

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Justinas Jorudas

ALIUMININIO GALIO NITRIDO – GALIO NITRIDO PETELIŠKĖS TIPO JUTIKLIAI
DAŽNIŲ SRIČIAI 0,1-0,6 THz

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Optoelektroninių medžiagų ir technologijų
studijų programa

Studentas

Justinas Jorudas

Leista ginti

2019-05-24

Darbo vadovas

dr. Irmantas Kašalynas

Instituto atstovas

prof. Vincas Tamošiūnas

Vilnius 2019

Turinys

Turinys	2
Santrumpos.....	3
Ižanga	4
1. Literatūros apžvalga	5
2. Bandiniai ir tyrimų metodai	8
2.1. AlGaIn/GaN HEMT struktūra ir jos juostinė struktūra.....	8
2.2. HEMT struktūrų charakterizavimo metodai	10
2.2.1. Holo metodas.....	10
2.2.2. Krūvininkų tankio voltfaradinis (C-V) profiliavimas.....	11
2.2.3. Skirtingo ilgio perdavimo linijų (TLM) metodas	12
2.3. Peteliškės tipo (BT) diodai	13
2.3.1. Sandara	13
2.3.2. BT diodų voltamperinės charakteristikos.....	14
2.3.3. THz spinduliuotės detekcija BT diodais	15
3. Rezultatai.....	18
3.1. Bandinių gamyba	18
3.2. Dvimačių elektronų dujų tyrimas	19
3.3. Ominių kontaktų ir peteliškės tipo diodų elektrinių savybių tyrimas	21
3.4. BT diodų jautrio tyrimai 0,1-0,6 THz ruože.....	24
Išvados	28
Šaltiniai	29
Priedas Nr. 1 Skaičiavimams naudojami medžiagų parametrai.....	32
SUMMARY	33

Santrumpos

2DEG – dvimatės elektronų dujos;

BT diodas – peteliškės tipo diodas;

CTLM – apskritiminės skirtingo ilgio perdavimo linijų metodas;

FL – fluorescencija;

HEMT – didelio elektronų judrio tranzistorinis;

IR – infraraudonieji spinduliai;

MOCVD – metalorganinis nusodinimas iš garų fazės

SD – Šotkio diodas

THz – terahercas – 10^{12} svyravimų per sekundę;

UV – ultravioletinė spinduliuotė;

VACH – voltamperinė charakteristika;

Ižanga

Teraherciniam (santr. THz) diapazonui priskiriama spinduliuotė nuo 0,1 THz iki 15 THz (3 mm – 20 μm; 0,41 meV – 62 meV; 3 cm⁻¹ – 500 cm⁻¹). Šiai THz spinduliuotei matuoti naudojami skirtingi jutikliai, iš kurių tik nedaugelis (pvz. mikrobolometrai, fotolaidžios antenos) yra jautrūs kambario temperatūroje ir yra pakankamai spartūs atlikti matavimams realiu laiku. Ypač svarbios yra technologijos, kurios tinka planariniams jutikliams ir jų masyvams kurti, nes tai leidžia atpiginti jutiklių gamybos kaštus bei greičiau užrašyti THz vaizdus panaudojant jutiklių matricas. Visus šiuos kriterijus atitinka peteliškės tipo (BT) diodai, kurių dizaine jutiklis yra integruotas su THz antena. BT diodai iki šiol buvo gaminami iš GaAs, InGaAs ir kitų puslaidininkių [1]–[7]. Neseniai pradėta tirti kaip BT diodus pagaminti iš aliuminio galio nitrido – galio nitrido (AlGaN/GaN) heterosandūrų, kuriose susidaro dvimatės elektronų dujos (2DEG). Lyginant su literatūroje aptinkama aliuminio galio arsenido – galio arsenido (AlGaAs/GaAs) medžiagų sistema, AlGaN/GaN sistema pasižymi didesniais krūvininkų tankiais 2DEG kanale, mažesnėmis elektronų energijos relaksacijos trukmėmis, didesniu mechaniniu ir cheminiu atsparumu.

Šio darbo **tikslas** – sukurti peteliškės tipo (BT) diodus ant AlGaN/GaN heterostruktūros, iširti šių diodų tinkamumą detektuoti THz spinduliuotę kambario temperatūroje dažnių ruože nuo 0,1 THz iki 0,6 THz.

Tikslui įgyvendinti iškelti **uždaviniai**:

1. sukurti BT diodus ant AlGaN/GaN heterostruktūros su 2DEG;
2. iširti 2DEG elektronų tankį, judrį, sluoksnio varžą, bei ominių kontaktų elektrines charakteristikas;
3. iširti BT diodo jautrio kitimą dėl kakliuko pločio, išorinės pastovios įtampos dydžio ir THz antenos tipo.

1. Literatūros apžvalga

Terahercinis (THz) diapazonas yra tarp optinio ir mikrobangų diapazonų. Panašiai, kaip ir IR (infraraudonoji spinduliuotė), THz yra elektromagnetinės bangos, kurių kvanto energija maža ir nejonizuojanti. THz spinduliuotei kai kurios medžiagos (pvz. dielektrikai) yra skaidrios taip, kaip ir mikrobangų ruožo elektromagnetinėms (EM) bangoms. Dėl nejonizacinės prigimties ir gebėjimo prasiskverbti į dielektrines medžiagas, THz diapazono spinduliuotė patraukli taikymams daugelyje sričių: medicinoje – audinių tyrimams [8, 9], apsaugoje – nuotoliniam ginklų, narkotinių medžiagų [10] ir sprogmenų aptikimui [11], pramonėje – kokybės kontrolei [12, 13] ir t.t.

Yra dvi išskirtinai THz diapazonui būdingos savybės, į kurias būtina atsižvelgti. Pirma, THz fotono energija ($\nu = 1 \text{ THz}$) $h\nu = 4 \text{ meV}$ yra gerokai mažesnė už šiluminę energiją kambario temperatūroje (300 K) $k_B T \approx 26 \text{ meV}$. Antra, vandens garai THz diapazone gerai sugeria EM bangas dėl daugybės vandens H₂O molekulės rotacinių svyravimų THz ruože [14].

THz spinduliuotei aptikti yra plačiai naudojami termoelektriniai jutikliai. Šios kategorijos vieni iš pirmųjų detektorių THz spektriniam ruožui buvo optoakustinis Golay celės jutiklis [15], silicio ar germanio bolometrai ir karštųjų krūvininkų indžio stibide bolometrai [16], [17]. Šie jutikliai leido sukurti ir išvystyti spektroskopines sistemas THz diapazonui [18]. Taip pat, termoelektrinių jutiklių kategorijai priskiriami piroelektriniai detektoriai, kuriuose piroelektrinės medžiagos (pvz. LiTaO₃) poliarizacija reaguoja į temperatūrą (sugertos spinduliuotės galią)[19]. Šie jutikliai gali būti itin jautrūs (optinis jautris piroelektriniam jutikliui ir Golay celei 10⁵ V/W eilės [19], [20]), detektuoja plačiame diapazone, tačiau detekcija vyksta netiesiogiai (per sugertos spinduliuotės galios sukeltus kaitimo procesus), todėl yra santykinai lėti (Golay celės atsakas dešimčių ms eilės, o piroelektrinio jutiklio iki μs). Naudojant planarines technologijas iš mikrobolometrų galima formuoti matricas, kuriose jutikliai yra iškart integruoti į antenas ir nuskaitymo grandines[21].

Atsiradus komerciniams femtosekundiniams lazeriams, buvo sukurti visiškai kitu principu veikiantys jutikliai, panaudojant dipolines antenas ant fotolaidininko (fotolaidžias antenas, angl. *photoconductive switches*) ir femtosekundinį lazerį. Pirmą kartą 1984-aisiais pristatytas būdas ultratrumpų impulsų generavimui ir detekcijai [22]. Fotolaidžios antenos plotą žadinant IR lazeriu generuojami laisvieji krūvininkai erdvėje tarp antenos elektrodo, pro anteną praeinantis THz spinduliuotės impulsas moduluoja įtampą ant fotolaidžios antenos elektrodo. Taip sukurama srovė grandinėje, prie kurios prijungta fotolaidi antena, priklausanti nuo įtampos moduliacijos tarp elektrodo. Matuojant šią srovę ir keičiant THz bei IR pulsų patekimo į fotolaidžią anteną laiką (vėlinimo linijos pagalba) išmatuojama THz impulso amplitudė bei fazė [23]. Plačiausiai naudojama medžiaga fotolaidžių antenų gamybai yra žematemperatūris GaAs (angl. santr. LT GaAs)[24].

Fotolaidžios antenos pačios gana kompaktiškos ir detektuoja plačiame THz dažnių diapazone, tačiau naudojimui yra būtinas femtosekundinis IR lazeris (pvz. $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) ir gan sudėtinga optinė sistema su THz generavimo, detekcijos ir vėlinimo linijomis.

Didžiulio susidomėjimo ne tik THz jutiklių, bet ir THz emiterių srityse sulaukė 1993-ųjų M. Dyakonov ir M. Shur darbas [25] kuriame pasiūlyta, kad lauko tranzistoriaus kanale esantiems elektronams galima pritaikyti seklaus vandens hidrodinaminio modelio analogą. Autoriai taip pat teigė, kad lauko tranzistoriaus kanale galima sukelti kolektyvinius 2DEG sužadinimus – plazmines bangas, kurių kvantas yra plazmonas. Plazminių bangų sužadinimu veikiančios jutikliai yra pavadinti – plazmoniniais. Pagal plazmines bangas tranzistoriaus kanale aprašančią hidrodinaminę teoriją, THz spinduliuotės žadinami plazmonai kuria ne tik kintamosios komponentės srovės signalą, bet ir pastovosios komponentės – lyginimo srovės signalą [26]. Šiuose darbuose pasiūlytas naujas detektavimo būdas susilaukė didelio susidomėjimo, tuo metu jau brandžioje silicio lauko tranzistorių tyrėjų bendruomenėje. Detekcijai siūlyti nanometrinių užtūros matmenų Si lauko efekto tranzistoriai [27], [28]. Šie jutikliai kompaktiški ir iš jų galima gaminti detektorių masyvus, tačiau ganėtinai brangus ir sudėtingas technologinis procesas atliekamas specializuotose gamylose (angl. *Foundaries*). Šie jutikliai pasižymi gana dideliu jautriu ($10^3 - 10^4$ V/W eilės), tačiau mažu atsparumu elektrostatiniams trikdžiams [29].

Kaip alternatyvą sudėtingiems plazmoniniams Si lauko tranzistorių jutikliams galima išskirti technologiškai paprastesnius ant puslaidininkio formuojamus THz spinduliuotės detektorius – peteliškės tipo (santr. BT) diodus panaudojant pavyzdžiui, asimetrinės formos $n-n^+$ GaAs sandūrą [1]. BT diodas gana nesudėtingos sandaros ominių kontaktų prietaisas, reikalaujantis tik dviejų fotolitografijos etapų – ominių kontaktų ir izoliacijos sričių formavimo. Jutiklio jautris yra $R = 0,3 \text{ V/W}$ eilės, nedaug kinta 0,03 – 0,7 THz dažnių diapazone ir detektuoja iki 1 W galios spinduliuotę. Darbe [1] autoriai, taip pat nurodo, kad jutiklio jautriui yra svarbūs medžiagos parametrai: krūvininkų judris μ , krūvininkų tankis N , t.y. savitoji puslaidininkio varža ρ . Vėliau pasiūlyta formuoti BT tipo jutiklius ant selektyviai legiruočių AlGaAs/GaAs heterosandūrų, kur tarp AlGaAs ir GaAs susiformuoja 2DEG sluoksnis [2], [3]. Nors pagamintų jutiklių jautris išlieka artimas - $R = 0,3 - 0,4 \text{ V/W}$, tačiau parodyta jutiklių veika iki 2,5 THz. Vėliau BT diodai įterpti į logaritmines – periodines antenas ant InGaAs [5] arba klasikinio dizaino BT diodo anteną ant InGaAs, kur antenos pagalba jautris padidinamas iki 10 V/W (dažniuose iki 1 THz) [4].

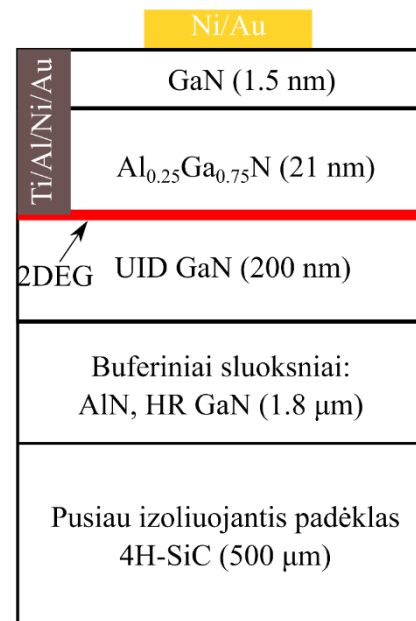
Lyginant su Si ar GaAs, GaN medžiagų šeimos medžiagos (InGaN, AlGaN ir keturnariai junginiai) pasižymi patraukliomis savybėmis – dėl didelio draustinio energijų tarpo (GaN - 3,4 eV) gali atlaikyti didelius išorinius elektrinius laukus, yra mechaniškai ir chemiškai atsparūs, elektronikos prietaisai gali dirbti aukštesnėse temperatūrose nei analogiški Si ar GaAs prietaisai. AlGaN/GaN

heterostrukūros, kuriose suformuojamas didelio elektronų judrį turintis 2DEG sluoksnis, įprastai vadinamos – HEMT (angl. *high electron mobility transistor*) struktūromis. Dėl pjezoelektrinių GaN ir AlGaN (viurcito struktūros) medžiaginių savybių suformuojamas 2DEG sluoksnis, kuriame elektronų tankis 5-10 kartų didesnis, nei selektyviai legiruotų AlGaAs/GaAs heterosandūrų. Tačiau lyginant su AlGaAs/GaAs, nitridiniuose HEMT elektronų judris kambario temperatūroje 3-4 kartus mažesnis. Dėl didelių krūvininkų tankių, gaunamų 2DEG sluoksniuose ir GaN savybių, tranzistoriniai THz detektoriai vis dar aktyviai tyrinėjami [30]–[34]. Šio darbo rašymo metu vieninteliai publikuoti BT diodų jutikliai ant AlGaN/GaN HEMT struktūros skirti THz spinduliuotei detektuoti buvo sukurti Terahercinės fotonikos laboratorijoje [35].

