

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

LINAS MINKEVIČIUS

TERAHERCINIŲ VAIZDŲ UŽRAŠYMO MATRICOS, VEIKIANČIOS
KAMBARIO TEMPERATŪROJE

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2016 metai

Disertacija rengta 2011 – 2016 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro
Puslaidininkų fizikos institute, Optoelektronikos skyriuje.

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Fizinių ir technologijos mokslų centras ir
Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju darbo vadovui prof. dr. Vincui Tamošiūnui už ilgametę pagalbą ir patarimus, taip pat už išsakytas idėjas rašant šią disertaciją bei konsultacijas atliekant teorinį modeliavimą ir tyrimų eigos planavimą. Noriu išreikšti išskirtinę padėką prof. habil. dr. Gintarui Valušiui už mokslines diskusijas ir jo pasiūlytas idėjas, kurios vėliau buvo įgyvendintos rašant disertaciją, vertingus patarimus, taip pat dėkoju už pagalbą sprendžiant iškilusias problemas.

Taip pat noriu padėkoti dr. Irmantui Kašalynui ir Rimvydui Venckevičiui už pagalbą atliekant eksperimentinius matavimus bei visam Terahercų fotonikos laboratorijos kolektyvui už vaisingas diskusijas.

Esu dėkingas dr. Bogdan Voisiat (Fizinių ir technologijos mokslų centras) už difrakcinės optikos komponentų gamybą bei Vilniaus universiteto Triukšmų laboratorijai už atliktus triukšmų matavimus.

Taip pat dėkoju dr. Alvydui Lisauskui (Johann Wolfgang Goethe Universitetas, Vokietija) už pagalbą ir patarimus atliekant tiesioginių ir heterodininių vaizdų užrašymo eksperimentus, Bernhard Klug už pagalbą gaminant bandinių struktūras bei Klaus Köhler (Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, Vokietija) ir Renatai Butkutei, Virginijui Bukauskui (Fizinių ir technologijos mokslų centras) už InGaAs ruošinių gamybą bei paviršinio potencialo ir tunelinių srovių jutiklyje matavimus.

Dėkoju savo tėvams, broliui, žmonai Monikai, sūnui Benediktui už visapusišką palaikymą, supratimą ir kantrybę.

Turinys

ĮVADAS	8
Darbo tikslas ir uždaviniai	11
Darbo naujumas	11
Praktinė darbo vertė	13
Ginamieji teiginiai:	13
Disertacijos planas	14
Autoriaus indėlis	15
Publikacijų sąrašas	16
1 LITERATŪROS APŽVALGA	23
1.1 Terahercinės spinduliuotės pritaikymo sritys	23
1.2 THz vaizdinimo sistemos	23
1.3 „Peteliškės“ formos jutikliai THz dažnių ruožui	25
1.3.1 Vaizdinimo sistemos su BT jutikliu	27
1.4 Difrakcinė optika THz spinduliuotės fokusavimui	29
1.4.1 Zoninės plokštelės	30
1.4.2 Fokusuojantys dažniui selektyvūs paviršiai	33
1.5 Baigtinių skirtumų laiko srityje metodas	37
1.6 Skyriaus apibendrinimas	39
2 JUTIKLIO ANTENINIŲ EFEKTŲ MODELIAVIMAS	40
2.1 Modeliavimo metodika	40
2.2 Jutiklio anteninės dalies dizainas	41
2.3 Jutiklio sąsmaukos kampo įtaka	42
2.4 Metalizuotų sričių įtaka antenos rezonansui	43
2.5 Efektinio aplinkos lūžio rodiklio įvertinimas	44
2.6 Jutiklio metalizuotos srities formos modeliavimas	45
2.7 Jutiklių sąveikos masyvuose modeliavimas	48
2.8 Teorinių rezultatų palyginimas su eksperimentiniais	49
2.9 Skyriaus apibendrinimas	51
3 JUTIKLIO GAMYBA IR CHARAKTERIZAVIMAS	52
3.1 Technologija ir gamyba	52

3.1.1	Epitaksiniai InGaAs/InAs heterodariniai ant InP:Fe monokristalino padėklo.....	52
3.1.2	Jutiklio sandara	56
3.1.3	Litografijos kaukės	57
3.1.4	Gamyba.....	58
3.1.5	Jutiklių montavimas specialiuose laikikliuose	60
3.2	Jutiklių charakterizavimas	61
3.2.1	Žemadažniai BT jutiklių triukšmai.....	61
3.2.2	BT struktūros energijos juostų diagramos modelis	64
3.2.3	Matavimai Kelvino zondų	66
3.2.4	Tunelinės stovės matavimai.....	68
3.2.5	BT struktūrų voltamperinės charakteristikos.....	68
3.2.6	Stipraus elektrinio lauko įtaka	74
3.2.7	BT jutiklio detekcijos mechanizmo modelio papildymas	75
3.2.8	Darbo taško įtaka BT atsakui ir triukšmui.....	76
3.3	Skyriaus apibendrinimas.....	77
4	BT JUTIKLIŲ PANAUDOJIMAS THZ VAIZDINIMO SCHEMOSE	78
4.1	BT jutiklio taikymai tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose.....	78
4.1.1	Heterodininis signalo registravimo būdas	78
4.1.2	Tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemos.....	79
4.1.3	BT jutiklio jautrio charakteristikos	81
4.1.4	Objektų pralaidumo THz vaizdai.....	83
4.1.5	Objektų atspindžio THz vaizdai	84
4.2	Vaizdinimas su BT jutiklių matricomis.....	85
4.2.1	Detektorių matricos signalų nuskaitymas ir stiprinimas.....	85
4.2.2	Skirtingi antenos dizainai 8-ių jutiklių matricose.....	87
4.2.3	Vaizdinimas su 32 jutiklių matricomis	91
4.3	Skyriaus apibendrinimas.....	98
5	DIFRAKČINIAI ELEMENTAI IR JŲ TAIKYMAS VAIZDINIMO SCHEMOSE	100

5.1	Zoninės plokštelės.....	100
5.1.1	Zoninių plokštelių charakterizavimas.....	108
5.2	Integruotos zoninės plokštelės į detektorių.....	115
5.3	Fazinės zoninės plokštelės	120
5.3.1	Daugialaiptės fazinės zoninės plokštelės.....	122
5.4	Objektų vaizdinimas naudojant difrakcinę optiką	124
5.5	Skyriaus apibendrinimas.....	125
6	THZ VAIZDINIMO SISTEMOS TAIKYMAI	126
6.1	THz spinduliuotės taikymai saulės elementų diagnostikoje.....	126
6.2	Plonasluoksnių saulės elementų diagnostika	130
6.3	Saulės elementų paviršiaus ir jų modulių diagnostika.....	131
6.4	Fazei jautrių sistemų perspektyvos	135
6.5	Skyriaus apibendrinimas.....	137
	REZULTATAI IR IŠVADOS	138
	Naudotos literatūros sąrašas	142

