šios ribos vieta tiksliai sutampa su sandūros tarp InN ir GaN vieta matoma SEM nuotraukoje dešinėje. Tai patvirtina, kad buvo suformuota p-n heterosandūra. Kita vertus atlikus Ni/Au kontakto matavimus su EBIC (žr. 22 pav.) matomas krūvių atskyrimas, o tai leidžia teigti, kad suformuotas p-tipo kontaktas yra Schottky tipo.



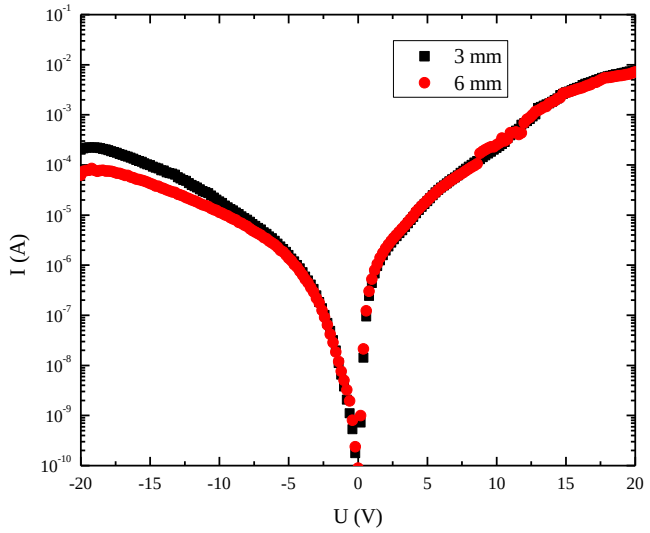
21 pav. InN/GaN sandūros atvaizdai. Kairėje EBIC, o dešinėje SEM vaizdas.



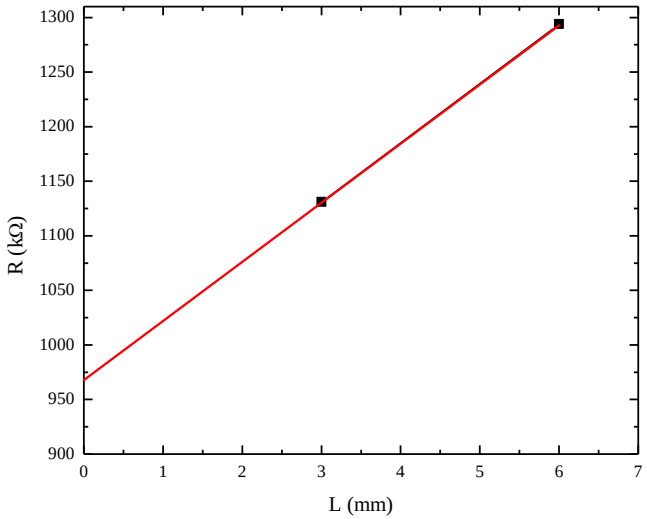
22 pav. Ni/Au kontakto atvaizdai. Kairėje EBIC, o dešinėje SEM vaizdas.

3.3 Kontaktų varžos tyrimas

Iš ankstesnių grupės matavimų yra žinoma, kad InN-In:Sb kontaktas yra itin mažos varžos, todėl šiame skyriuje yra daroma prielaida, kad $R_{C\,InN} \ll R_{C\,GaN}$, tuo pačiu 17 pav. y-ašyje yra atkertama ne $2R_C$, o $R_{C\,GaN}$. Iš išmatuotų *I-V* charakteristikų tiesinės dalies nuo 5 V iki 15 V apskaičiuotos varžos kiekvieno iš tirtų p-tipo kontaktų varžos. Sidabro pastos kontaktų matavimai *I-V* matavimai pateikti 23 paveiksle, kuriame juodai ir raudonai pažymėti sidabro kontaktai esantys per 3 mm ir 6 mm atstumą nuo InN sluoksnio atitinkamai. Išmatuotos kontaktų varžos priklausomybė nuo atstumo pateikta 24 paveiksle.