2. Bandiniai ir tyrimų metodai

2.1. AlGaN/GaN HEMT struktūra ir jos juostinė struktūra

Šiame darbe tirtos testinės struktūros ir BT diodai buvo kuriami ant AlGaN/GaN heterosandūros, kuri suformuota naudojant metalorganinio nusodinimo iš garų fazės (santr. MOCVD) metodą. Bandinio heterostruktūros schema parodyta 1 pav. Bandinyje ant pusiau izoliuojančio 4H-SiC padėklo ir 1,8 μm storio buferinių AlN ir Fe legiruoto didžiavaržio GaN sluoksnių užaugintas 200 nm savaime legiruotas (angl. *unintentionally doped* [santr. UID]) GaN sluoksnis ir 21 nm storio Al_{0,25}Ga_{0,75}N barjerinis sluoksnis, kuris paviršiuje pasyvuotas 1,5 nm GaN sluoksniu. Dvimačių elektronų dujų (2DEG) sluoksnis susiformuoja tarp barjerinio Al_{0,25}Ga_{0,75}N ir savaime legiruoto GaN sluoksnio. Taip pat, 1 pav. pavaizduoti ominiai ir Šotkio kontaktai, kurie sudaryti atitinkamai iš Ti/Al/Ni/Au ir iš Ni/Au sluoksnių.



1 pav. Tyrime naudojamą AlGaN/GaN heterostruktūrą sudarantys sluoksniai

HEMT struktūros juostinės diagramos modeliavimas buvo atliktas naudojant atviro kodo programą „1D Poisson“ sukurtą prof. Gregory Snider iš Notre Dame universiteto, kuri patalpinta asmeniniame puslapyje [36]. Ši programa leidžia išspręsti susietas Šredingerio (1) ir Puasono (2) lygtis parinktai struktūrai, naudojant baigtinių-skirtumų metodą (angl. *finite-difference method* - FDM):

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d}{dx} \right) \psi(x) + V(x)\psi(x) = E\psi(x), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\epsilon_s(x) \frac{d}{dx} \right) \phi(x) = \frac{-q[N_d(x) - n(x)]}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

čia ψ - banginė funkcija, E - energija, V - potencinė energija, \hbar - redukuota Planko konstanta, m^* - efektinė masė, ϵ_s - dielektrinė konstanta, ϕ - elektrostatinis potencialas, N_D - jonizuotų donorų koncentracija, n - elektronų tankio koncentracija. Jeigu yra ieškomas elektronų pasiskirstymas laidumo juostoje, tuomet potencinę energiją V galima sulygtinti su laidumo juostos energija. Neapibrėžtos formos kvantinei duobei, potencinė energija V su elektrostatiu potencialu ϕ susijusi per sąryšį:

$$V(x) = -q\phi(x) + \Delta E_c(x), \quad (3)$$

čia ΔE_c yra pseudopotencinė energija atsirandanti dėl laidumo juostų trūkio heterosandūroje. Banginė funkcija $\psi(x)$ iš lygties (1) ir elektronų tankis $n(x)$ iš lygties (2) gali būti susieti per:

$$n(x) = \sum_{k=1}^m \psi_k^*(x) \psi_k(x) n_k, \quad (4)$$

čia m - yra surištosios būsenos skaičius, n_k - elektronų užimtų būsenų skaičius. Elektronų koncentracija kiekvienai būsenai gali būti išreikšta:

$$n_k = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \int_{E_k}^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} dE, \quad (5)$$

čia E_k – tikrinė energijos vertė (angl. *eigenenergy*).

Programoje naudojamas iteracinis metodas, gauti susietiems sprendiniams tarp lygčių (1) ir (2). Pradedama su bandomuoju potencialu $V(x)$, tuomet naudojantis lygtimis (4) ir (5) apskaičiuojamos banginės funkcijos, jų tikrinės energijos, o iš jų galima apskaičiuoti elektronų tankio pasiskirstymą $n(x)$. Apskaičiuotas $n(x)$ ir duota donorų koncentracija $N_D(x)$ gali būti panaudota apskaičiuoti $\phi(x)$ naudojantis (2) lygtimi. $\phi(x)$ galima panaudoti lygtyje (3) ir apskaičiuoti naują potencinės energijos išraišką $V(x)$. Taip, iteraciniu metodu gaunami galutiniai susietieji sprendiniai $V(x)$ ir $n(x)$, kai pasiekiamas užbrėžtas paklaidos kriterijus.

Čia pristatytas pirminės programos versijos principinis veikimas neatsižvelgia į begalę sudėtingų skaitinių metodų naudojamų siekiant išspręsti daugelio lygčių sistemas matriciniais metodais. Taipogi, pirminė programa buvo sukurta klasikinėms III-V puslaidininkių struktūroms: AlGaAs/GaAs heterosandūroms, supergardelėms, kvantinėms duobėms ir t.t. Naujausiose programos versijose atsižvelgta į GaN šeimos medžiagoms svarbų parametą – poliarizaciją, kuri aktuali šiame darbe.

Į programos medžiagų katalogą įvedami norimos simuliuoti medžiagos parametrai dvinarėms medžiagoms, o trinarėms medžiagoms įvedami koeficientai visiems parametrams (E_g , ΔE_c , ϵ , m_e^* , m_h^* , μ_e , μ_h , τ_e , τ_h , P ir etc.), kurie aprašo trinario puslaidininkio savybes priklausomai nuo x dalies $A_xB_{1-x}C$ puslaidininkyje. Programoje galima naudoti tiek Vegardo dėsnio aprašomą parametro kitimą (tiesinį) tarp $(AB)_x$ ir $(BC)_{1-x}$ dvinarių medžiagų parametru, tiek kvadratinį, jei parametro kitimas nutolsta nuo tiesinio. Parametru Z , tai atrodytų taip:

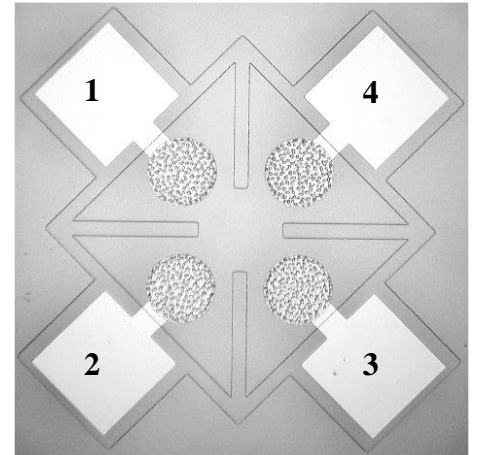
$$Z^{A_xB_{1-x}C}(x) = x \cdot Z^{AC} + (1 - x)Z^{BC} - \mathbf{b} \cdot x(1 - x) \quad (6)$$

čia b – aprašo nukrypimą nuo tiesiškumo ir yra vadinamas išlinkimo parametru (angl. *bowing parameter*). Priede Nr. 1 pateikiami naudojami medžiagų parametrai skaičiavimams.

2.2. HEMT struktūrų charakterizavimo metodai

2.2.1. Holo metodas

2DEG judris ir koncentracija nustatomi Holo eksperimentu naudojant van der Pauw (VDP) struktūra, kurios nuotrauka 2 pav. Prieš patalpinant VDP bandinį į magnetinį lauką, prie dviejų kontaktų prijungiamas srovės šaltinis (įprastai naudojamų srovių vertės pasirenkamos nuo $\sim 10 \mu\text{A}$ iki $\sim 10 \text{mA}$). Tarkime I_{12} ir matuojama varža tarp kontaktų R_{43} – supaprastinus žymėjimą $R_{12,43}$ (srovė tarp 1-2, varža tarp 4-3). Tuomet toks matavimas kartojamas visoms kombinacijos $R_{23,14}$, $R_{34,21}$, $R_{41,32}$, $R_{21,34}$, $R_{32,41}$, $R_{43,12}$, $R_{14,23}$.



2 pav. Tyrimė naudojamos VDP struktūros Holo matavimams

Tuomet apskaičiuojamos dvi charakteringos

varžos - $R_A = 0.25(R_{12,43} + R_{21,34} + R_{43,12} + R_{34,21})$ ir $R_B = 0.25(R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})$. Tuomet skaitiniais-iteraciniais metodais sprendžiama lygtis ir randama bandinio sluoksnio varža:

$$e^{-\pi R_A/R_s} + e^{-\pi R_B/R_s} = 1, \quad (7)$$

čia R_s – paviršinė sluoksnio varža.

Tuomet VDP bandinys dedamas į žinomo stiprio B magnetinį lauką, kuris yra lygiagretus bandinio paviršiaus normalei. Prie priešingų kontaktų prijungiama srovė, pvz. I_{13P} ir tarp kitų dviejų kontaktų matuojama įtampa, šiuo atveju V_{24P} . Toks matavimas kartojamas visoms 4 konfigūracijoms (laikant tą pačią srovę) – $I_{31P} - V_{42P}$, $I_{42P} - V_{13P}$, $I_{24P} - V_{31P}$. Šie 4 matavimai kartojami priešingai magnetinio lauko kryptčiai (vietoje P indekso yra rašomas N). Išmatavus 8 Holo įtampas apskaičiuojami tų pačių įtampų skirtumai esant skirtingiems poliarumams ($V_C = V_{24P} - V_{24N}$, $V_D = V_{42P} - V_{42N}$, $V_E = V_{13P} - V_{13N}$, $V_F = V_{31P} - V_{31N}$). Pagal šių skirtuminių įtampų sumos V_H ($V_H = V_C + V_D + V_E + V_F$) ženklą nusakoma ar tiriamas bandinys yra p ar n tipo. Krūvininkų tankis n_s tuomet apskaičiuojamas iš Holo įtampos V_H apibrėžimo:

$$n_s = \frac{I \cdot B \cdot 10^{-4}}{e |V_H|} [\text{cm}^{-2}], \quad (8)$$

čia daugiklis 10^{-4} naudojamas, jei išmatuotas magnetinio lauko stipris teslomis (T). Šio daugiklio naudoti nereikia, kai magnetinio lauko stipris matuojamas vėberiais kvadratiniam centimetrui (Wb/cm^2).

Apskaičiavus sluoksnio varžą R_s iš (7) lygties ir krūvininkų tankį n_s (kuris atitiks 2DEG koncentraciją) iš (8) formulės, galima apskaičiuoti krūvininkų judrį μ :

$$\mu = \frac{1}{en_s R_S}. \quad (9)$$

Holo matavimai atlikti su dr. Arūno Kadžio pagalba naudojantis VU FNI Holo matavimų stendu *Ecopia HMS-3000*.

2.2.2. Krūvininkų tankio voltfaradinis (C-V) profiliavimas

Krūvininkų tankio profiliavimo metodas – paremtas atgaline kryptimi įjungto puslaidininkinio prietaiso C-V charakteristikų matavimu, kai nuskurdinamos srities gylis priklauso nuo prijungtos įtampos. Šis metodas yra naudojamas Šotkio diodams, MOS kondensatoriams, MOS lauko tranzistoriams ir pan. tirti.

Prie Šotkio diodo prijungus pastovią įtampą yra sukuriama W pločio nuskurdinta sritis. Naudojant silpno signalo aproksimaciją, šio sluoksnio talpa apibūdinama:

$$C = \frac{dQ_m}{dV} = -\frac{dQ_s}{dV}, \quad (10)$$

čia Q_m ir Q_s metalo ir puslaidininkio krūviai.

Talpa yra nustatoma prie pastovios įtampos pridėjus mažos amplitudės kintamąją įtampą. Kintamosios įtampos dažnis įprastai naudojamas nuo 10 kHz iki 10 MHz, o amplitudė 10 – 20 mV, tačiau, gali būti naudojami ir kiti nustatymai.

Taigi prie diodo prijungus pastovią įtampą su mažu kintamosios amplitudės signalu metale susikuria krūvio pokytis dQ_m . Pusiausvyrai išlaikyti, puslaidininkio pusėje susikuria analogiškas priešingo ženklo krūvio pokytis dQ_s . Tuomet krūvis puslaidininkyje:

$$Q_s = eA \int_0^W (p - n + N_D^+ - N_A^-) dx \approx -eA \int_0^W N_A dx, \quad (11)$$

čia aproksimuojama, kad $N_D = 0$ ir $p \approx n \approx 0$ dėl nuskurdinimo.