Disertacijoje naudojami sutrumpinimai

- THz – terahercas (10^{12} Hz)
- TDS – laikinės skyros spektroskopija (*angl.* Time-Domain spectroscopy)
- CW – nuostovios veikos (*angl.* Continuous wave)
- BT – „peteliškės“ formos jutiklis (*angl.* bow-tie detector)
- NEP – triukšmų ekvivalenti galia (*angl.* noise equivalent power)
- FDTD – baigtinių skirtumų laiko skalėje metodas (*angl.* Finite-Difference Time-Domain method)
- ABC – sugeriančios kraštinės sąlygos (*angl.* Absorbing boundary conditions)
- FWHM – plotis ties pusės maksimalios amplitudės verte (*angl.* Full width at half maximum)
- DSP – dažniui selektyvus paviršius (*angl.* Frequency selective surface)
- LAS – lazerinės abliacijos sistema
- SZP – standartinė zoninė plokštelė
- KZP – kombinuota zoninė plokštelė
- FZP – fazinė zoninė plokštelė
- HDPE – didelio tankio polietilenas (*angl.* High-density polyethylene)
- MBE – molekulių pluoštelių epitaksija (*angl.* Molecular beam epitaxy)
- TEM – peršviečianti elektronų mikroskopija (*angl.* Transmission electron microscopy)
- VACH – voltamperinė charakteristika
- FET – lauko tranzistorius (*angl.* Field effect transistor)
- IF – skirtuminis dviejų maišomų bangų dažnis (*angl.* Intermediate frequency)
- SKZM – skenuojanti Kelvino zondo mikroskopija (*angl.* Kelvin probe force microscopy)
- STSM – skenuojanti tunelinių srovių mikroskopija (*angl.* scanning tunneling microscopy)

IVADAS

Terahercine spinduliuote dažniausiai vadinamos elektromagnetinės bangos, kurių dažniai yra tarp 100 GHz ir 10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$), arba bangos ilgiai tarp 3 mm ir 30 μm [1]. Ši dažnių sritis, tarp radijo bangų ir infraraudonosios srities, pasižymi keletu unikalių savybių. Terahercinės bangos gali nesunkiai praeiti per dielektrines medžiagas: daugelį sintetikos ir tekstilės rūšių, taip pat popierius ar kartonas yra skaidrus šiai spinduliuotei. Viena iš stipriausiai sugeriančių THz spinduliuotę medžiagų yra vanduo ir jo garai. Oro drėgmė riboja spinduliuotės sklidimą iki kelių metrų, todėl praktiškai objektų, esančių už kelių dešimčių metrų – taip vadinama „stand-off“ metodika – tyrimai yra komplikuoti [2]. Dėl tos pačios priežasties tolumo duomenų perdavimo sistemos turi mažai perspektyvų [3], tačiau plačiai yra vystomos artimo nuotolio duomenų perdavimo sistemos, kurios panaudojamos karyboje ir medicinoje [4]. Skirtingai nei rentgeno spinduliuotė, terahercinės bangos neturi jokio jonizuojančio poveikio ir paprastai yra laikomos biologiškai nekenksmingomis [5]. Istorikai susiklostė taip, kad astronomai buvo pirmieji, kurie orientavosi į THz ruožą, kadangi atmosferinis langas centruotas ties 1.3 – 1.5 THz dažniu [6]. Šioje srityje yra CO, N⁺ spektrinės linijos, kurios suteikia informacijos apie kosminius kūnus. THz dažnių ruožas yra naudingas kietųjų medžiagų spektroskopijoje, vertinant elektronų tankį ar elektrinį laidumą.

Visos šios taikymo sritys reikalauja įvairių terahercinių diagnostikos – vaizdinimo ir spektroskopijos sistemų sprendimų. Paprastai nebūna universalaus technologinio sprendimo, tinkančio visiems atvejams, todėl kiekvienas taikymo aspektas reikalauja atskiro sprendimo, padiktuoto konkrečių taikymo aplinkybių. Todėl kuriant terahercines vaizdinimo sistemas yra siūloma plati naudojamų jutiklių įvairovė. Daug tyrimų atliekama taikant IR srities mikrobolometrus THz dažnių ruožui. 2006 metais buvo pademonstruota aktyvi THz vaizdinimo sistema, naudojanti vanadžio oksido IR srities mikrobolometrų masyvą [7,8]. 2010 – 2011 metais trys skirtingos kompanijos pristatė

mikrobolometrines THz kameras, veikiančias dažnių ruože virš 1 THz [9–11]; „NEC“ (Japonija), „INO“ (Kanada), „LETI“ (Prancūzija). Kaip alternatyvą „Traycer Systems Inc“ (Kalifornija) kompanija tais pačiais metais pristatė tunelinių diodų jutiklių kamerą, veikiančią 0.6 THz – 1.2 THz dažnių intervale [12]. 2012 mokslininkų grupė [13] pristatė 1000-čio lauko tranzistorių kamerą 0.6 THz – 1 THz dažnių ruožui, veikiančią 25 kadrų per sekundę sparta. 2015 autoriai [14] pademonstravo 576 nanometrinių lauko tranzistorių (FET) kamerą, turinčią 450 kadrų per sekundę greitį ir gebančią registruoti 10.5 nW 600 GHz dažnio spinduliuotę (jos triukšmo ekvivalentinė galia, NEP 500 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$). 2013 metais „Terasence“ (Rusija) kompanija pristatė patentuotą kompaktišką 9000 aktyvių taškų kamerą, veikiančią 0.1 THz – 0.8 THz dažnių ruože. Jų siūlomų patentuotų detektorių triukšmo ekvivalenti galia siekia 1 nW/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Pastaraisiais metais rinkoje ryškėja terahercinių detektorių liniuočių poreikis. „TeraSence“ kompanija 2015 metais pristatė 256 jutiklių liniuotę, tinkančią konvejerinėms kokybės kontrolės sistemoms, kur skenavimo greitis siekia iki 15 m/s. Tais pačiais metais „LuviTera“ (Lietuva) kompanija pristatė iki 2 THz veikiančią 32 jutiklių liniuotę, kurios NEP siekia tik 20 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [15]. Jutiklį sudaro ant silicio nitrido membranos suformuoti titano mikrobolometrai su THz antena [16].