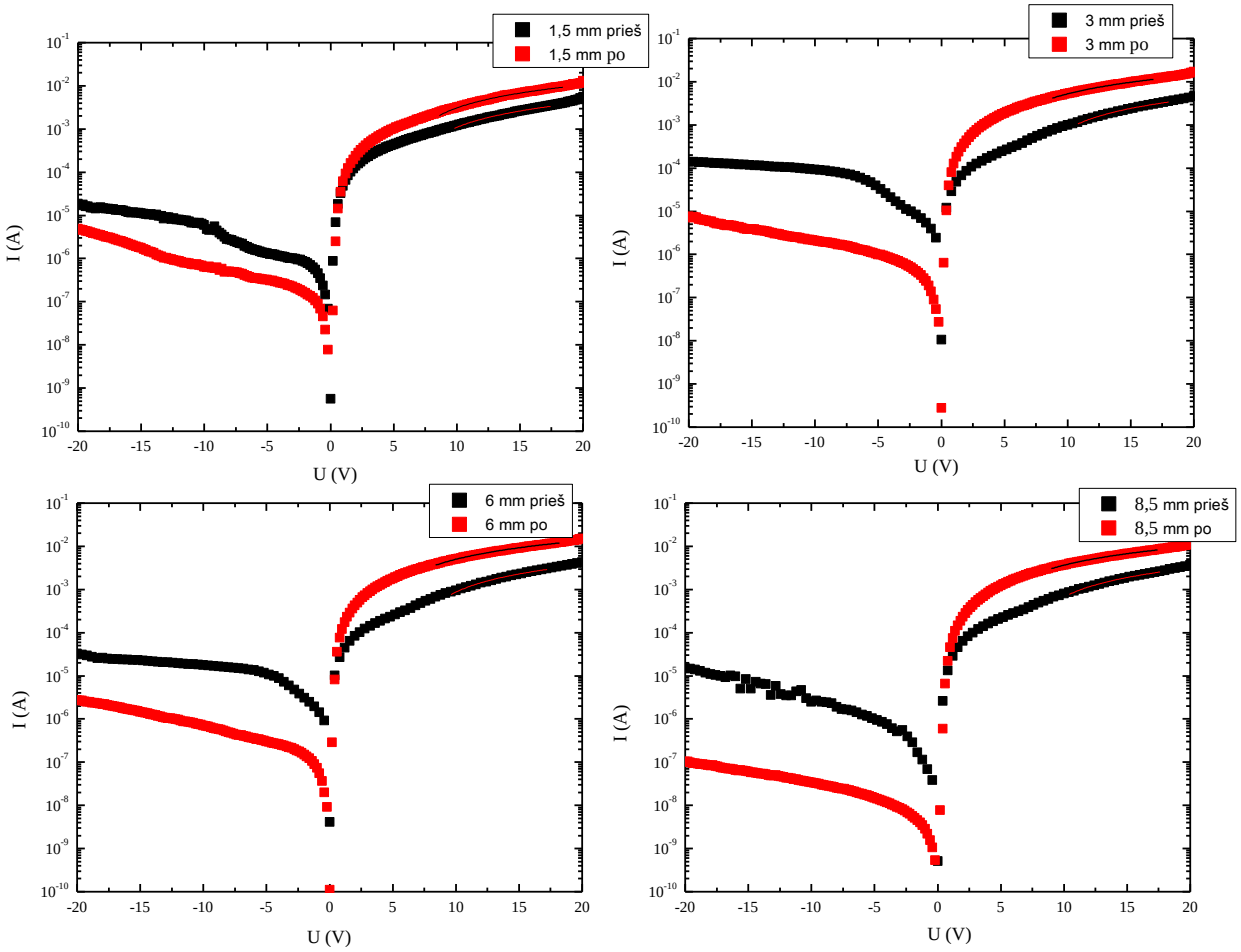
23 pav. Srovės stiprio priklausomybė nuo įtampos pusiau logaritminiu masteliu dviems skirtingu atstumu nuo InN sluoksnio nutolusiems sidabro kontaktams.