Krūvio pokytis dQ_s atsiranda dėl nuskurdinimo srities pločio W pokyčio. Sujungus lygtis (10) ir (11) gauname:

$$C = -\frac{dQ_s}{dV} = -\frac{eA \int_0^W N_A dx}{dV} = -eA N_A(W) \frac{dW}{dV}. \quad (12)$$

Jei metalinį elektrodą, kurio plotas A , ir puslaidininkinę sandūrą laikysime plokščiuoju kondensatoriumi, tai:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_b A}{W}, \quad (13)$$

čia ϵ_b – puslaidininkio santykinė dielektrinė skvarba, A – puslaidininkio paviršiaus plotas. Diferencijuojant (13) išraišką įtampos atžvilgiu ir vietoje dW/dV įstačius (12) išraišką gauname:

$$N_A(W) = -\frac{C^3}{e\varepsilon_0\varepsilon_b A^2 dC(V)/dV}. \quad (14)$$

Pertvarkius (13) išraišką gauname nuskurdinimo srities pločio priklausomybę nuo išmatuotos talpos:

$$W = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_b A}{C}. \quad (15)$$

Todėl, išmatavus talpos C nuo pridėtos įtampos V charakteristiką ir įvertinus (14) ir (15) išraiškas galima nustatyti krūvininkų koncentracijos N_A priklausomybę nuo gylio W . Norint suskaičiuoti krūvininkų koncentraciją 2DEG kanale, skaičiuojamas apibrėžtinis integralas:

$$n_{2\text{DEG}} = \frac{1}{eA} \int_{U_{\text{th}}}^0 C dU, \quad (16)$$

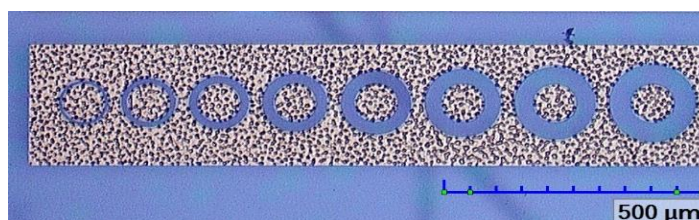
kur režis U_{th} – slenkstinė įtampa.

Svarbu paminėti, kad šiuo metodu išmatuojamas judriųjų krūvininkų profilis, t.y. mobilios skylės ar elektronai – krūviai, kurie juda kintamos įtampos lauke, bet ne akceptoriniai ar donoriniai jonai. Tai reiškia, kad iš voltfaradinių charakteristikų nustatomas efektyvus krūvininkų tankis, o ne legiravimo tankis. Tačiau, efektyvus krūvininkų tankis yra apytiksliai lygus pagrindinių krūvininkų tankiui, todėl šis metodas tinka įvertinti pagrindinių krūvininkų tankį puslaidininkyje [37]. Voltfaradinėms charakteristikoms išmatuoti naudota zondinė stotis *Cascade Microtech EPS150TRIAX* ir impedanso matuoklis *Agilent 4294A*.

2.2.3. Skirtingo ilgio perdavimo linijų (TLM) metodas

Kontakte tarp dviejų skirtingų medžiagų susidaro elektrinė varža, kuri vadinama kontakto varža R_c . Ominių kontaktų kokybę apibūdina nuo geometrijos nepriklausanti savitoji kontaktų varža ρ_c , kuri apibrėžiama, kaip vienetinio ploto kontaktinė varža, kuri matuojama omais kvadratiniam centimetrui [Ω/cm^2]. Šis dydis yra nustatomas naudojantis vienu iš kelių kontaktinės varžos nustatymo metodų. Šiame darbe naudotas apskritiminių kontaktų skirtingo ilgio perdavimo linijų metodas (angl. *circular transmission line method* [santr. CTLM]).

CTLM struktūros įprastai pagaminamos kartu su puslaidininkiniais prietaisais. Šiame darbe naudota CTLM struktūra parodyta 3 pav. Ominiai kontaktai pagaminti iš Ti/Al/Ni/Au sluoksnių lydinio atkaitinto 830 °C temperatūroje 30 s. Centrinio kontakto skersmuo vienodas – $L = 80 \mu\text{m}$, o atstumas tarp centrinio kontakto ir išorinio kontakto d yra didėjantis — $d=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ ir $40 \mu\text{m}$.



3 pav. CTLM struktūros nuotrauka. Atstumas tarp centrinio ($\varnothing 80 \mu\text{m}$) ir išorinio kontakto kinta nuo 5 iki 40 μm (iš kairės į dešinę)

Išmatavus varžą tarp kiekvieno centrinio kontakto bei išorinio rėmelio ir atvaizdavus varžos priklausomybę nuo atstumo d gauname priklausomybę, kurią galima aprašyti tiesės lygtimi:

$$R_T = \frac{R_s}{2\pi L} (d + 2L_T) \cdot C, \quad (17)$$

čia R_s – paviršinė varža, d – atstumas tarp centrinio ir išorinio kontakto, L_T – krūvininkų pernašos atstumas, L – apskritimo spindulys, C – pataisos koeficientas, kuris CTLM metodikoje aprašomas tokia funkcija: $C = (L/d) \cdot \ln(1+d/L)$ [38]. Pataisa reikalinga kompensuoti skirtumui dėl apskritos kontaktų geometrijos [39] (4 pav.). Krūvininkų pernašos atstumas L_T yra dydis nusakantis vidutinį kelią, kurį krūvininkas nukeliauja puslaidininkyje iki kol patenka į kontaktą.

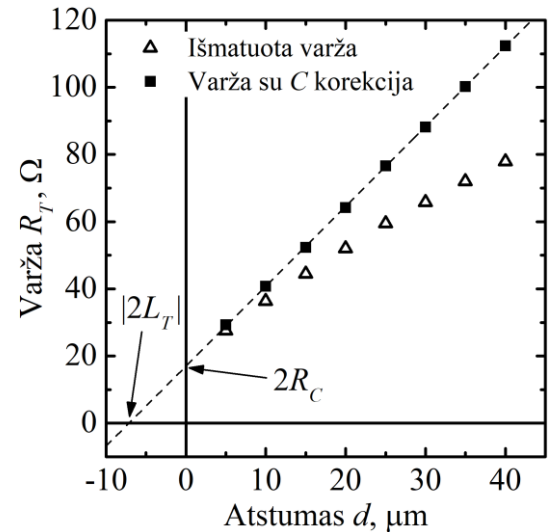
Iš varžos R_T priklausomybės nuo atstumo d , nustatomi parametrai R_c , L_T , ρ_c , R_s . Iš tiesės susikritimo su ordinačių ir abscisių ašimis taškų nustatomi dydžiai R_c ir L_T (4 pav.). R_s apskaičiuojamas iš tiesės pasvirimo į abscisių ašį kampo naudojantis (17) formule. Savitoji kontaktų varža apskaičiuojama naudojantis sąryšiu:

$$\rho_c = L_T^2 \cdot R_s. \quad (18)$$

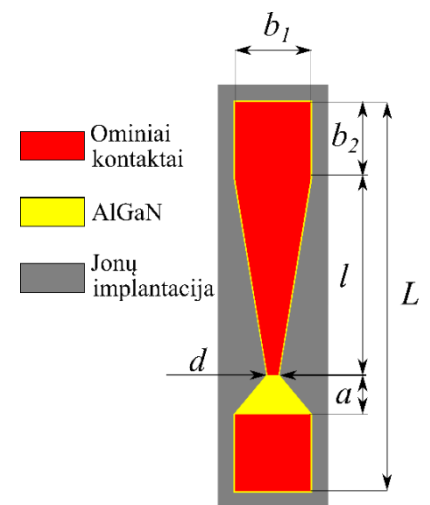
2.3. Peteliškės tipo (BT) diodai

2.3.1. Sandara

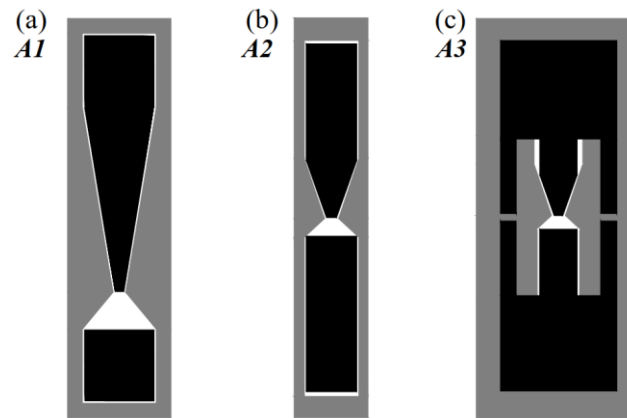
5 pav. parodyta principinė BT diodo struktūra. Diodą sudaro trys dalys [40]: raudona spalva yra pažymėti ominiai kontaktai, iš kurių ilgasis trapecijos formos kontaktas koncentruoja THz spinduliuotę į aktyviąją dalį – susiaurintą puslaidininkio (AlGaIn/GaN) sritį, kuri pažymėta geltona spalva. BT diodo trapecijos forma ir izoliacija nuo kitų elektronikos komponentų gaunama formuojant mezas kuomet puslaidininkio nereikalingi sluoksniai nuėsdinami (pvz. plazminio ėsdinimo būdu) arba sugadinami (pvz. atliekant jonų implantaciją). Šiame darbe tiriami BT diodai, kurių kakliukų pločiai d varijuoja intervale nuo 2 μm



4 pav. Pataisos funkcijos C įtaka CTLM duomenims ir iš tiesės lygties nustatomi parametrai L_T ir R_c



5 pav. Peteliškės tipo diodo schema

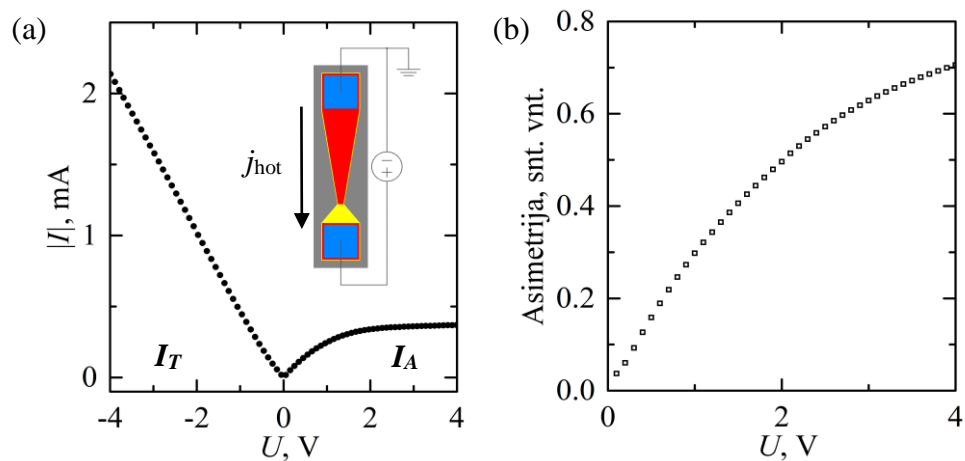


6 pav. Schematiniai darbe ištirtų BT diodų antenų dizainai: a) įprastas BT diodas A1, b) BT diodas integruotas su dipoline antena A2, c) BT diodas integruotas su H-tipo antena A3. Balta spalva žymi dvimačių elektronų dujų sritį, pilka spalva žymi elektrinio izoliavimo sritį, juoda spalva žymi ominių kontaktus.

iki $17 \mu\text{m}$. Parenkant BT diodų matmenis – $b_{1,2}$, l , a , jutiklius pavyko integruoti į skirtingas THz antenas (6 pav.) siekiant optimizuoti BT diodinio jutiklio jautrį pasirinktame dažnių ruože.

2.3.2. BT diodų voltamperinės charakteristikos

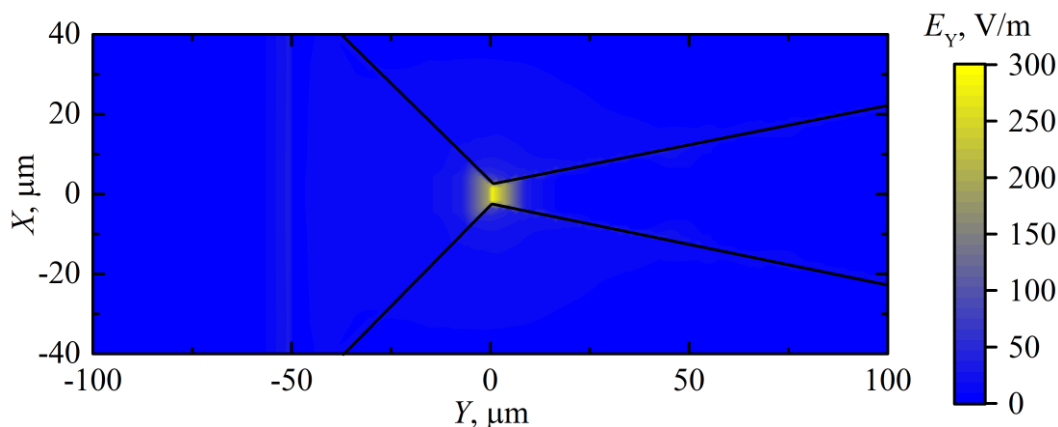
Peteliškės tipo diodo voltamperinė charakteristika parodyta 7 pav. a. Karštųjų krūvininkų kuriama difuzinė srovė (kryptis nurodyta 7 pav. a intarpe) nepriklauso nuo pridėto išorinio lauko krypties, dėl ko BT diodas pasižymi asimetrine voltamperine charakteristika (7 pav. a), skirtingai nuo diodų, kurių veikimas paremtas bigradientiniu reiškiniu [1]–[3]. Diodo veikimui kaip jutikliui svarbus yra jo voltamperinės charakteristikos asimetriškumas. Asimetrijos faktorius užduotai įtampai BT diodams apskaičiuojamas, kaip $A = |I_T| - |I_A| / |I_T| + |I_A|$ [4]. Asimetrijos faktoriaus priklausomybė nuo pridėtos įtampos parodyta 7 pav. b. Ominių kontaktų ir BT diodų voltamperinėms charakteristikoms išmatuoti naudota zondinė stotis *Cascade Microtech EPS150TRIAX* ir įtampos/srovės šaltinis/matuoklis *Keithley 2400*.



7 pav. Pavyzdinės BT diodo: a) voltamperinė charakteristika b) iš voltamperinės charakteristikos apskaičiuojamas asimetrijos faktorius. I_T žymi tiesioginio jungimo kryptį, I_A – užtvarinio jungimo kryptį ($I_T > I_A$). Intarpe parodyta BT diodo įjungimo į matavimo grandinę schema ir karštųjų krūvininkų kuriamos difuzinės srovės kryptis

2.3.3. THz spinduliuotės detekcija BT diodais

Peteliškės tipo diodą apšvietus THz spinduliuote susidaro nevienalytis krūvininkų kaitimas diodo kakliuko srityje, kuris generuoja elektrovaros jėgą. Susidarantis vidinio elektrinio lauko gradientas (8 pav.) bandinyje priklauso nuo susiaurintos puslaidininkinės srities geometrijos, kakliuko pločio ir krūvininkų judrio.