Kuriant vaizdinimo sistemas svarbų vaidmenį vaidina sistemos kaina ir pagrindinių komponentų – detektoriaus ar spinduliuotės šaltinio paprastumas ir patikimumas, t. y. atsparumas elektrostatiniams krūviams, elektrinėms perkrovoms, ar kitiems aplinkos veiksniams. Paminėtos jutiklių šeimos ir esami sprendimai toli gražu nepasižymi šiomis savybėmis.

Technologiškai paprasti, patikimi, atsparūs elektrostatiniams krūviams ir spinduliuotės galios perkrovoms – visos šios savybės yra būdingos asimetrinės formos GaAs/AlGaAs jutiklių šeimai, kurių veikimas aiškinamas netolygiu krūvininkų kaitimo efektu [17]. Šie jutikliai pasižymi plačiu iki 3 THz dažnių diapazonu, o jų atsako laikas siekia 7 ns [18]. Tačiau tiesioginiams taikymams, dėl mažo jų jautrio kambario temperatūroje, juos taikyti vaizdinimo sistemose yra sudėtinga.

Norint padidinti jautrį reikia ieškoti naujų medžiagų, turinčių tinkamus parametrus jutiklių konstravimui. Vienas iš pavyzdžių galėtų būti InGaAs. Šioje medžiagoje krūvininkų judris kambario temperatūroje yra gerokai didesnis nei GaAs ar Si medžiagų, todėl InGaAs gali būti tinkamas naujo tipo detektorių kūrimui [19]. Žinoma, tik puslaidininkinės medžiagos tyrimų nepakanka ir reikia atsižvelgti į jutiklio anteninės dalies konstrukcijos ypatumus. Tam reikalingi antenos teoriniai modeliavimai bei elektrinių laukų pasiskirstymo jutiklyje vertinimas. Reikia rasti jutiklio anteninės dalies optimalias konfigūracijas bei kontaktinių aikštelių išdėstymo vietas, turinčias mažiausiai įtakos jutiklio dažninėms savybėms. Žinoma, reikia nepamiršti ieškoti sprendimų, užtikrinančių detektorių gamybos technologijos paprastumą. Būtent ji turi labai daug įtakos galutinei jutiklio kainai. Taip pat be detektoriaus charakterizavimo ir jo fundamentalaus veikimo modelio būtų sunku įsivaizduoti jo tobulinimo perspektyvas ieškant naujų technologinių sprendimų. Svarbu paminėti ir tai, kad jutiklis negali ribotis tik siauromis pritaikymo galimybėmis, todėl verta tirti jo savybes tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose. Tokiu būdu būtų galima praplėsti sistemos dinaminį diapazoną. Jutiklio atsakas gali būti padidintas jį integravus ant Si lęšio. Tačiau, šis sprendimas ne visada yra tinkamas, kadangi lęšis yra masyvus ir sunkiai integruojamas jutiklių masyvuose. Todėl difrakcinės optikos pritaikymas tampa vis patrauklesnis. Šiam tikslui reikalingi kompleksiniai jutiklio ir difrakcinės optikos tyrimai.

Taigi, išsprendus šiuos uždavinius, būtų galima sukurti sparčią THz vaizdinimo sistemą su kompaktiška jutiklių matrica, veikiančią tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose. Ši sistema galėtų būti pritaikyta ne tik medžiagotyroje ar saugumo sistemose, bet ir kaip inovatyvus sprendimas modulyje esančių saulės elementų celių ar jų kontaktų kokybės kontrolei, greitoje saulės elementų gamybos linijoje.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas buvo sukurti optimizuotas teraherciniam dažnių ruožui kompaktiškas „peteliškės“ formos InGaAs jutiklių matricas ir ištirti jų taikymo galimybes.

Norint pasiekti šį tikslą buvo suformuoti šie uždaviniai:

- Sukurti optimalų „peteliškės“ tipo InGaAs jutiklio dizainą teraherciniam dažnių ruožui, atsižvelgiant į galimus atskirų metalizuotų sričių anteninius efektus.
- Naudojant modernias mikroelektronikos puslaidininkinių struktūrų gamybos technologijas pagaminti planarinius, optimizuotus „peteliškės“ formos terahercinės spinduliuotės InGaAs jutiklius (BT, sutrumpinimas iš angl. žodžio *bow-tie*) ir jų matricas, veikiančias kambario temperatūroje.
- Įvertinti pagamintų InGaAs BT jutiklių parametrus jiems veikiant tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemose. Ištirti šių jutiklių ir jų matricų panaudojimo galimybes terahercinėse vaizdinimo sistemose. Patikslinti šių jutiklių veikimo modelį, įskaitant galimą paviršinių būsenu ir krūvių nulemto lauko efekto įtaką.
- Sukurti plonų zoninių plokštelių ir kombinuotų savybių fokusuojančio elemento dizainą, teoriškai ir eksperimentiškai įvertinti jų fokusavimo savybes THz dažnių ruože.
- Siekiant sumažinti vaizdinimo sistemos matmenis ir komponentų skaičių joje, teoriškai suskaičiuoti tikėtinas zoninės plokštelės fokusavimo savybes ją integravus ant BT jutiklio padėklo ir įvertinti šių dviejų elementų sąveiką.
- Eksperimentiškai nustatyti terahercinės spinduliuotės taikymo perspektyvas sparčių fotovoltinių celių gamybos linijų kokybės kontrolės sistemose.

Darbo naujumas

- Atsižvelgiant į atskirų metalizuotų sričių anteninius efektus sukurti optimalūs „peteliškės“ tipo InGaAs jutiklių dizainai teraherciniam dažnių ruožui. Naudojant baigtinių skirtumų laiko skalėje metodą, teoriškai sumodeliuota jutiklio metalizuotų dalių įtaka elektrinio lauko spektrui ties

jutiklio aktyviaja sritimi. Įskaičius jutiklio metalizuotų sričių anteninius efektus ir vertinant elektrinio lauko amplitudės kvadratą, kuris proporcingas jutiklio signalui, buvo patikslintas peteliškės formos THz detektoriaus dažninės charakteristikos fenomenologinis modelis.