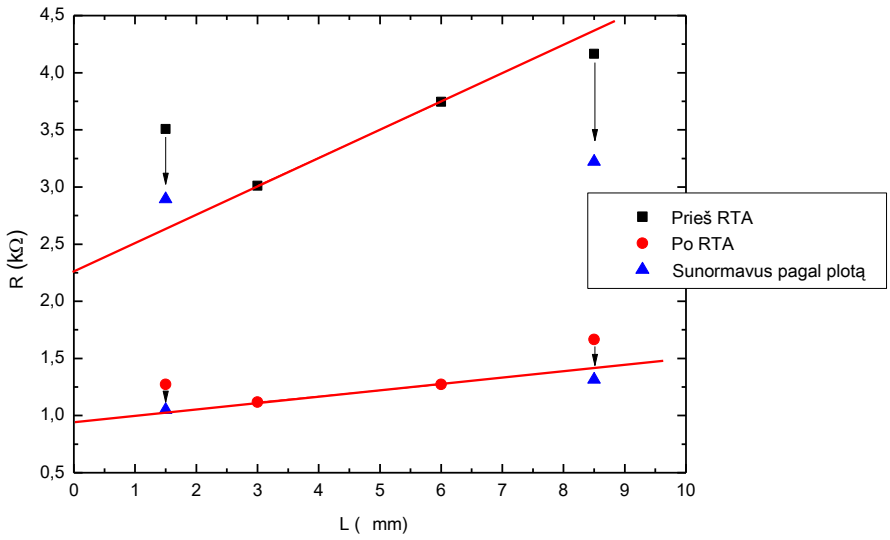
24 pav. Pilnutinės varžos priklausomybė nuo kontakto atstumo iki InN sluoksnio.

24 paveiksle gautus taškus sujungę tiese, nustačius kur ji kerta ašį ir prisiminus, kad $R_{C\ InN} \ll R_{C\ GaN}$, galime patikimai teigti, kad suformuoto Ag kontakto varža yra 969 kΩ (kontakto plotis w=1,5 mm). Šio bandinio iškaitinimas nepavyko, nes po kaitinimo kontaktas atšoko nuo bandinio ir srovė per jį netekėjo.

Toliau buvo vykdomas p tipo GaN ir InN heterosandūros bandinio su Ni/Au kontaktais voltamperinių charakteristikų tyrimas prieš ir po RTA apdorojimo. Iš 25 pav. pavaizduotų priklausomybių tiesinių dalių apskaičiavome pilnutines varžas ir atidėjome jų priklausomybę nuo kontaktų atstumo, kaip ir sidabrinių kontaktų atveju. Kadangi 1,5 mm atstumu nutolusio kontakto plotas buvo tris kartus mažesnis, todėl jo varža yra didesnė ir iškrenta iš tiesinės priklausomybės, pavaizduotos 26 paveiksle. Tiesinis normavimas imtas nuo 3 mm iki 8,5 mm. Mėlynu trikampiu pažymėti taškai buvo apskaičiuoti artimiausią kontakto varžą normuojant pagal plotą, o tiesiniai aproksimacijai nebuvo naudojami, tačiau puikiai gula į aproksimuotą tiesę.



25 pav. Bandinio su Ni/Au kontaktu stiprio priklausomybė nuo įtampos skirtingais atstumais, prieš ir po RTA.



26 pav. Prieš ir po atkaitinimo Ni/Au kontaktų varžų priklausomybė nuo atstumo.

26 paveiksle pavaizduota kontaktų varžos priklausomybė nuo kontaktų atstumo iki InN sluoksnio. Iš jo akivaizdžiai matoma RTA proceso nauda. Po bandinio atkaitinimo kontaktų varža sumažėjo daugiau nei tris kartus, taip pat tiesė pasidarė gulstesnė, kas byloja apie sumažėjusią paties p-tipo puslaidininkio varžą. Apibendrinti varžų matavimų rezultai, prieš ir po RTA, yra pateikti 3 lentelėje. Iš jos matosi, kad kontakto varža po RTA sumažėjo daugiau nei tris kartus, p tipo GaN sluoksnio varža sumažėjo daugiau nei du kartus ir pernašos ilgis sumažėjo.

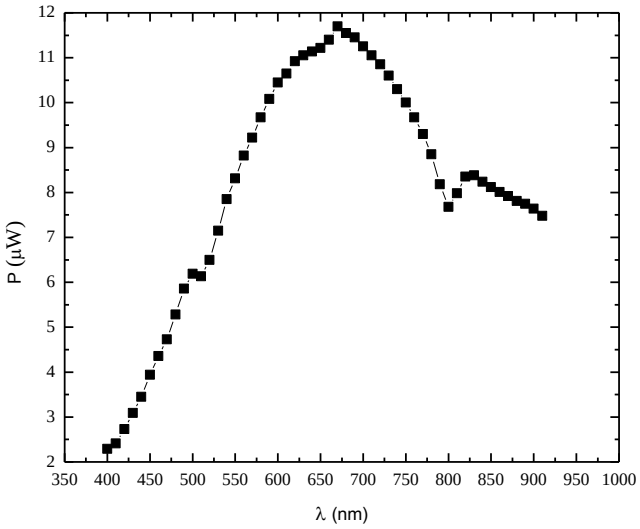
3 lentelė. Ni/Au kontakto varžos R_C, sluoksnio varžos R_S