8 pav. Elektrinio lauko pasiskirstymo modeliavimas į peteliškės tipo diodą krentant 0,13 THz dažnio spinduliuotei statmenai paviršiui. Kakliuko plotis – 5 μm. Spalvų skalė žymi elektrinio lauko stiprį Y kryptimi, matuojamą V/m

Peteliškės tipo diodų, kaip THz spinduliuotės jutiklių, charakterizavimas atliekamas diodą patalpinant į kvazi-optinę sistemą, kurioje naudotas THz spinduliuotės šaltinis iš *Virginia Diodes* (*VDI*). Stendo schema parodyta 9 pav. Šaltinio *VDI* spinduliuotė kolimuojama HDPE (angl. *high density polyethylene*) lęšiu *L* ir dviejų veidrodžių pagalba (plokščio *V* ir 2“ ir 10 cm židinio nuotolio neašinio parabolinio veidrodžio *PV*) nukreipiama į THz jutiklį *J* (BT diodą). Neašinio parabolinio veidrodžio židinio plokštumoje atliekamas sufokusuotos THz spinduliuotės X-Y (žr. 9 pav.) rastrinis skenavimas, o THz spinduliuote indukuotas signalas registruojamas sinchroninio stiprintuvo *Signal Recovery 7265* pagalba. THz spinduliuotės šaltinis elektriškai moduluojamas 2,7 kHz dažniu. Tokiu atveju spinduliuotės jutiklio jautris *R* (angl. *responsivity*) apibrėžiamas, taip[40]:

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\int U_d dS_p}{P_{\text{spind}} S_d} \quad (19)$$

čia U_d – iš sinchroninio stiprintuvo nuskaityta detektuota įtampa (signalas), dS_p – rastrinio skenavimo taško plotas, P_{spind} - THz spinduliuotės galia. S_d yra sufokusuotos THz pluošto dėmelės plotas, kuriam aprašyti panaudotas difrakciškai bangos ilgio ribojamas plotas (su S_d gaunamas konservatyvus R įvertis):

$$S_d = \frac{\pi}{4} \lambda^2. \quad (20)$$

Jei kartu su jutikliu yra naudojamas spinduliuotę fokusuojantis elementas, kaip Si nupjauto pusrutulio formos lęšis ar difrakcinė zoninė plokštelė, tai jutiklio jautriui įvertinti naudojamas optinis jautris R_{opt} [41]. Skaičiuojant optinį jautrį, naudojama iš sinchroninio stiprintuvo detektuotos įtampos (signal) maksimali vertė U_{maks} :

$$R_{\text{opt}} = \frac{\pi U_{\text{maks}}}{\sqrt{2} P_{\text{spind}}} \quad (21)$$

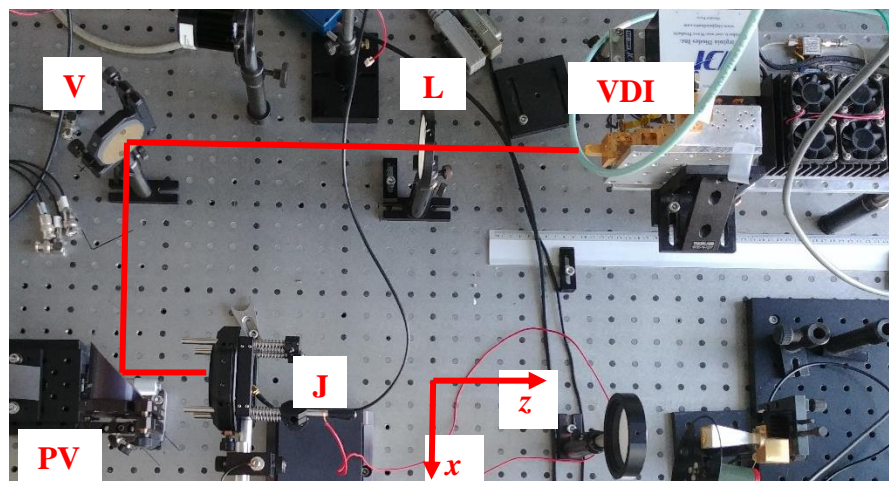
kuri surandama rastrinio skenavimo būdu fokusuojančio elemento židinio plokštumoje.

Kitas detektoriaus kokybę apibūdinantis dydis – ekvivalentinė triukšmo galia (angl. *noise equivalent power*, santr. *NEP*). Tai yra spinduliuotės galia, kuriai detektoriaus signalo ir triukšmo santykis vienetiniame dažnių juostos plotyje yra lygus vienetui. Jei nėra prijungtas priešįtampis, tai BT diodo triukšmas yra ekvivalentiškas jo vidinei varžai R_{DC} generuojamam šiluminiam triukšmui. Tuomet, NEP išreiškiamas, kaip:

$$NEP = \frac{\sqrt{4k_{\text{B}}TR_{\text{DC}}}}{R_{\text{opt}}} \quad (22)$$

čia k_{B} – Boltzmano konstanta, T – temperatūra, R_{DC} – BT diodo vidinė varža.

Peteliškės tipo diodų detekcija iširta ir VACH darbinio taško atžvilgiu, t.y. nuo išorinės pastovios įtampos postūmio. Šiam eksperimentui yra naudojamas pastovios įtampos/srovės šaltinis bei matuoklis *Keithley 2400* (U_{K2400}), varžinis įtampos daliklis ir sinchroninis stiprintuvas *Signal Recovery 7265*. Eksperimento ekvivalentinė grandinė pavaizduota 10 pav. Varžinio įtampos daliklio grandinė susideda iš apkrovos varžos R_{ap} ir jai nuosekliai prijungto BT diodo, kuris grandinėje atvaizduotas dviem elementais: varža R_{BT} ir aukštadažnio signalo šaltiniu S_{BT} . Eksperimento metu atsakas registruojamas el. grandinės taške S sinchroniniu stiprintuvu. Pirmiausia naudojantis įtampos šaltiniu/matuokliu K_{2400} išmatuojama daliklio grandinės voltamperinė charakteristika $I(U_{\text{K2400}})$, iš kurios pagal įtampos daliklio formulę apskaičiuojama įtampa tenkanti BT diodui U_{BT} :



9 pav. Terahercinio vaizdinimo stendas naudojamas BT diodų optoelektroniniam charakterizavimui. VDI – spinduliuotės šaltinis, L – HDPE lęšis kolimuojantis šaltinio spinduliuotę, V – veidrodis, PV – 10 cm židinio nuotolio, 2“ skersmens neašinis parabolinis veidrodis, J – jutiklių masyvas

$$U_{BT} = U_{K2400} \frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_{ap}} = U_{K2400} \frac{R_{dal} - R_{ap}}{R_{dal}} = U_{K2400} \frac{\frac{U_{K2400}}{I} - R_{ap}}{\frac{U_{K2400}}{I}}, \quad (23)$$

čia U_{dal} – įtampos šaltinio K_{2400} įtampa, I – išmatuota srovė įtampos daliklyje naudojamai išorinei postūmio įtampos U_{K2400} vertei, R_{dal} – iš išmatuotos daliklio $I(U_{K2400})$ priklausomybės apskaičiuojama varža, kuri naudojama R_{BT} apskaičiuoti, laikant, kad $R_{ap} = \text{const}$. Siekiant apsaugoti sinchroninį stiprintuvą šaltinio įtampa yra ribojama iki 10 V.

Po daliklio VACH matavimo, tame pačiame įtampų režyje atliekamas iš daliklio sinchroniniu stiprintuvu registruojamo signalo S matavimas keičiant išorinės įtampos dydį. Kadangi sinchroninio stiprintuvo atžvilgiu apkrovos varža ir BT diodas sujungti lygiagrečiai, todėl jo atžvilgiu grandinės varža R lygi:

$$R = \frac{R_{ap} \cdot R_{BT}}{R_{ap} + R_{BT}}. \quad (24)$$

Srovės tekančios per apkrovos varžą šakoje ir BT diodą lygios (lygiagretus jungimas), todėl tekančią srovę galime išreikšti, kaip BT diodo kuriamos elektrovaros S_{BT} santykį su jos varža R_{BT} :

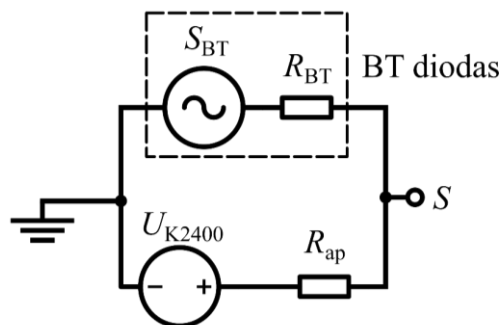
$$I = I_{BT} = I_{ap} = \frac{S_{BT}}{R_{BT}}. \quad (25)$$

Naudojantis (25) išraiška, sinchroniniu stiprintuvu registruotą signalą S galima susieti su BT diodo kuriama elektrovara/signalu S_{BT} :

$$S = R \cdot I = \frac{R_{ap} \cdot R_{BT}}{R_{ap} + R_{BT}} \cdot \frac{S_{BT}}{R_{BT}} = \frac{R_{ap}}{R_{ap} + R_{BT}} \cdot S_{BT}. \quad (26)$$

Pertvarkant (26) formulę galima išreikšti THz apšviesto BT diodo kuriamą elektrovarą per eksperimentiškai išmatuotą signalą S :

$$S_{BT} = S \cdot \frac{R_{ap} + R_{BT}}{R_{ap}} = S \cdot \frac{R_{dal}}{R_{ap}}. \quad (27)$$



10 pav. BT diodų detekcijos priklausomybės nuo postūmio įtampos eksperimento ekvivalentinė elektrinė grandinė. U_{2400} – įtampos šaltinis/matuoklis naudojamas išorinės įtampos postūmiui, R_{ap} – įtampos daliklio apkrovos varža, R_{BT} – BT diodo varža, S_{BT} – 0,15 THz apšviesto BT diodo kuriamas signalas (elektrovara), S – sinchroniniu stiprintuvu registruojamas visos grandinės signalas (įtampa)

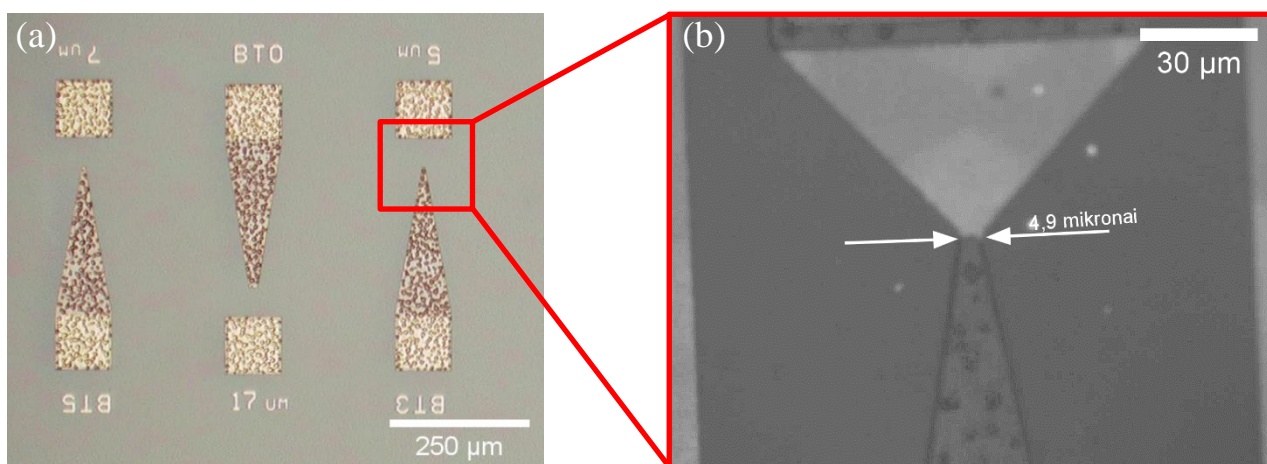
3. Rezultatai

3.1. Bandinių gamyba

Šiame darbe tirtos testinės struktūros ir BT diodai buvo suformuoti ant AlGaIn/GaN heterostruktūros naudojant standartinės optinės fotolitografijos metodiką ISO5 švaros klasės PFI APC patalpose. Pirmiausia ant bandinio formuojamas ominių kontaktų piešinys, kuris metalizuojamas elektronų pluošto garinimo (angl. *electron-beam physical vapour deposition*) pagalba. Ominius kontaktus sudaro titano, aliuminio, nikelio ir aukso (Ti/Al/Ni/Au) sluoksniai. Galutinis žingsnis ominių kontaktų formavime – užgarintų metalų sluoksnių atkaitinimas greito atkaitinimo krosnyje 830°C temperatūroje azoto atmosferoje. Ominių kontaktų formavimą seka elektrinis izoliavimas. Pagal fotošablona, izoliavimas pasiekiamas 700 keV Al⁺ jonų implantacija (FTMC Branduolinių tyrimų skyrius, Savanorių pr. 231) ir bandinio atkaitinimu 500°C temperatūroje. Galiausiai formuojamas Šotkio kontaktų piešinys, kuris metalizuojamas nikelio ir aukso (Ni/Au) metalais elektronų pluošto garinimo metodu. Darbo metu buvo pagaminti A1, A2, A3 antenų tipų (6 pav.) peteliškės tipo diodai, apskritiminių skirtingo ilgio perdavimo linijų masyvai (3 pav.), Šotkio diodai, van der Pauw (VDP) struktūros (2 pav.) ir kiti prietaisai.