- Interpretuojant Kelvino zondo, tunelinių srovių mikroskopijos metodais bei komercinio Synapsys TCAD paketo skaičiavimais gautus elektrinio lauko potencialo pasiskirstymo rezultatus bei Fermi juostos poziciją buvo detaliai išnagrinėta jutiklio asimetrinės InGaAs aktyviosios srities ir metalo sluoksnio sandūra. Remiantis šiais rezultatais papildytas jutiklio veikimo teorinis modelis, paaiškinantis terahercinės spinduliuotės detekcijos principą didesnės varžos ($> 50 \text{ k}\Omega/\text{sq}$) InGaAs sluoksnių atveju.
- Pirmą kartą palygintas optimizuoto dizaino peteliškės formos InGaAs jutiklio, kurio jautris siekia 6 V/W , veikimas tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose. Nustatytas 43 dB platesnis dinaminis diapazonas jutikliui veikiant heterodininės detekcijos schemoje, leido gauti geresnės kokybės tiriamų bandinių atspindžio ir pralaidumo vaizdus lyginant su tiesioginės detekcijos metodu.
- THz vaizdinimo eksperimentuose pirmą kartą pademonstruotos veikiančios kambario temperatūroje „peteliškės“ tipo jutiklių matricos su integruotais selektyvaus dažnio mažatriukšmiais stiprintuvais leido sutrumpinti vaizdinimo laiką iki 32 kartų lyginant su vieno detektoriaus sistema.
- Pirmą kartą buvo pristatyta idėja integruoti zoninę plokštelę ant BT jutiklio padėklo. Atlikus teorinius modeliavimus, ant InP padėklo buvo suprojektuotos ir suformuotos zoninės plokštelės. Aiški InGaAs BT jutiklio signalo priklausomybė nuo spinduliuotės kritimo kampo, patvirtinta ir teoriniais modeliavimais, parodė būtent zoninės plokštelės įtaką jutiklio signalui. Eksperimentiniais tyrimais patvirtinta, kad šis sprendimas gali padidinti jutiklio signalo amplitudę daugiau nei 20 kartų.
- Parodytos plačios terahercinės spinduliuotės koherentinio vaizdinimo taikymo galimybės saulės elementų ir jų modulių diagnostikoje.

Praktinė darbo vertė

- Sukurta InGaAs jutiklių matrica su integruotais stiprintuvais gali būti pritaikyta sparčiam signalo nuskaitymui kompaktiškose THz vaizdinimo sistemose, galinčiose veikti sudėtingose aplinkos sąlygose.
- THz vaizdinimo sistemoje panaudojus kompaktišką THz zoninę plokštelę galima pasiekti iki 25 % geresnę sistemos rezoliuciją lyginant su tos pačios skaitinės apertūros komerciniais paraboliniiais veidrodžiais.
- Praktiškai pademonstruota idėja integruoti zoninę plokštelę į BT jutiklio padėklą leidžia padidinti jo atsako amplitudę, sumažinti vaizdinimo sistemos optinių komponentų skaičių ir sistemos matmenis.
- Pademonstruoti THz spinduliuotės praktiniai taikymai ne tik paslėptų objektų aptikimui, bet ir saulės elementų diagnostikoje. Aptarti metodai, leidžia vertinti saulės elementų kontaktinių linijų litavimo kokybę, kontroliuoti atspindžius mažinančio paviršiaus sluoksnio ėsdinimo procesą ir saulės elementų modulių apsauginio sluoksnio storį.

Ginamieji teiginiai:

1. Eksperimentiškai nustatytam „peteliškės“ formos InGaAs detektoriaus jautrio mažėjimui virš 1 THz didžiausią įtaką turi elektrinio lauko stiprio priklausomybė nuo dažnio siaurojoje dalyje ties kontaktinės srities smaile, o atskiros jutiklio metalizuotos sritys veikia kaip dvi skirtingos antenos su aiškiai išreikštomis skirtingomis rezonansinėmis savybėmis.
2. „Peteliškės“ formos InGaAs jutikliuose, pagamintuose iš didesnės nei 50 k Ω /sq varžos InGaAs sluoksnio, voltamperinių charakteristikų formą ir jutiklio signalo pokyčius dėl juo tekančios nuolatinės srovės lemia paviršinių krūvių kuriamas elektrinis laukas.
3. Sukurtus „peteliškės“ formos InGaAs jutiklius naudojant THz vaizdų įrašymui heterodininės detekcijos metodu, dėl triukšmų įtakos sumažinimo galima pasiekti virš 40 dB platesnį dinaminį diapazoną, lyginant su tiesioginės detekcijos sistema.

4. InGaAs „peteliškės“ formos jutiklių matrica gali būti naudojama lygiagrečiam THz vaizdų eilučių nuskaitymui, nes gretimi jutikliai turi mažai įtakos jutiklio signalui, jei periodas tarp jų siekia bent 135 μm , o spinduliuotės dažnis yra virš 0.5 THz.
5. Pritaikytos THz ruožui standartinės ir sukurtos kombinuotų savybių zoninės plokštelės yra tinkamos aštriam terahercinės spinduliuotės fokusavimui. Jas integravus į „peteliškės“ tipo jutiklio padėklą, padidinama jo atsako amplitudė daugiau nei 20 kartų ir tuo pačiu metu sumažinamas atskirų vaizdinimo sistemos optinių komponentų skaičius.

Disertacijos planas

Disertaciją sudaro įvadinė dalis, šeši skyriai ir išvados. Įvade trumpai pristatoma terahercų dažnių spinduliuotės specifika bei pagrindinės darbo idėjos. Paaiškinama darbo motyvacija, iškelti uždaviniai, naujumas ir praktinė vertė. Taip pat pristatomi ginamieji teiginiai, autoriaus indėlis ir paskelbtų publikacijų sąrašas.

Pirmajame skyriuje apžvelgiamos terahercinės vaizdinimo sistemos ir jose naudojami jutikliai. Kiek plačiau aprašoma „peteliškės“ formos jutiklio atsiradimo istorija ir jo taikymai terahercinio vaizdinimo eksperimentuose. Trumpai apžvelgiama literatūra, susijusi su difrakcinės optikos ir dažniui selektyvių paviršių taikymais terahercinės spinduliuotės fokusavimui. Antrajame skyriuje aptariami elektrinių laukų pasiskirstymo modeliavimo rezultatai InGaAs jutikliuose. Trečiajame skyriuje aprašoma jutiklio gamybos technologija ir jų charakterizavimas bei aptariamas jutiklio veikimo modelio papildymas. Ketvirtasis skyrius skirtas jutiklio savybių tyrimams tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemose. Taip pat šiame skyriuje pristatomos jutiklių liniuotės ir vaizdinimas su jomis. Difrakcinių elementų tyrimai, jų taikymai terahercinės spinduliuotės fokusavimui bei galimybės juos integruoti jutiklių masyvuose aptariamos penktajame skyriuje. Šeštajame skyriuje aptariami terahercinės spinduliuotės taikymai saulės elementų kokybės kontrolėje. Pristatomos sukurtų jutiklių liniuočių taikymo idėjos sparčiose saulės elementų

gamybos linijose. Šių skyrių pagrindiniai rezultatai reziumuojami disertacijos išvadose.