	R_C, $\Omega \cdot cm2$	R_S, Ω
Prieš RTA	51,28	366
Po RTA	21,64	77,5

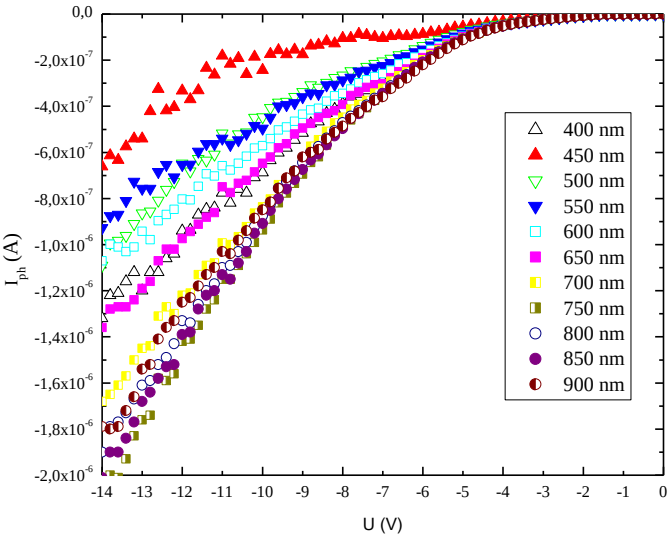
3.4 Foto atsako tyrimas

Išmatuotas halogeninės lempos spektras pavaizduotas 27 paveiksle, kuris buvo naudojamas skaičiuojant bandinio su Ni/Au kontaktais Q.E. (bandinys su Ag kontaktais nebuvo tiriamas, nes jo varža iki RTA procedūros buvo trimis eilėmis didesnė, o po atkaitinimo nebeliko kontaktų ant bandinio). Prijungus multimetrą prie In:Sb ir Ni/Au kontaktų apšvietėme bandinį siauro

spektrinio pločio šviesa (10 nm pločio) naudojant matavimo sistemą iš halogeninės lempos ir monochromatoriaus. Išmatuotos bandinio voltamperines charakteristikos apšvietus buvo lyginamos su tamsoje išmatuota voltamperine charakteristika. Buvo daroma prielaida, kad srovės stiprio skirtumas tai fotonų sąlygota foto srovė. Jos priklausomybė nuo užtvarinės įtampos dydžio yra pavaizduota 28 paveiksle.

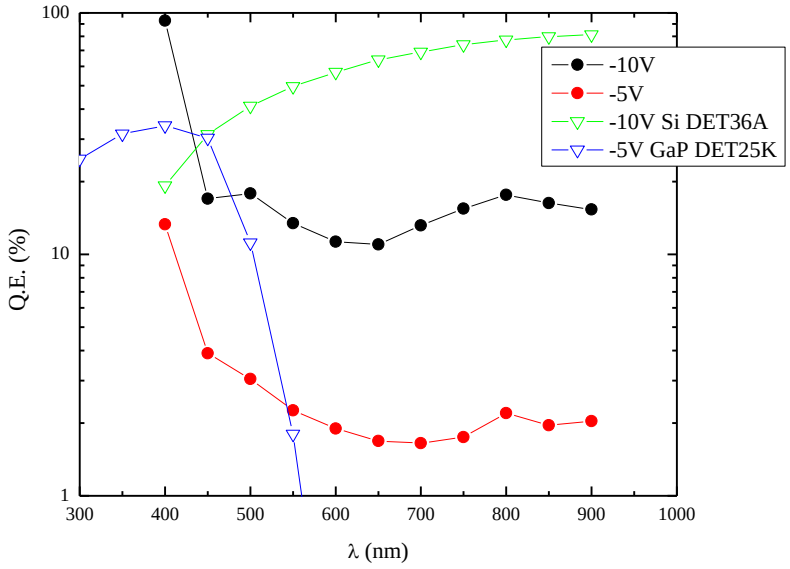


27 pav. Tyrimui naudotos halogeninės lempos spektrinis galios pasiskirstymas.