Jonų implantacijos metu izoliuojamos puslaidininkio sritys yra stipriai pažeidžiamos, tačiau kaip matyti iš 11 pav. a, optiniu mikroskopu jonais implantuotos sritys nepastebimos. Norint patikrinti jonais implantuotas AlGaIn/GaN sritis reikia naudoti papildomą apšvietimą, kurio energija didesnė nei GaN draustinių energijų tarpas. Taip FL mikroskopu galima stebėti jonais implantuotas puslaidininkio sritis (jonais implantuotos sritys turėtų būti tamsios, t.y. ne fluorescuoti).

Su dr. G. Kreizos (VU Fotonikos ir nanotechnologijos instituto Organinės optoelektronikos grupė) pagalba naudojant optinį mikroskopą Olympus BX51 ir išorinį metalo halidų lempos apšvietimo šaltinį kartu su optiniais filtrais bandiniai buvo apšviečiami spinduliuote, kurios bangos

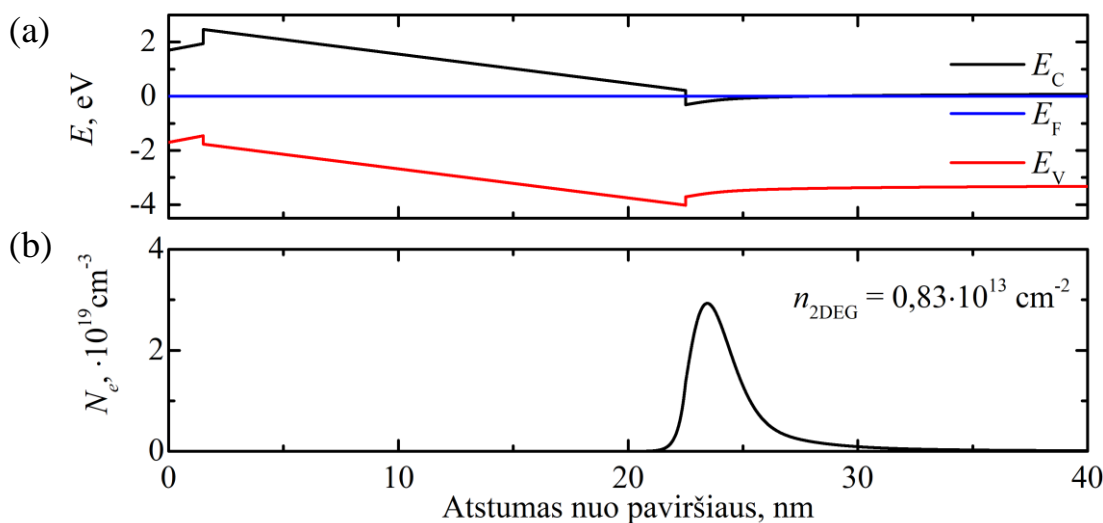


11 pav. Jonais implantuotų sričių vizualizavimas: a) optinio mikroskopo nuotrauka su pagamintais peteliškės tipo diodais, b) UV žadinimo fluorescencijos nuotrauka 5 μm dizaino peteliškės tipo diodui. Tamsios sritys žymi jonais implantuotas zonas, šviesios – nepažeistą AlGaIn/GaN

ilgis 330 – 380 nm (energija - 3,75 -3,26 eV). Pavyzdinė jonų implantacijos izoliacijos nuotrauka 5 μm kakliuko dizaino peteliškei parodyta 11 pav.

3.2. Dvimačių elektronų dujų tyrimas

Naudojantis 1 priede pateiktais medžiagų parametrais ir atvirojo kodo programa „1D Poisson“, buvo apskaičiuota HEMT struktūros juostinė diagrama bei elektronų pasiskirstymas, kurie parodyti 12 pav. Iš apskaičiuotų elektronų pasiskirstymų gauti teoriniai dvimačių elektronų dujų tankiai surašyti 1 lentelėje.



12 pav. Darbe naudojamos $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT struktūros modeliavimo rezultatai: (a) juostinė diagrama, (b) elektronų tankio pasiskirstymas (paveikslėlyje pateiktas 2DEG tankis, gaunamas integruojant N_e tankio priklausomybę atžvilgiu atstumo nuo paviršiaus)

Naudojantis Holo eksperimento rezultatais, apskaičiuoti: krūvininkų tankis $n_{2\text{DEG}}$, paviršinė sluoksnio varža R_s ir krūvininkų judris μ 2DEG kanale. Rezultatai pateikti 1 lentelėje. Iš išmatuotų Šotkio diodų (analogiški 3 pav. CTLM masyvui, tik centriniai kontaktai - Šotkio) voltfaradinių charakteristikų gauti 2DEG sluoksnio gyliai ($d_{2\text{DEG}}$), tiek apskaičiuotos 2DEG sluoksnio krūvininkų koncentracijos ($n_{2\text{DEG}}$) pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Tiriamos heterostrukūros 2DEG parametrai

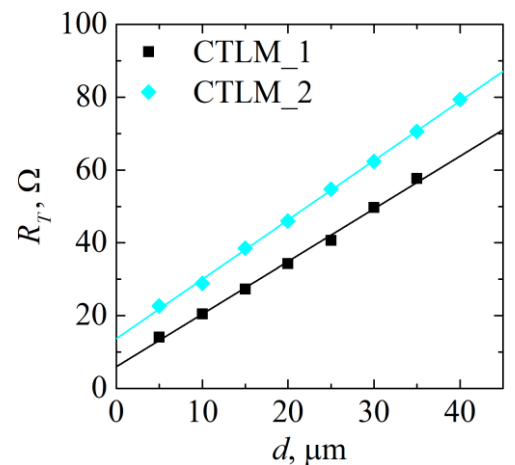
	Holas (300 K)	Holas (77 K)	C-V (300K)	Modeliavimas
$d_{2\text{DEG}}$, nm	—	—	21	23
$n_{2\text{DEG}}$, $\cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	9,8	8,7	7,4	8,3
R_s , Ω/kv .	340	38	—	
μ , $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$	1860	18960	—	

Integruojant 12 pav. b pavaizduotą elektronų tankio vertę per atstumą nuo paviršiaus apskaičiuota, jog teoriniu modeliavimu gaunamas $8,3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ koncentracijos 2DEG kanalas. Ši vertė yra 15% mažesnė, nei eksperimentinė. Tokio dydžio nesutapimai galimi, dėl naudojamos struktūros nežymių nesutapimų su auginimo protokolu – nedidelis Al kiekio barjere nuokrypis, gradientinių medžiagų pasiskirstymų sluoksnių sandūrų riboje ir t.t.

Lyginant Holo ir C-V profiliavimo metodais gautas kambario temperatūros $n_{2\text{DEG}}$ vertes, bandiniui U56 jos skiriasi 1,3 karto. Iš Holo matavimų gaunamas 2DEG tankis yra didesnis nei C-V profiliavimo atveju, dėl skirtingų 2DEG būsenų matavimo metu. C-V atveju yra profiliuojamas krūvininkų tankis po Šotkio kontaktu (angl. *gated*). Šotkio kontaktinis potencialas veikia heterosandūros potencialo duobę – ši tampa seklesnė, todėl gaunamas mažesnis krūvininkų tankis. nei Holo matavimų atveju naudojant VDP bandinius [42]. Kadangi iš voltfaradinių matavimų nustatomo $d_{2\text{DEG}}$ tikslumas yra keletas (1-2 nm), tai gauta 21 nm 2DEG gylio vertė gerai sutampa su auginimo protokole nurodyta 22,5 nm barjerinio sluoksnio storio verte. Lyginant kambario ir skysto azoto temperatūrose atliktų Holo matavimų rezultatus gauta, kad krūvininkų judris padidėja, o sluoksnio varža sumažėja per eilę. Tai rodo, kad naudojamos aukštos kokybės HEMT struktūra, pasižyminti mažu elektronų sklaidymu.

3.3. Ominių kontaktų ir peteliškės tipo diodų elektrinių savybių tyrimas

Ant bandinio buvo pagamintos šešios CTLM struktūros. Išmatuotos pasirinktų CTLM struktūrų R_T varžos priklausomybės nuo atstumo d parodytos 13 pav. Jame galima matyti, kaip atrodo labiausiai besiskiriančios R_T priklausomybės nuo atstumo d bandinyje. Aproximavus matavimo rezultatus tiesėmis apskaičiuoti dydžiai R_s , R_c , L_T , ρ_c , kurių vidurkiai kartu su standartiniais nuokrypiais pateikiami 2 lentelėje (6 verčių imtis). Remiantis gauta savitosios kontaktų varžos verte, galima teigti jog suformuoti mažos apie $1,1 \pm 0,3 \Omega \cdot \text{mm}$ savitosios kontaktų varžos kontaktai.



13 pav. Pavyzdinės CTLM masyvų varžos R_T priklausomybės, nuo atstumo tarp kontaktų d

2 lentelė. Parametrai nustatyti CTLM metodu

Parametras	Vertė
$R_c, \Omega \cdot \text{mm}$	$1,1 \pm 0,3$
$L_T, \mu\text{m}$	$2,8 \pm 0,8$
$R_s, \Omega/\text{kv.}$	386 ± 39
$\rho_c, \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$	$(3,4 \pm 2,2) \cdot 10^{-5}$

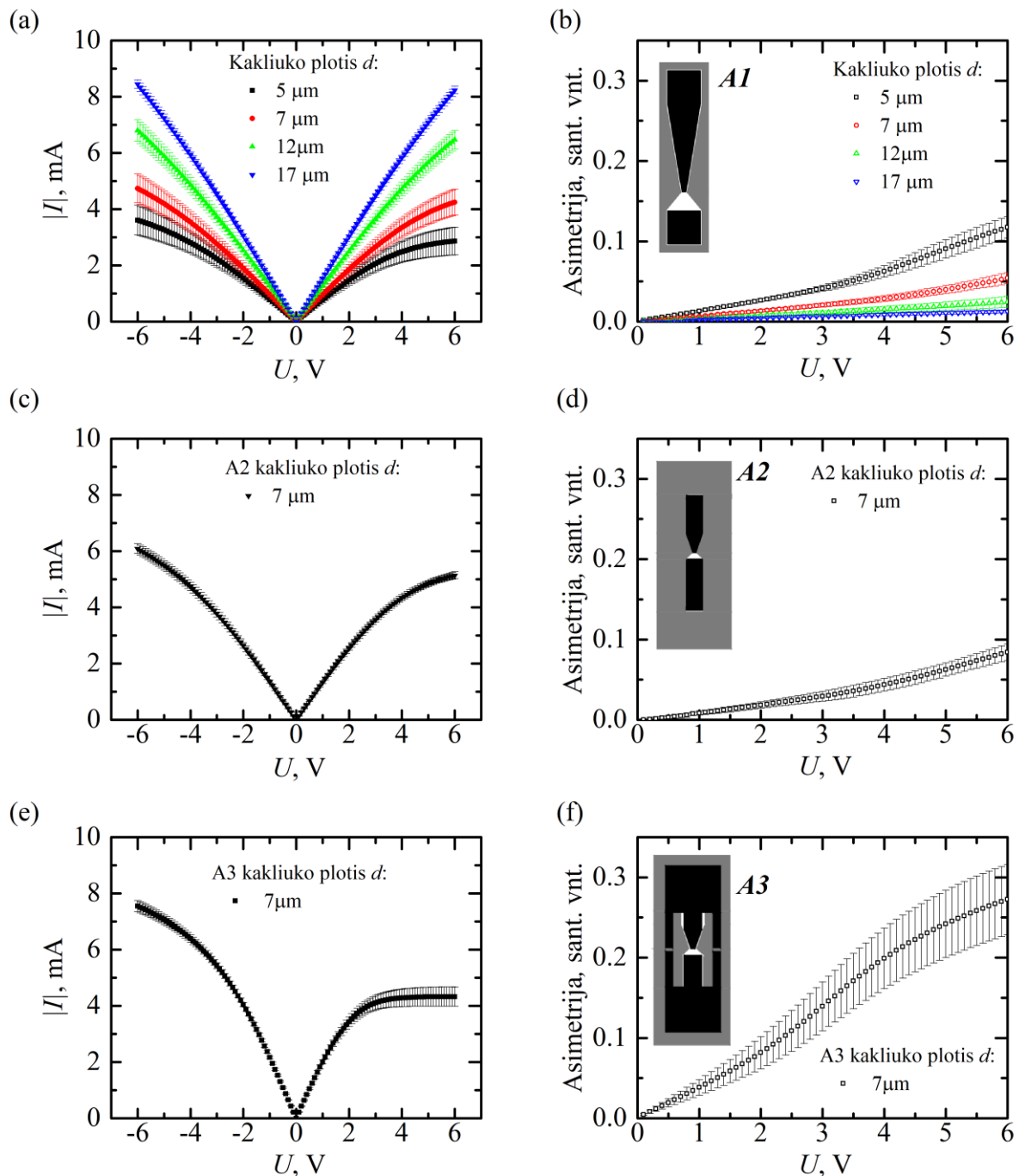
Atlikus ominių kontaktų charakterizavimą, pereita prie BT diodų voltamperinių charakteristikų matavimo. Bandinyje po visų litografijos procesų buvo suformuoti trys jutiklių masyvai:

1. trisdešimt aštuonių antenos A1 BT diodų (6 pav. a) masyvus, kuriame diodai skyrėsi kakliuko pločiu – $2 \mu\text{m}$ (8 vnt.), $5 \mu\text{m}$ (8 vnt.), $7 \mu\text{m}$ (8 vnt.), $12 \mu\text{m}$ (8 vnt.), $17 \mu\text{m}$ (6 vnt.);
2. aštuonių A2 antenos tipo BT diodų (6 pav. b) masyvus
3. penkiolikos A3 antenos tipo BT diodų (6 pav. c) masyvus