Autoriaus indėlis

Disertacijos autorius atliko visus jutiklio anteninių efektų, antenų ir zoninių plokštelių dizainų teorinius modeliavimus naudojant baigtinių skirtumų laiko skalėje metodą. Taip pat autorius atliko visus darbus susijusius su jutiklių gamyba pradedant litografijos kaukės rengimu ir baigiant detektorių korpusavimu. Detektoriai buvo pagaminti stažuojantis Fizikos institute, Johann Wolfgang Goethe Universitete, Vokietijoje. Autorius taip pat atliko visus jutiklio bei jų liniuočių panaudojimo terahercinėse vaizdinimo schemose tyrimus, atliko visus vaizdinimo eksperimentus, difrakcinės optikos elementų tyrimus bei terahercinės spinduliuotės taikymų saulės elementų diagnostikoje eksperimentus. Autorius paruošė straipsnių, susijusių su disertacijos tema rankraščius, taip pat dalyvavo rengiant pranešimus konferencijoms, dalį jų pristatė pats. InGaAs ruošinius pagamino dr. Renata Butkutė (FTMC, Optoelektronikos skyrius) ir Klaus Köhler (Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics, Vokietija). Ruošinių peršviečiančios elektronų mikroskopijos matavimus atliko dr. Rokas Kondrotas (FTMC, Medžiagų struktūrinės analizės skyrius). Jutiklių triukšmų rezultatai gauti bendradarbiaujant su Triukšmų tyrimų laboratorija (VU, Fizikos fakulteto Radiofizikos katedra). Elektrostatinio potencialo pasiskirstymo skaičiavimus su Sypapsys TCAD paketu atliko dr. Ernestas Žąsinas (VU, Fizikos fakulteto Puslaidininkių fizikos katedra). Matavimus atominių jėgų mikroskopu atliko dr. Virginijus Bukauskas (FTMC, Fizikinių technologijų skyrius). Zoninių plokštelių gamybą atliko dr. Bogdan Voisiat (FTMC, Lazerinių technologijų skyrius).

Doktorantūros studijų metu disertacijos autorius vadovavo K. Madeikio ir M. Šoliūno mokslinėms praktikoms projekte „Studentų mokslinės veiklos skatinimas“.

Publikacijų sąrašas

Publikacijų sąrašas disertacijos tema ISI sąrašo leidiniuose:

- [IP 1] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, K. Madeikis, B. Voisiat, I. Kašalynas, ir G. Valušis, On-chip integration of laser-ablated zone plates for detection enhancement of InGaAs bow-tie terahertz detectors, *Electron. Lett.* **50**(19), 1367–1369 (2014).
- [IP 2] L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, I. Kašalynas, R. Venckevičius, G. Račiukaitis, V. Tamošiūnas, ir G. Valušis, Focusing Performance of Terahertz Zone Plates with Integrated Cross-shape Apertures, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **35**(9), 699–702 (2014).
- [IP 3] L. Minkevičius, S. Balakauskas, M. Šoliūnas, R. Suzanovičienė, J. Uzėla, G. Molis, R. Juškėnas, A. Selskis, G. Niaura, G. Valušis, V. Tamošiūnas, Far infrared spectroscopy and imaging of Cu(In,Ga)Se₂ layers, *Lith. J. Phys.* **53**(4), 219–226 (2013).
- [IP 4] L. Minkevičius, B. Voisiat, A. Mekys, R. Venckevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, G. Račiukaitis, ir V. Tamošiūnas, Terahertz zone plates with integrated laser-ablated bandpass filters, *Electron. Lett.* **49**(1), 49–50 (2013).
- [IP 5] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, S. Balakauskas, G. Molis, A. Krotkus, G. Valušis, ir V. Tamošiūnas, Detection of tab wire soldering defects on silicon solar cells using terahertz time-domain spectroscopy, *Electron. Lett.* **48**(15), 932 (2012).
- [IP 6] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, ir K. Köhler, Terahertz heterodyne imaging with InGaAs-based bow-tie diodes, *Appl. Phys. Lett.* **99**(13), 1–3 (2011).
- [IP 7] L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, ir G. Valušis, Frequency-dependent properties of InGaAs bow-tie detectors in terahertz range, *Lith. J. Phys.* **50**(2), 173–180 (2010).

Publikacijų sąrašas disertacijos tema kituose recenzuojamuose leidiniuose:

- [P 1] L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, V. Tamošiūnas, G. Valušis, G. Račiukaitis, ir I. Kašalynas, Compact diffractive optical components for terahertz beam manipulation, 2015 40th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz waves, 1–2 (IEEE, 2015).
- [P 2] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, R. Venckevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, D. Seliuta, G. Račiukaitis, ir G. Valušis, On-chip integration solutions of compact optics and detectors in room-temperature terahertz imaging systems, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, 95850M (International Society for Optics and Photonics, 2015).
- [P 3] V. Tamošiūnas, L. Minkevičius, A. Vaitkūnas, A. Urbanowicz, A. Maneikis, A. Šetkus, ir G. Valušis, Characterization of Silicon

- Solar Cells and Module Materials Using Terahertz Radiation, *Energy Procedia* **77**, 202–207 (2015).
- [P 4] S. Pralgauskaitė, J. Matukas, A. Lisauskas, V. Palenskis, I. Kašalynas, L. Minkevičius, D. Seliuta, ir G. Valušis, Low frequency noise characteristics of bow-tie THz detectors based on InGaAs, 2015 Int. Conf. Noise Fluctuations, 1–4 (IEEE, 2015).
- [P 5] In the Zone, *Electron. Lett.* **50**(19), 1332–1332 (2014).
- [P 6] L. Minkevičius, K. Madeikis, I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, ir G. Valušis, Discrete spectrum terahertz imaging using bow-tie diodes: optimized antenna designs and arrays, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, 88460P (International Society for Optics and Photonics, 2013).
- [P 7] L. Minkevičius, M. Ragauskas, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaite, D. Seliuta, I. Kašalynas, ir G. Valušis, InGaAs bow-tie diodes for terahertz imaging: low frequency noise characterisation, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, 849612 (International Society for Optics and Photonics, 2012).
- [P 8] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, G. Molis, A. Krotkus, S. Balakauskas, R. Venckevičius, I. Kašalynas, I. Šimkienė, G. Valušis, et al., Solar cell imaging and characterization by terahertz techniques, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, 849613 (International Society for Optics and Photonics, Frankfurt, Germany, 2012).
- [P 9] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, G. Molis, A. Krotkus, S. Balakauskas, R. Venckevičius, I. Kašalynas, I. Šimkienė, G. Valušis, et al., Terahertz techniques for solar cell imaging, *Phys. Semicond. Proc. 31st Int. Conf. Phys. Semicond. 2012* **1566**(1), 375–376 (AIP Publishing, 2013).
- [P 10] G. Valušis, L. Minkevičius, I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, et al., Heterodyne and spectroscopic room temperature terahertz imaging using InGaAs bow-tie diodes, 2012 19th Int. Conf. Microwaves, Radar Wirel. Commun., 105–107 (IEEE, 2012).
- [P 11] L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, A. Mekys, R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Račiukaitis, G. Valušis, ir V. Tamošiūnas, Study of terahertz zone plates with integrated cross-shape apertures, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 1–2 (IEEE, Mainz, Germany, 2013).
- [P 12] L. Minkevičius, A. Urbanowicz, A. Krotkus, A. Šetkus, ir V. Tamošiūnas, Characterization of encapsulation and metal interconnects of solar cells by terahertz techniques, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 1–2 (IEEE, Mainz, Germany, 2013).
- [P 13] M. Ragauskas, V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, ir G. Valušis, Low frequency noise characteristics of InGaAs bow-tie diodes for