28 pav. Foto srovės stiprio priklausomybė nuo užtvarinės įtampos.

Iš 28 paveiksle atidėtos foto srovės priklausomybės nuo įtampos sunku daryti išvadas, nes halogeninės lempos galia nėra tolygiai pasiskirsčiusi visame matuotame diapazone (žr. 27 pav.). Pasinaudojus 27 ir 28 paveiksluose pavaizduotais rezultatais bei (10) ir (11) formulėmis, buvo apskaičiuoti bandinio kvantinis našumas ties -5 V ir -10 V įtampomis. Šie rezultatai palyginti su komerciniu *ThorLabs* firmos detektoriumi DET36A 29 paveiksle.



29 pav. Bandinio Q.E. priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio esant -5 V ir -10 V užtvarinėms įtampoms. DET36A ir DET25K yra komerciškai prieinami įmonės *Thorlabs* Si detektoriai [43].

29 paveiksle stebimas Q.E. pikas ties 400 nm gali būti siejamas su sugertimi GaN sluoksnyje, kurio epitaksinė kokybė yra daug geresnė, krūvininkų gyvavimo trukmės ilgesnės, taigi ir Q.E.santykinai didelis. Prie ilgesnių bangos ilgių yra stebimas Q.E. sumažėjimas, kuris silpnai priklauso nuo bangos ilgio, tai galėtų būti privalumas plataus šviesos spektro detektorių panaudojime.

Išvados

1. EBIC matavimai parodė, kad krūvininkų atskyrimas vyksta ties p-GaN/n-InN sandūra, tai rodo, kad pavyko suformuoti p-n tipo sandūrą.
2. Registruojamas EBIC signalas ties p-GaN – Ni/Au kontaktu rodo, kad suformuotas kontaktas yra *Schottky* tipo.
3. Po iškaitinimo dangos ir kontaktų varžos sumažėjo, dėl Mg akceptorių aktyvavimo p-GaN sluoksnyje.
4. Iš kvantinio efektyvumo spektro galima spręsti, kad InN panaudojimas praplėtė prietaiso registruojamą bangos ilgių ruožą.

Marius Pikčiūnas

Summary

Fabrication and investigation of InN/GaN heterojunction

P-N GaN/InN heterojunction were fabricated with two different positive contacts, Ag and Ni/Au. It was characterized by energy dispersive x-ray spectrometry, electron beam induced current, contact and sheet resistance, responsivity and quantum effectivity. The aim of this study was to assure that P-N heterojunction fabrication was successful, determine the resistance of sheet layer and contacts, measure device responsivity to visual light.

SEM/EBIC results confirmed that GaN/InN P-N heterojunction was formed. We found that Ni/Au contact for p doped GaN is far better than Ag. Measured Ni/Au contact resistance was found to be three times smaller after rapid thermal annealing, but still too much for practical application. Quantum efficiency (QE) spectral distribution showed peak at 400 nm which might be related to absorption in high quality GaN layer. QE of heterojunction showed to be nearly constant at longer wavelengths (from 450 nm to 900 nm). Quality of p-type contacts must be enhanced in order to use such device for practical applications in VIS-NIR detection.

4 Bibliografija

[1] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, J. Appl. Phys. 94, 3675, 2003.

[2] Veal, T. D.; McConville, C. F. and Schaff, W. J. , Indium Nitride and Related Alloys, 2009.

[3] V. Y. Davydov, A. A. Klochikhin, R. P. Seisyan, V. V. Emtsev, S. V.Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmuller, H. Harima, A. V. Mudryi, J.Aderhold, O. Semchinova, J. Graul, Phys. Status Solidi B, 2002.

[4] M. Goiran, M. Millot, J.-M. Poumirol, I. Gherasoiu, W. Walukiewicz, J. Leotin, Appl. Phys. Lett. 96, 052117, 2010.

[5] A. Di Carlo, Tuning Optical Properties of GaN-Based Nanostructures by Charge Screening, 2001.

[6] Mina Rais-Zadeh, Vikrant Jayant Gokhale, Azadeh Ansari, Marc Faucher, Didier Théron, Yvon Cordier, Lionel Buchaillot, Gallium Nitride as an Electromechanical Material, 2014.