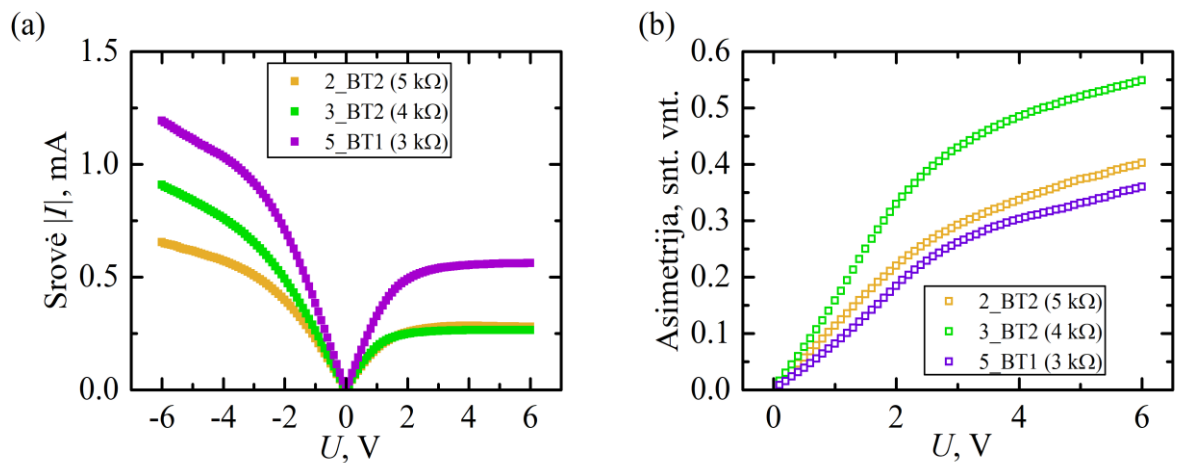
Išmatuotų BT diodų voltamperinių charakteristikų vidurkiai ir iš jų apskaičiuoti asimetrijos faktorių vidurkiai yra parodyti 14 pav. Pirmiausia - iš 14 pav. b atvaizduotų antenos A1 tipo BT diodų asimetrijos kreivių matyti, kad asimetrijos faktorius didėja siaurėjant peteliškės kakliuko pločiui. 14 pav. d pateiktos vertės A2 antenos tipo BT diodų asimetrijos koeficiento vertės yra artimos 14 pav. b pateiktoms BT diodų asimetrijos koeficiento vertėms.

Atskirai 15 pav. a ir b yra pateiktos kelių A1 tipo antenos $2 \mu\text{m}$ kakliuko dizaino BT diodų voltamperinės charakteristikos. Srovės vos siekia 1 mA, o varžos lyginant su to pačio dizaino $5 \mu\text{m}$ kakliuko pločio diodais yra bent 3 kartus didesnės. Galimas paaiškinimas – jonais izoliuojamų zonų

gamybos metu susiaurėję peteliškių kakliukai, dėl per ilgo ryškinimo ar eksponavimo UV fotolitografijos metu ar implantuotų jonų migracijos atkaitinimo metu.

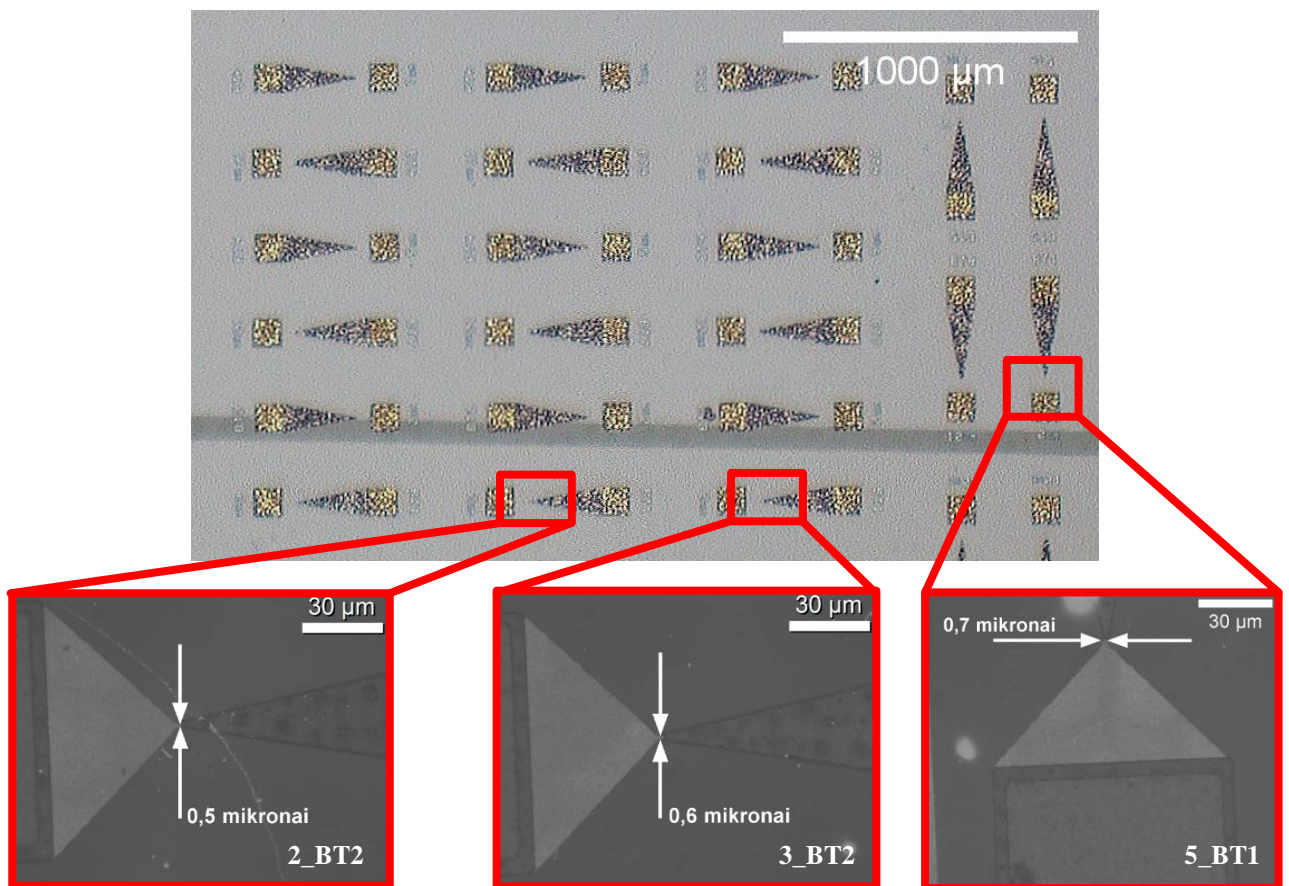


14 pav. Peteliškės tipo diodų charakteristikų vidutinės vertės su vidutiniais standartiniais nuokrypiais: a) A1 antenos tipo BT diodų voltamperinės, b) asimetrijos (įtarpė diodo dizaino paveikslėlis), c) A2 antenos tipo BT diodų voltamperinės, d) asimetrijos (įtarpė diodo dizaino paveikslėlis), e) A3 antenos tipo BT diodų voltamperinės, f) asimetrijos (įtarpė diodo dizaino paveikslėlis)



15 pav. Pavyzdinės 2 μm kakliuko BT1 ir BT2 diodų (BT1 ir BT2): a) voltamperinė charakteristika, b) asimetrijos faktoriaus priklausomybė nuo išorinės įtampos.

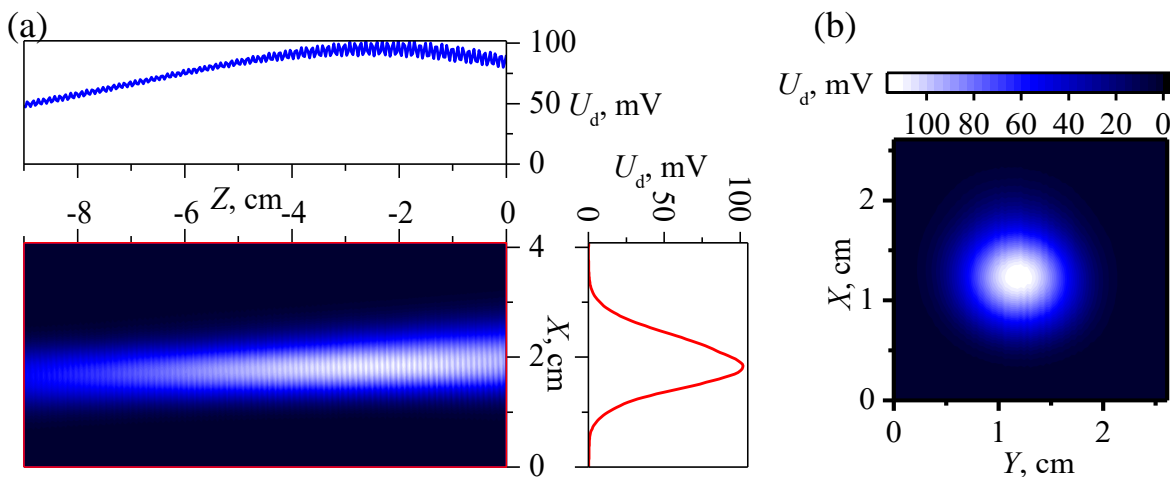
BT diodų, kurių charakteristikos 15 pav., nuotraukos yra parodytos 16 pav. Iš jų matyti, kad gamybos metu gautos izoliacijos sritys išplitusios – peteliškės tipo diodų kakliukai susiaurėję. 2 μm dizaino kakliukai susiaurėję iki mažiau nei 1 μm dydžio sritys, kurių tikslūs matmenys surašyti 16 pav. Šių BT diodų varžos surašytos 15 pav. a, atitinka kakliukų dydžius – 2_BT2 diodo su mažiausiu kakliuko pločiu (0,5 μm) varža yra didžiausia (5 k Ω) ir atvirkščiai.



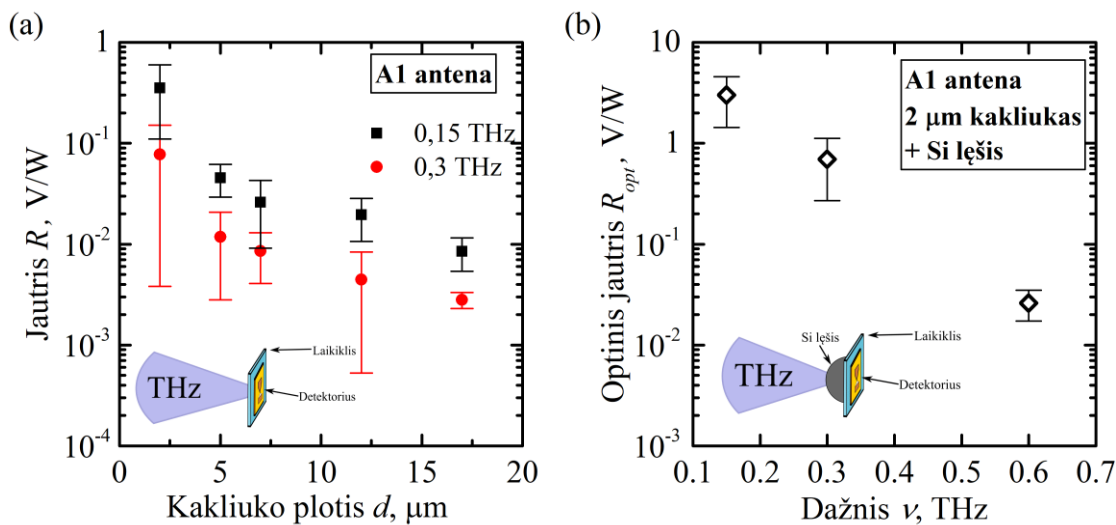
16 pav. Bandinio U56 trijų 2 μm dizaino peteliškės tipo diodų nuotraukos naudojant UV apšvietimą. Tamsesnės sritys atitinka jonais implantuotas sritys, o šviesesnės – neimplantuotas puslaidininkio sritys. Nuotraukose surašyti diodų identifikaciniai pavadinimai ir suformuotų kakliukų pločiai

3.4. BT diodų jautrio tyrimai 0,1-0,6 THz ruože

Prieš jutiklių jautrio charakterizavimą buvo išmatuotas VDI šaltinio spinduliuojamas galios srautas pasirinktuose dažniuose naudojantis absoliučios galios matuokliu *Thomas Keating Absolute Power Meter System*: 0,15 THz – 51,8 mW, 0,3 THz – 14,3 mW ir 0,6 THz – 0,08 mW. Tuomet su tiriamu BT diodu atliekamas fokusuoto THz pluošto rastrinis skenavimas X-Z plokštumoje (eksperimento schema 9 pav.), kurio metu nustatoma tiksli neašinio parabolinio veidrodžio židinio plokštumos vieta. Šioje plokštumoje atliekamas rastrinis skenavimas statmenai spindulio kryptiai, t.y. X-Y plokštumoje (pagal 9 pav.). Pavyzdiniai pluošto skenavimo rezultatai X-Z ir X-Y plokštumose parodyti 17 pav. a ir b, atitinkamai.