- terahertz detection, 2013 22nd Int. Conf. Noise Fluctuations, 1–4 (IEEE, 2013).
- [P 14] L. Minkevičius, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, D. Seliuta, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, ir K. Köhler, Terahertz heterodyne detection and imaging with the InGaAs bow-tie diode, 2011 Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 1–2 (IEEE, 2011).
- [P 15] I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, D. Seliuta, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, ir K. Köhler, Properties of the InGaAs bow-tie diode arrays for room temperature terahertz detection, 2011 Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves(001), 1–2 (IEEE, 2011).

Parengtų spausdinimui publikacijų sąrašas

- [PS 1] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, M. Kojelis, E. Žąsinas, V. Bukauskas, A. Šetkus, I. Kašalynas and G. Valušis, Influence of field effect on the performance of InGaAs-based terahertz radiation detectors, <http://arxiv.org/abs/1605.00828v1>

Publikacijos neįtrauktos į disertaciją

- [NP 1] A. Lisauskas, M. Bauer, S. Boppel, M. Mundt, B. Khamaisi, E. Socher, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, V. Krozer, ir H. G. Roskos, Exploration of Terahertz Imaging with Silicon MOSFETs, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **35**(1), 63–80 (2014).
- [NP 2] M. Bauer, R. Venckevičius, I. Kašalynas, S. Boppel, M. Mundt, L. Minkevičius, A. Lisauskas, G. Valušis, V. Krozer, H. G. Roskos, Antenna-coupled field-effect transistors for multi-spectral terahertz imaging up to 4.25 THz., *Opt. Express* **22**(16), 19235–19241 (Optical Society of America, 2014).
- [NP 3] A. Lisauskas, S. Boppel, M. Bauer, M. Mundt, V. Krozer, H. G. Roskos, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta ir G. Valušis, Foundry-processed Detector Arrays for Terahertz Spectroscopy and Real-time Imaging Applications, *Adv. Photonics 2013*, (OSA, Washington, D.C., 2013).
- [NP 4] L. Minkevičius, A. Urbanowicz, A. Krotkus, A. Šetkus, ir V. Tamošiūnas, Characterization of encapsulation and metal interconnects of solar cells by terahertz techniques, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IRMMW-THz), rugsėjo 1 - 6 d., (IEEE, Mainz, Germany, 2013).
- [NP 5] S. Boppel, A. Lisauskas, M. Bauer, M. Mundt, R. Venckevičius, L. Minkevičius, D. Seliuta, I. Kašalynas, B. Khamaisi, E. Socker, G. Valušis, V. Krozer, H. G. Roskos, Optimized Tera-FET detector performance based on an analytical device model verified

- up to 9 THz, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IRMMW-THz), rugsėjo 1 - 6 d., (IEEE, Mainz, Germany, 2013).
- [NP 6] V. Kaveckytė, R. Venckevičius, L. Minkevičius, B. Voisiat, G. Račiukaitis, G. Valušis, ir I. Kašalynas, Effects of thin dielectric layer on plasmon excitation in perforated metal films, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IRMMW-THz), rugsėjo 1 - 6 d., (IEEE, Mainz, Germany, 2013).
- [NP 7] A. Lisauskas, S. Boppel, J. Matukas, V. Palenskis, L. Minkevičius, G. Valušis, P. Haring-Bolívar, ir H. G. Roskos, Terahertz responsivity and low-frequency noise in biased silicon field-effect transistors, *Appl. Phys. Lett.* **102**(15) (2013).
- [NP 8] S. Pralgauskaitė, J. Matukas, J. Vysniauskas, V. Kornijcuk, V. Palenskis, L. Minkevičius, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, et al., Low frequency noise characterisation of biased silicon CMOS terahertz detectors, 2012 19th Int. Conf. Microwaves, Radar Wirel. Commun. **2**, (IEEE, 2012).
- [NP 9] A. Lisauskas, S. Boppel, M. Saphar, V. Krozer, L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, G. Valušis, H. G. Roskos, Detectors for terahertz multi-pixel coherent imaging and demonstration of real-time imaging with a 12x12-pixel CMOS array, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, (International Society for Optics and Photonics, 2012).
- [NP 10] S. Boppel, A. Lisauskas, M. Mundt, D. Seliuta, L. Minkevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, M. Mittendorff, S. Winnerl, V. Krozer, CMOS Integrated Antenna-Coupled Field-Effect Transistors for the Detection of Radiation From 0.2 to 4.3 THz, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **60**(12), 3834–3843 (IEEE, 2012).
- [NP 11] S. Boppel, A. Lisauskas, D. Seliuta, L. Minkevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, V. Krozer, ir H. G. Roskos, CMOS integrated antenna-coupled field-effect-transistors for the detection of 0.2 to 4.3 THz, 2012 IEEE 12th Top. Meet. Silicon Monolith. Integr. Circuits RF Syst. SiRF 2012 - Dig. Pap., (2012).
- [NP 12] S. Boppel, A. Lisauskas, D. Seliuta, L. Minkevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, V. Krozer, ir H. G. Roskos, Silicon CMOS-transistor-based detection up to 4.25 THz, 2011 Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, (IEEE, 2011).
- [NP 13] A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, J. Matukas, V. Palenskis, L. Minkevičius, G. Valušis, ir P. Haring Bolivar, Terahertz responsivity enhancement and low-frequency noise study in silicon CMOS detectors using a drain current bias, 2011 21st Int. Conf. Noise Fluctuations, (IEEE, 2011).

Pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose:

- [K 1] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, B. Voisiat, ir G. Valušis, Terahercinis jutiklis su integruota difrakcine optika, 41-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. programa ir pranešimų tezės, (Vilnius, Lietuva, 2015).
- [K 2] A. Vaitkūnas, L. Minkevičius, ir V. Tamošiūnas, Evaluation of anisotropic InP and Si etching possibilities for the fabrication of the diffractive THz photonic components, Open readings Program. Abstr., (Vilnius, Lietuva, 2015).
- [K 3] G. Valušis, I. Kašalynas, D. Seliuta, R. Venckevičius, L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, B. Voisiat, ir G. Račiukaitis, Compact Spectroscopic Terahertz Imaging Systems: Sensors and Optics Design, Ext. Abstr. 3th Int. Symp. Microwave/THz Sci. Appl., (Okinava, Japan, 2015).
- [K 4] I. Kašalynas, G. Valušis, R. Venckevičius, L. Minkevičius, ir M. Vinciūnas, Compact Spectroscopic Terahertz Imaging Systems for detection of Explosives and CBRN, NATO Adv. Res. Work. THz Diagnostics CBRN Eff. Detect. Explos. CBRN, (Izmir, Turkey, 2015).
- [K 5] G. Valušis, L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, R. Venckevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, D. Seliuta, ir G. Račiukaitis, Compact optics and detectors for room temperature terahertz imaging systems, 51th Int. Conf. Microelectron. Devices Mater. Work. Terahertz Microw. Syst., (Bled, Slovenia, 2015).
- [K 6] S. Pralgauskaitė, R. Venckevičius, J. Matukas, V. Palenskis, K. Mockus, I. Kašalynas, L. Minkevičius, D. Seliuta, ir G. Valušis, GaAs/AlGaAs supergardių, skirtų terahercinės spinduliuotės detekcijai, žemadažnių triukšmų charakteristikos, 41-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. programa ir pranešimų tezės, birželio 17-19 d., (Vilnius, Lietuva, 2015).
- [K 7] L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, K. Madeikis, R. Venckevičius, B. Voisiat, I. Kašalynas, ir G. Valušis, Kompaktinės difrakcinės optikos sprendimai terahercinės spinduliuotės fokusavimui, 4-oji doktorantų ir Jaun. Moksl. Konf. spalio 28-29 d., (Vilnius, Lietuva, 2014).
- [K 8] L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Kašalynas, G. Valušis, M. Bauer, S. Boppel, A. Lisauskas, V. Krozer, et al., Performance comparison of the terahertz bow-tie-antenna and folded dipole-antenna-coupled AlGaN/GaN HEMT detectors at frequency 1.43 THz and beyond, International Work. Nitride Semicond. rugpjūčio 24-29, (Wroclaw, Poland, 2014).
- [K 9] K. Madeikis, L. Minkevičius, ir G. Valušis, Sub-THz imaging system in transmittance geometry, Open readings 2014, kovo 19-21, (Vilnius, Lietuva, 2014).

- [K 10] I. Kašalynas, L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, ir G. Valušis, Multispectra terahertz imaging with antenna-coupled microbolometers, transistors, and bow-tied diodes, Int. Conf. Semicond. Mid-IR Mater. Opt. vasario 26 - kovo 1, (Marburg, Germany, 2014).
- [K 11] I. Kašalynas, L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, ir G. Valušis, Multispectral terahertz imaging using compact room temperature operating sensors, GDR-I GDR Work. „Semiconductor sources Detect. THz radiation“, gruodžio 9 - 11 d., (Montpellier, France, 2013).
- [K 12] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, A. Urbanowicz, A. Krotkus, A. Šetkus, ir V. Tamošiūnas, Characterization of encapsulated solar cells by terahertz techniques, 28th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. rugsėjo 30 - spalio 4 d., (Paris, France, 2013).
- [K 13] L. Minkevičius, K. Madeikis, V. Tamošiūnas, D. Seliuta, I. Kašalynas, R. Venckevičius, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, et al., Compact terahertz imaging using antenna coupled bow-tie diodes via direct and heterodyne schemes, Proc. Int. THz Conf. rugsėjo 9 - 10 d., (Villach, Austria, 2013).
- [K 14] S. Boppel, A. Lisauskas, M. Bauer, M. Mundt, V. Krozer, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, et al., Terahertz detection and mixing with silicon field-effect transistors, Abstr. 15th Int. Symp. Ultrafast Phenom. Semicond. rugpjūčio 25 - 28 d., (Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 15] L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, A. Mekys, G. Valušis, ir V. Tamošiūnas, Terahercinių zoninių plokštelių su integruotais rezonansiniais filtrais savybių tyrimas, 40-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. programa ir pranešimų tezės, birželio 10-12 d, (Vilniaus universiteto leidykla., Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 16] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, S. Balakauskas, M. Šoliūnas, A. Urbanowicz, A. Krotkus, A. Šetkus, ir V. Tamošiūnas, Terahercų dažnių vaizdinimo sistemų taikymas saulės elementų tyrimams, 40-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. programa ir pranešimų tezės, birželio 10-12 d, (Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 17] S. Pralgauskaitė, J. Matukas, V. Palenskis, M. Ragauskas, I. Kašalynas, L. Minkevičius, D. Seliuta, ir G. Valušis, Peteliškės“ tipo InGaAs diodų - terahercinės spinduliuotės detektorių, triukšminių charakteristikų analizė, 40-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. programa ir pranešimų tezės, birželio 10-12 d, (Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 18] K. Madeikis, L. Minkevičius, ir G. Valušis, Antenna-coupled InGaAs “bow-tie” diode designs for terahertz detection, Open readings, kovo 10-23, (Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 19] M. Ragauskas, L. Minkevičius, J. Matukas, ir G. Valušis, Low frequency noise characterisation of bow tie diodes sensors for