[7] G. Knoll, Radiation Detection and Measurement (3rd Edition), Wiley, New York, 1999.

[8] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, 17 skyrius, 1991.

[9] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 2010, pp. 407-440.

[10] G. Instruments, „Measuring the Optical Power of your LED,“ 2017.

[11] P. Sellin, Ion beam induced charge imaging of epitaxial GaN detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers,

Detectors and Associated Equipment, 531(1-2): psl. 82-86., 2004.

[12] J. Kwak, Crystal-polarity dependence of Ti/Al contacts to freestanding n-GaN substrate. Applied Physics Letters, 79(20): psl. 3254-3256., 2001.

[13] M. Jinghui Wang, Evaluation of GaN as a Radiation Detection Material THESIS psl. 20-21, 2012.

[14] A. Rockett, The Materials Science of Semiconductors, 2007, pp. 102-106.

[15] C. G. Van de Walle and J. Neugebauer, Nature, Londonas, 2003.

[16] P. D. C. King, T. D. Veal, C. E. Kendrick, L. R. Bailey, S. M. Durbin, C. F. McConville, InN/GaN valence band offset: High-resolution x-ray photoemission spectroscopy measurements, Coventry, UK, 2008.

[17] M. Moll, Nucl. Instr. and Meth. A 546, psl. 202-211, 2006.

[18] D. Nishi, Handbook of Semiconductor Manufactoring Technology, 2007.

[19] P.J. Kelly, R.D. Arnell, Vacuum 56. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications 159-172, 2000.

[20] R. B. Fair, Rapid Thermal Processing, San Diego, 1993.

[21] R.B. Timans, P.J. Tay, S.P., Neneyei Z., „International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors," 2004.

[22] Jingtao Zhao, Zhaojun Lin, Chongbiao Luan, Yang Zhou, Ming Yang, Yuanjie Lv, Zhihong Feng, „Effects of rapid thermal annealing on the electrical properties of the AlGaN/AlN/GaN," 2014.

[23] M. E. Lin, Z. Ma, F. Y. Huang, Z. F. Fan, L. H. Allen, H. Morkoç, „Low resistance ohmic contacts on wide bandgap GaN," *AIP,* 1994.

[24] M. Yamaguchi, M. Tachikawa, Y. Itoh, M. Sugo, S. Kondo, J., „Appl. Phys. 68," 1990.

[25] Xiaobing Li, Dianzhao Sun, Meiying Kong, S.F. Yoon, „Rapid thermal annealing processing of GaN epilayer on sapphire(0 0 0 1),“ *Journal of Crystal Growth 186 298—301,* 1998.

[26] J. Smalc-Koziorowska, Ni–Au contacts to p-type GaN – Structure and properties, 2010.

[27] O. C. Smith KCA, The scanning electron microscope and its fields of application, British Journal of Applied Physics, 1955.

[28] Stokes, Debbie J., Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM)., 2008.

[29] Prieiga prie interneto: http://www.nanoscience.com/technology/sem-technology/.

[30] R. Tomašiūnas, Šiuolaikinės Mikroskopijos Metodai Medžiagotyrai, Vilnius, 2008.

[31] D. McMullan, Scaning electron microscopy. Scanning. 17 (3): 175–185., 2006.

[32] Obducat CamScan Ltd, SEM User Manual, Version 1.0 psl. 5-8, 2009.

[33] Prieiga prie interneto: http://jchen.myweb.hinet.net/fib/fib-simple/index.html.

[34] Goldstein, G. I. Newbury, D. E. Echlin, P. Joy, D. C. Fiori, C. Lifshin, E. , Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis., 1981.

[35] J. I. Goldstein, Scanning Electron Microscopy and X-ray Micronalysis, 3rd ed, Plenum Press, New York, 2003.

[36] S. Hüfner, Photoelectron spectroscopy: principles and applications, 1995.

[37] A. B.K., X-ray Spectroscopy, 2nd edn, Springer-verlag, Berlin, 1991.

[38] R. L, Scanning Electron Microscopy, Berlin, 1985.

[39] Internetinė prieeiga: http://tuttle.merc.iastate.edu/ee432/topics/metals/tlm_measurements.pdf.

[40] H. H. G.K. Reeves, Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements, 1982.

[41] Internetinė prieeiga: http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf.

[42] K. Harsha, Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films, 2006.

[43] Internetinė prieeiga: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1295.