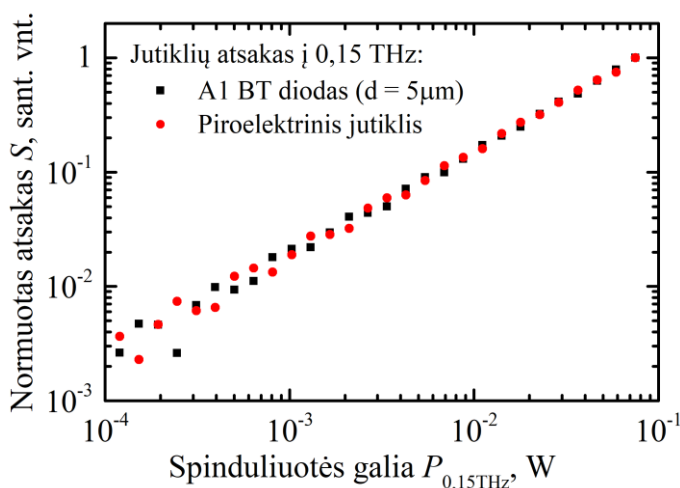
17 pav. Pavyzdiniai 0,15 THz spinduliuotės pluošto vaizdai užrašyti su BT diodiniu THz jutikliu: a) pluošto X-Z plokštuma (intarpuose pateikiami spinduliuotės pluošto pjūviai) b) pluošto X-Y plokštuma (statmenai sklidimo kryptiai)



18 pav. A1 antenos BT diodų vidutinės jautrių R vertės su vidutiniais standartiniais nuokrypiais: a) 0,15 ir 0,3 THz spinduliuotei, kaip funkcija nuo diodo kakliuko pločio fotošablone (6 verčių imtys), b) 2 μm kakliuko pločio dizaino jutikliams (4 verčių imtys) kartu su nupjauto pusrutulio formos Si lęšiu, kaip funkcija nuo detektuojamos spinduliuotės dažnio (intarpuose pavaizduotos THz spinduliuotės detekcijos schemas)

Su visais A1 tipo antenos peteliškės tipo diodais atlikus THz spinduliuotės rastrinį skenavimą X-Y plokštumoje pagal (19) formulę apskaičiuoti jutiklių jautriai. 18 pav. a atvaizduotos apskaičiuotų vidutinių jautrių su vidutiniais standartiniais nuokrypiais (6 verčių imtys) priklausomybės nuo kakliuko pločio (koks nurodytas fotošablone). Su BT diodais 0,6 THz dažnio spinduliuotės nepavyko išmatuoti, dėl per mažos šaltinio spinduliuotės galios. 18 pav. a eksperimentiniai rezultatai rodo, kad siaurėjant BT diodo kakliukui, jautris didėja netiesiškai (abscisių ašis logaritmė), o jautrių vertės gautos 0,15 THz spinduliuotei vidutiniškai yra 3,8 karto didesnės nei vertės gautos 0,3 THz spinduliuotei. Tolimesniam charakterizavimui pasirinkti A1 antenos tipo 2 μm kakliuko pločio BT diodai, dėl jų didžiausio jautrumo. Jautriui padidinti yra naudojamas krintančią spinduliuotę integruojantis ir į jutiklį fokusuojantis 12 mm diametro, 6,8 mm nuopjovos, didelės varžos silicio nupjauto pusrutulio formos lęšis. Lęšis uždedamas ant BT diodo iš padėklo pusės. Kartojant VDI šaltinio spinduliuotės rastrinį skenavimą, išmatuoti THz jutiklio – BT diodo su Si lęšiu – optiniai jautriai 0,15 THz, 0,3 THz, 0,6 THz dažniuose. Vidutinės optinių jautrių vertės su standartiniais vidutiniais nuokrypiais (4 verčių imtys) atitinkamai yra $(3,01 \pm 1,57) \text{ V/W}$, $(0,69 \pm 0,42) \text{ V/W}$, $(0,03 \pm 0,01) \text{ V/W}$. Grafiškai, rezultatai yra atvaizduoti 18 pav. b. Vidutinė triukšmo ekvivalentinės galios (NEP) vertė su vidutiniais standartiniais nuokrypiais 0,15 THz dažnyje $NEP = 6 \pm 4 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. Aukštesniuose dažniuose NEP išauga, dėl mažėjančio THz jutiklio jautrio: $NEP(0,3 \text{ THz}) = 21 \pm 10 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $NEP(0,6 \text{ THz}) = 212 \pm 60 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

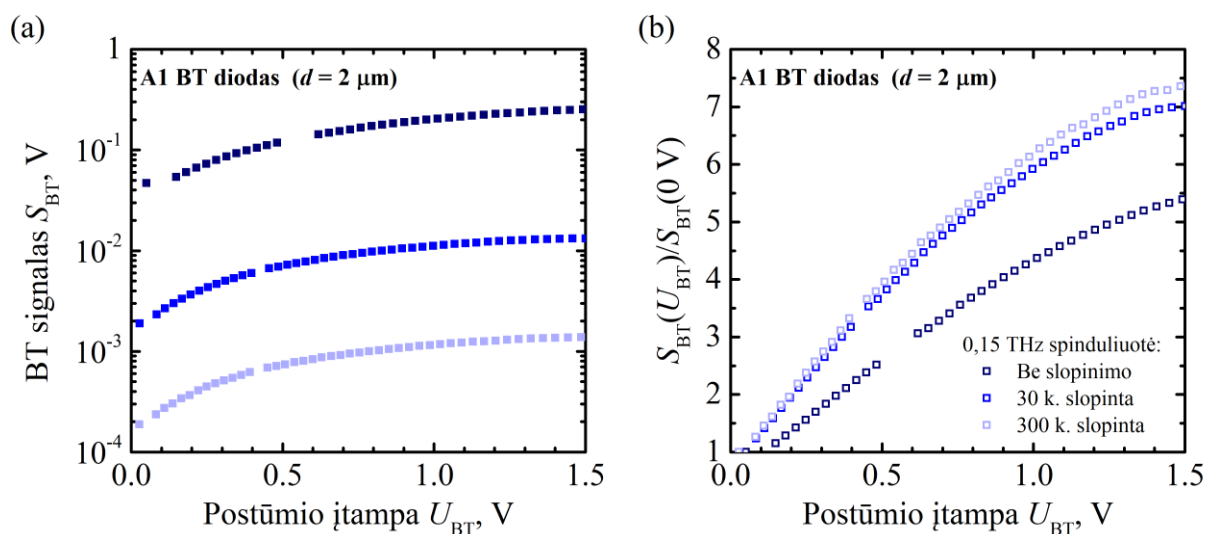
Vienas iš svarbių BT diodų jutiklių privalumų – jų signalo tiesinė priklausomybė nuo krintančios spinduliuotės galios. Naudojant 0,15 THz spinduliuotės šaltinį ir A1 antenos tipo 5 μm kakliuko pločio BT diodą kartu su nupjauto pusrutulio formos Si lęšiu nustatyta jutiklio signalo priklausomybė nuo krintančios spinduliuotės galios. Palyginimui naudojamas tiesiškai nuo sugertos spinduliuotės galios signalą keičiantis piroelektrinis jutiklis iš *Spectrum Detector Inc.* Iš 19 pav. pateiktų rezultatų matyti, jog abiejų jutiklių signalai rodo vienodą tiesinę signalo priklausomybę nuo krintančios spinduliuotės galios.



19 pav. Normuotų jutiklių signalų S priklausomybė nuo į jutiklį krintančios 0,15 THz spinduliuotės galios $P_{0,15\text{THz}}$

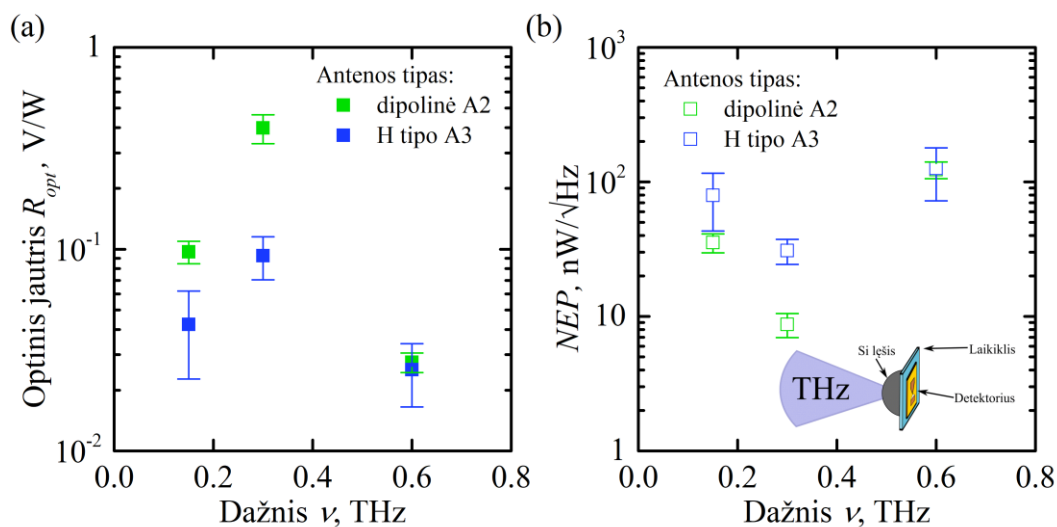
Taip pat A1 antenos tipo BT jutiklių jautris buvo tiriamas diodo darbinio VACH taško postūmio atžvilgiu, t.y. 0,15 THz spinduliuote apšviesto jutiklio kuriamo signalo priklausomybė nuo išorinės įtampos postūmio. Naudojantis (23), (24), (27) formulėmis iš eksperimentinių įtampos daliklio VACH ir sinchroniniu stiprintuvu registruotos signalo S priklausomybės nuo postūmio įtampos U_{K2400} apskaičiuota BT diodo kuriamo signalo S_{BT} priklausomybė, nuo BT diodui tenkančios išorinės postūmio įtampos dalies U_{BT} . Ši priklausomybė 2 μm kakliuko pločio dizaino BT diodui parodyta 20 pav. a. Grafike pateiktos trys BT diodo kuriamo signalo S_{BT} kreivės, keičiant į BT diodą krintančios spinduliuotės galią: neslopinta, slopinta 30 kartų ir slopinta 300 kartų, siekiant patikrinti ar krintančios spinduliuotės galia turės įtakos charakteristikoms. Santykinis signalo padidėjimas nuo BT diodui tenkančios išorinės postūmio įtampos dalies grafiškai atvaizduotas 20 pav. b. Iš šiame grafike pateiktų rezultatų matyti, jog neslopintos spinduliuotės atveju gaunamas mažesnis signalo padidėjimo santykis. Galima priežastis – didelė šaltinio galia 0,15 THz dažnyje (apie 60 mW) dėka neašinio parabolinio veidrodžio ir nupjauto pusrutulio formos Si lęšio sufokusuojama į itin mažą plotą ir sukelia papildomą bandinio kaitimą. Nepaisant to, iš 20 pav. b pateiktų verčių matyti, jog pridėdant nedidelę išorinę postūmio įtampą (iki 1,5 V) galima jutiklio atsaką padidinti nuo 5,5 iki 7,5 karto, triukšmo jutiklyje sąskaita. Jutikliui veikiant be išorinės postūmio įtampos, jame vyrauja Džonsono (varžos šiluminis) triukšmas. Jutikliui veikiant su išorine postūmio įtampa prie Džonsono triukšmo įsijungs papildomi triukšmo mechanizmai, kurių tipą ir stiprumą galima nustatyti tik atlikus papildomus eksperimentinius tyrimus.

Galiausiai, atliktas diodų integruotų su dipoline bei H-tipo antena optinių jautrių tyrimas atskiruose VDI šaltinio dažniuose. BT diodo dizainas paremtas pirminiais InGaAs BT diodų tyrimais [40] panaudojant vienodo kakliuko plotį – $d = 7 \mu\text{m}$, siekiant palyginti kiekvienos antenos efektyvumą. Šiems jutikliams atliekamas toks pats optoelektroninis charakterizavimas siekiant



20 pav. A1 antenos tipo 2 μm kakliuko pločio BT diodo apšviesto 0,15 THz spinduliuote: (a) generuojamo signalo priklausomybė nuo išorinės postūmio įtampos, (b) signalo padidėjimo santykio priklausomybė nuo postūmio įtampos. Pateikiamos kreivės trims krintančios spinduliuotės režimams: neslopinta, slopinta 30 kartų ir slopinta 300 kartų.

nustatyti optinį jautrį, kaip ir A1 tipo antenoms, kuris aprašytas 2.3.3 skyriuje. Optinio jautrio R_{opt} ir triukšmo ekvivalentinės galios (NEP) grafikai parodyti 21 pav. Iš eksperimentinių rezultatų įvertintas BT diodinių jutiklių optinis jautris. A2 ir A3 tipo jutikliai parodė didžiausią optinį jautrį ir mažiausią triukšmo ekvivalentinę galią ties 0,3 THz dažniu. Didesni jautriai ir mažesnės ekvivalentinės triukšmo galios visuose dažniuose gautos A2 (dipolinio tipo antena) jutikliams. Šiai antenai optinio jautrio vertė 0,3 THz dažnyje $R_{A2opt}(0,3 \text{ THz}) = 0,40 \pm 0,07 \text{ V/W}$ yra artima A1 tipo antenos BT diodų su $2 \mu\text{m}$ kakliuko dizainu optiniam jautriui, kuris lygus $R_{A1opt}(0,3 \text{ THz}) = 0,69 \pm 0,42 \text{ V/W}$. Kadangi antenos A2 dizaine naudojamų BT diodų kakliuko plotis d yra $7 \mu\text{m}$, tai rodo didesnę antenos A2 efektyvumą, lyginant su antenos A1 efektyvumu 0,3 THz dažnyje.



21 pav. Antenų A2 (dipolio-tipo) ir A3 (H-tipo) vidutiniai parametrai su vidutiniais standartiniais nuokrypiais 0,15, 0,3 ir 0,6 THz dažniuose: (a) optinio jautrio, (b) triukšmo ekvivalentinių galių (intarpe pavaizduota THz spinduliuotės detekcijos schema)

Išvados

Šio darbo metu buvo:

1. ant komercinės aliuminio galio nitrido – galio nitrido (AlGaIn/GaN) heterostruktūros sukurti peteliškės tipo diodiniai jutikliai integruoti su skirtingo tipo THz antenomis, panaudojant mažos mažos savitosios varžos $1,1 \pm 0,3 \Omega \cdot \text{mm}$ ominių kontaktus;
2. ištyrus AlGaIn/GaN heterostruktūrą nustatyta, kad kambario temperatūroje elektronų tankis dvimačių elektronų dujų kanale yra artimas $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, jų judris siekia $1860 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, o sluoksnio varža lygi $340 \Omega/\text{kv}$;
3. ištyrus peteliškės tipo diodų jautrio priklausomybę nuo kakliuko pločio, gauta kad susiaurinus kakliuko plotį nuo $17 \mu\text{m}$ iki $2 \mu\text{m}$, jautris $0,15 \text{ THz}$ dažniui didėja netiesiškai nuo $(0,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ V/W}$ iki $(3,5 \pm 2,4) \cdot 10^{-1} \text{ V/W}$;
4. nustatyta, kad tiriamų AlGaIn/GaN peteliškės tipo diodų atsakas priklauso tiesiškai nuo sugertos $0,15 \text{ THz}$ dažnio spinduliuotės galios, o naudojant $1,5 \text{ V}$ išorinę postūmio įtampą gali būti padidintas iki 7 kartų;
5. palyginus diodinių jutiklių trijų antenų dizainus – A1 (peteliškės tipo diodo įprastinės formos elektrodai), A2 (peteliškės tipo diodai integruoti su dipolinio tipo antena), A3 (peteliškės tipo diodai integruoti su dipolinio H tipo antena) nustatyta, kad jutikliai su A1 tipo antena rodo didžiausias optinių jautrių vertes $0,15 \text{ THz}$ spinduliuotei ($R_{\text{optA1}} = 3 \pm 1,6 \text{ V/W}$, $NEP_{\text{A1}} = 6 \pm 4 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$). Tuo tarpu, jutikliai integruoti į A2 ir A3 antenas didžiausius signalus rodė $0,3 \text{ THz}$ spinduliuotei, kur didžiausiu optiniu jautriu pasižymėjo jutikliai integruoti į dipolinio tipo anteną A2: $R_{\text{A2opt}}(0,3 \text{ THz}) = 0,40 \pm 0,07 \text{ V/W}$, $NEP_{\text{A2}} = 8 \pm 2 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

Šaltiniai

- [1] A. Sužiedelis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, G. Valušis, and H. G. Roskos, “Giga- and terahertz frequency band detector based on an asymmetrically necked n-n+-GaAs planar structure,” *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 5, pp. 3034–3038, Mar. 2003.
- [2] A. Juozapavičius *et al.*, “Microwave sensor based on modulation-doped GaAs/AlGaAs structure,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. S436–S439, Apr. 2004.
- [3] D. Seliuta *et al.*, “Detection of terahertz/sub-terahertz radiation by asymmetrically-shaped 2DEG layers,” *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 10, p. 631, 2004.
- [4] I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Grigelionis, and G. Valušis, “InGaAs-based bow-tie diode for spectroscopic terahertz imaging,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 11, p. 114505, Dec. 2011.
- [5] L. Minkevičius *et al.*, “Discrete spectrum terahertz imaging using bow-tie diodes: optimized antenna designs and arrays,” in *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IV*, 2013, p. 88460P.
- [6] I. Kašalynas, R. Venckevičius, and G. Valušis, “Continuous Wave Spectroscopic Terahertz Imaging With InGaAs Bow-Tie Diodes at Room Temperature,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 50–54, Jan. 2013.
- [7] V. Palenskis *et al.*, “InGaAs Diodes for Terahertz Sensing—Effect of Molecular Beam Epitaxy Growth Conditions,” *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3760, Nov. 2018.
- [8] I. Kašalynas *et al.*, “Spectroscopic Terahertz Imaging at Room Temperature Employing Microbolometer Terahertz Sensors and Its Application to the Study of Carcinoma Tissues,” *Sensors*, vol. 16, no. 4, p. 432, Mar. 2016.
- [9] J. Nishizawa *et al.*, “THz imaging of nucleobases and cancerous tissue using a GaP THz-wave generator,” *Opt. Commun.*, vol. 244, no. 1, pp. 469–474, 2005.
- [10] H.-B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen, and X.-C. Zhang, “Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 8, pp. 1514–1527, Aug. 2007.
- [11] D. J. Cook, M. G. Allen, B. K. Decker, R. T. Wainner, J. M. Hensley, and H. S. Kindle, “Detection of High Explosives with THz Radiation,” in *2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics*, vol. 1, pp. 7–8.
- [12] B. B. Hu and M. C. Nuss, “Imaging with terahertz waves,” *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 16, p. 1716, Aug. 1995.
- [13] T. Pfeiffer *et al.*, “Terahertz thickness determination with interferometric vibration correction for industrial applications,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 10, p. 12558, May 2018.
- [14] F. Matsushima, H. Odashima, T. Iwasaki, S. Tsunekawa, and K. Takagi, “Frequency measurement of pure rotational transitions of H₂O from 0.5 to 5 THz,” *J. Mol. Struct.*, vol. 352–353, pp. 371–378, Jun. 1995.
- [15] Marcel J E Golay, “Radiation detecting device,” US2557096A, 1947.
- [16] M. A. Kinch and B. V Rollin, “Detection of millimetre and sub-millimetre wave radiation by free carrier absorption in a semiconductor,” *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 14, no. 10, pp. 672–676, Oct. 1963.

- [17] Y. Nakagawa and H. Yoshinaga, “Characteristics of High-Sensitivity Ge Bolometer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 9, no. 1, pp. 125–131, Jan. 1970.
- [18] P. H. Siegel, “Terahertz technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 910–928, Mar. 2002.
- [19] R. W. Whatmore, “Pyroelectric devices and materials,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 49, no. 12, pp. 1335–1386, Dec. 1986.
- [20] TYDEX, “Golay Detectors.” [Online]. Available: http://www.tydexoptics.com/products/thz_devices/golay_cell/. [Accessed: 16-Jan-2019].
- [21] X. C. Tu *et al.*, “ 1×64 Nb₅N₆ microbolometer array detector for real time THz imaging,” in *2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 2016, pp. 1–1.
- [22] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, “Picosecond photoconducting Hertzian dipoles,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 284–286, Aug. 1984.
- [23] P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss, “Subpicosecond photoconducting dipole antennas,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 2, pp. 255–260, Feb. 1988.
- [24] F. W. Smith *et al.*, “Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, no. 10, pp. 890–892, Mar. 1989.
- [25] M. Dyakonov and M. Shur, “Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 15, pp. 2465–2468, Oct. 1993.
- [26] M. Dyakonov and M. Shur, “Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, no. 3, pp. 380–387, Mar. 1996.
- [27] W. Knap *et al.*, “Plasma wave detection of sub-terahertz and terahertz radiation by silicon field-effect transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 4, pp. 675–677, Jul. 2004.
- [28] M. W. Ryu *et al.*, “High-Performance Plasmonic THz Detector Based on Asymmetric FET with Vertically Integrated Antenna in CMOS Technology,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 4, pp. 1742–1748, 2016.
- [29] T. Otsuji, “Trends in the Research of Modern Terahertz Detectors: Plasmon Detectors,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, pp. 1110–1120, Nov-2015.
- [30] E. A. Shaner, M. Lee, M. C. Wanke, A. D. Grine, J. L. Reno, and S. J. Allen, “Single-quantum-well grating-gated terahertz plasmon detectors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, no. 19, p. 193507, Nov. 2005.
- [31] A. El Fatimy *et al.*, “Terahertz detection by GaN/AlGaIn transistors,” *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 23, p. 1342, 2006.
- [32] A. El Fatimy *et al.*, “Nitride based nanotransistors as new sources and detectors of THz radiations,” *Phys. status solidi*, vol. 5, no. 6, pp. 1947–1949, May 2008.
- [33] M. Bauer *et al.*, “Optimization of the Design of Terahertz Detectors Based on Si CMOS and AlGaIn/GaN Field-Effect Transistors,” *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, vol. 25, no. 03n04, p. 1640013, Sep. 2016.
- [34] S. Boppel *et al.*, “0.25 μ m GaN TeraFETs Optimized as THz Power Detectors and Intensity-Gradient Sensors,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 348–350, Mar. 2016.

- [35] V. Jakštas *et al.*, “Development of the terahertz bow-tie diodes of AlGa_N/Ga_N-heterostructures with high mobility 2DEG,” in *2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2017, pp. 1–2.
- [36] G. Snider, “1D Poisson solver.” [Online]. Available: <https://www3.nd.edu/~gsnider/>. [Accessed: 19-Jun-2018].
- [37] D. K. Schroder, “Carrier and Doping Density,” in *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 61–125.
- [38] M. C. J. C. M. Krämer, “Fabrication and characterization of metal-semiconductor contacts for application in Al_xGa_{1-x}N/Ga_N HEMTs,” Technische Universiteit Eindhoven, 2000.
- [39] D. K. Schroder, “Contact Resistance and Schottky Barriers,” in *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 127–184.
- [40] L. Minkevičius, “Terahercinių vaizdų užrašymo matricos, veikiančios kambario temperatūroje,” Vilnius, 2016.
- [41] K. Ikamas, “Plačiajuosčių tranzistorinių THz detektorių modeliavimas ir taikymas veikai su impulsiniais ir nuolatinės veikos šaltiniais,” Vilniaus universitetas, 2018.
- [42] V. Jakštas, “Kompatiški AlGa_N/Ga_N heterosandūriniai terahercinės spinduliuotės šaltiniai,” Vilnius University, 2018.
- [43] G. Martin, A. Botchkarev, A. Rockett, and H. Morkoç, “Valence-band discontinuities of wurtzite Ga_N, Al_N, and In_N heterojunctions measured by x-ray photoemission spectroscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 18, pp. 2541–2543, Apr. 1996.
- [44] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, and M. Shur, *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, 1st editio. Hoboken, New Jersey, United States: Wiley-Interscience, 2001.
- [45] Y.-N. Xu and W. Y. Ching, “Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals,” *Phys. Rev. B*, vol. 48, no. 7, pp. 4335–4351, Aug. 1993.

Priedas Nr. 1 Skaičiavimams naudojami medžiagų parametrai

<i>GaN</i>			
Draustinių energijų tarpas E_g , eV	3,4	Efektinė elektronų masė m_e^*	0,2
Laidumo juostos trūkis ΔE_c , eV	0	Elektronų judris μ_e , cm^2/Vs	400
Statinė dielektrinė skvarba ϵ	9,5	Poliarizacijos koeficientas P , $\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	$2\cdot 10^{-6}$
<i>AlGaN</i>			
	GaN	AlN	<i>b</i>
Draustinių energijų tarpas E_g , eV	3,4	6,2	0,7
Laidumo juostos trūkis ΔE_c , eV	0	2,1 [43]	
Statinė dielektrinė skvarba ϵ	9,5	8.5 [44]	
Efektinė elektronų masė m_e^*	0.2	0,4 [45]	
Elektronų judris μ_e , cm^2/Vs	400	300	
Poliarizacijos koeficientas P , $\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	$2\cdot 10^{-6}$	$1,23\cdot 10^{-5}$	$1,9\cdot 10^{-6}$

AlGa_N/Ga_N BOW-TIE DIODE SENSORS FOR 0,1-0,6 THz FREQUENCY RANGE**SUMMARY**

Various types of detectors are employed for this region, but only a small fraction work at the room temperature with high enough response speed for real time operation. Bow-tie (BT) diodes fabricated on structures with two dimensional electron gases (2DEG) meet all of the criteria mentioned above. Previously research on BT diode detectors focused mostly on GaAs family material [1]–[3], in part to very high electron mobility in these materials. Recently research on BT diodes fabricated on AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor (HEMT) structures also appeared [4]. Nitride HEMT structures have many advantages over arsenide materials: higher carrier concentrations in 2DEG layer, Ga_N has much shorter electron energy relaxation time, higher resistance to chemical and mechanical damage.

The aim of this work is to fabricate BT diodes on commercial Al_{0.25}Ga_{0.75}N/Ga_N HEMT structure and study their response at the room temperature in the frequency range of 0,1 – 0,6 THz. The 2DEG electron density and carrier mobility were found to be nearly $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ and $1900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Responsivity of BT diodes was investigated in several ways. Firstly, it was found that decreasing of BT diode apex width from 17 μm to 2 μm resulted in non-linear increase in responsivity for detection of both 0,15 THz and 0,3 THz radiation. Secondly, response of BT diodes was found to be linearly dependent on absorbed radiation power and could be increased 7 times with 1,5 V DC voltage bias. Furthermore, three designs of antenna integrated BT diodes are compared – A1 (bow-tie antenna), A2 (dipole antenna), A3 (H type antenna). Overall, highest optical responsivity of $3 \pm 1,6 \text{ V/W}$ was achieved for A1 type antennas for 0,15 THz. A2 and A3 antenna integrated BT diodes were more responsive for 0,3 THz and best results were obtained for dipole type (A2) antenna, for which responsivity of $0,40 \pm 0,07 \text{ V/W}$ at 0,3 THz was achieved.

- [1] D. Seliuta *et al.*, „Detection of terahertz/sub-terahertz radiation by asymmetrically-shaped 2DEG layers“, *Electron. Lett.*, t. 40, nr. 10, p. 631, 2004.
- [2] I. Kasalynas, R. Venckevicius, G. Valusis, „Continuous Wave Spectroscopic Terahertz Imaging With InGaAs Bow-Tie Diodes at Room Temperature“, *IEEE Sens. J.*, t. 13, nr. 1, p. 50–54, saus. 2013.
- [3] V. Palenskis *et al.*, „InGaAs Diodes for Terahertz Sensing—Effect of Molecular Beam Epitaxy Growth Conditions“, *Sensors*, t. 18, nr. 11, p. 3760, lapkr. 2018.
- [4] V. Jakstas *et al.*, „Development of the terahertz bow-tie diodes of AlGa_N/Ga_N-heterostructures with high mobility 2DEG“, *2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2017, p. 1–2.