- terahertz imaging, Open readings, kovo 10-23, (Vilnius, Lietuva, 2013).
- [K 20] L. Minkevičius ir V. Tamošiūnas, Zoninių plokštelių įkomponavimo į asimetrinius InGaAs THz detektorius modeliavimas, 3-oji Fiz. ir Technol. Moksl. Cent. doktorantų ir Jaun. Moksl. Konf. rugsėjo 25-26 d., (Vilnius, Lietuva, 2012).
- [K 21] L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, G. Molis, A. Krotkus, S. Balakauskas, R. Venckevičius, I. Kašalynas, I. Šimkienė, G. Valušis, et al., Solar cell imaging and characterization by terahertz techniques, 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. rugsėjo 24 - 28 d., (Frankfurt, Germany, 2012).
- [K 22] L. Minkevičius ir V. Tamošiūnas, Simulation and investigation of zone plates integration into InGaAs bow-tie diodes, AvH Work. „Advanced Solut. Terahertz Technol. liepos 13 - 16 d., (Riezlern, Austria, 2012).
- [K 23] K. Madeikis ir L. Minkevičius, Focusing elements for terahertz frequency detectors, Open readings, kovo 28, (Vilnius, Lietuva, 2012).
- [K 24] A. Lisauskas, S. Boppel, V. Krozer, H. G. Roskos, L. Minkevičius, D. Seliuta, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, ir G. Valušis, Terahertz detectors for multipixel coherent imaging, , 1st Int. Symp. Terahertz Nanosci., lakričio 24 - 29 d., (Osaka, Japan, 2011).
- [K 25] A. Lisauskas, S. Boppel, V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, L. Minkevičius, G. Valušis, ir H. G. Roskos, Silicio CMOS detektorių atsako į THz spinduliutę ir jų žemadažnių triukšmų tyrimai, 39-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. spalio 6-8 d., (Vilnius, Lietuva, 2011).
- [K 26] L. Minkevičius, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, D. Seliuta, G. Valušis, A. Lisauskas, S. Boppel, H. G. Roskos, ir K. Köhler, Heterodininis terahercinis vaizdinimas kambario temperatūroje naudojant InGaAs struktūrinės asimetrijos diodą, 39-oji Liet. Nac. Fiz. Konf. spalio 6 - 8 d., (Vilnius, Lietuva, 2011).

1 LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Terahercinės spinduliuotės pritaikymo sritys

THz spinduliuotė dėl savo unikalių savybių suteikia pluoštą pritaikymo galimybių įvairiose srityse. Kadangi THz spinduliuotės bangos ilgis yra trumpesnis nei mikrobangų ruožo, galima pasiekti didesnę skyrą. Šis medžiagos neardantis tyrimų būdas nuo 2003 m. yra taikomas kompozitinių medžiagų tyrimuose aeronautikoje [20], saulės elementų gamybinių defektų inspekcijai [IP 6], saugumo sistemose ieškant paslėptų objektų, ginklų ar narkotinių medžiagų [21], pašto siuntų kontrolės sistemose [22], dažyto metalo rūdžių po dažais inspekcijoje [23]. Medicinoje ši spinduliuotė taikoma kaip pagalbinis metodas vėžio diagnostikoje [24], stomatologijoje emalio ir dentino sluoksnio vertinimui [25] ar supakuotų vaistų tablečių kokybės kontrolei [23].

1.2 THz vaizdinimo sistemos

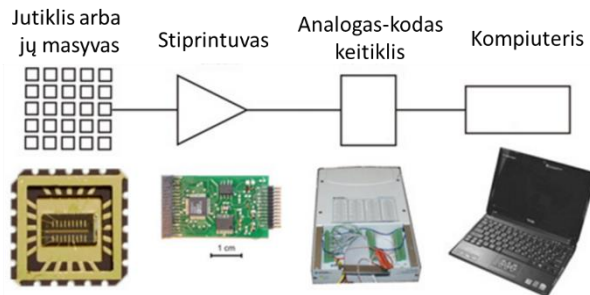
Kompaktiškų, kambario temperatūroje veikiančių sistemų, gebančių registruoti THz spinduliuotę tyrimai ir kūrimas išlieka vienu iš esminių uždavinių šioje dažnių srityje [26,27]. Sistemos, galinčios registruoti šią spinduliuotę gali būti suskirstytos į dvi grupes:

- Koherentinės sistemos.

Šiose sistemose jutikliai registruoja ne tik signalo amplitudę, bet ir fazę. Naudojamas heterodininis signalo registravimo principas [28] arba laikinės skyros spektroskopija (TDS) [29]. Ši sistema naudoja femtosekundinį lazerį, kurio spindulys dalinamas į dvi dalis. Viena dalis patenka į emiterį (fotolaidžią anteną), kuris sugeneruoja THz impulsą. Šis impulsas patenka į detektorių. Antra dalis femtosekundinio lazerio impulso, praėjusi vėlinimo liniją, taip pat patenka į detektorių. Keičiant vėlinimo linijos padėtį gaunamas THz impulso elektrinio lauko pasiskirstymas laike. Naudojant TDS sistemą objektų vaizdinimui, jos pagrindinis trūkumas yra vaizdo užrašymo trukmė.

- Nekoherentinės sistemos.

Jose naudojami jutikliai registruoja tik signalo intensyvumą. Šios sistemos dažniausiai yra plačiajuostės. Nekoherentinė tiesioginės THz detekcijos sistema išsiskiria savo paprastumu. Principinė jos schema yra pateikta 1 pav. Sistemą sudaro THz šaltinis, detektorius ir nuskaitymo elektronika. Detektorius parenkamas pagal sistemos taikymo sritį.



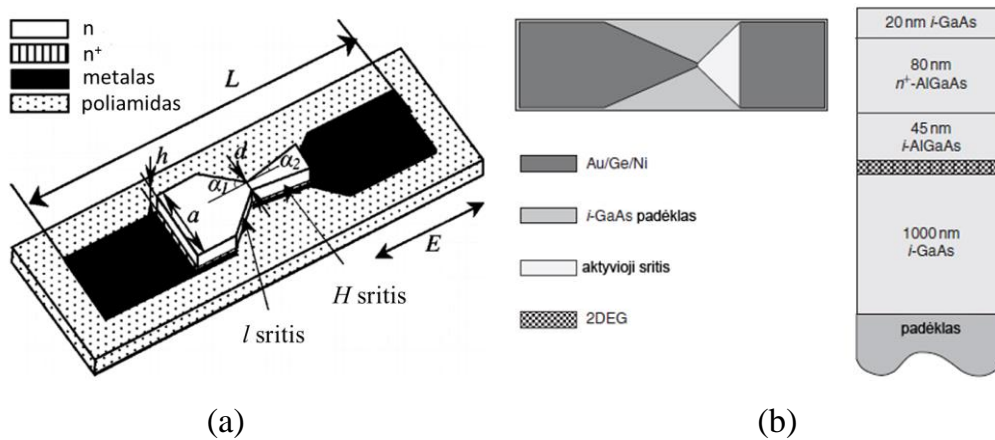
1 pav. Principinė THz vaizdinimo sistemos schema. [30]

Itin silpnų signalų registravimui naudojami ilgo atsako laiko ($\tau \approx 10^{-2}$ s) šiluminiai detektoriai. Tarp jų yra Golajaus celės (*angl.* Golay cells) [31], piroelektriniai detektoriai [32]. Realus laiko vaizdinimo sistemos keliami reikalavimai jutikliui yra platus dinaminis diapazonas, veikimas kambario temperatūroje bei galimybė jutiklius komponuoti į masyvus, kurių gamybai būtų tinkama jau įvaldyta puslaidininkinių lustų planarinė gamybos technologija. Šiuos reikalavimus jau atitinka komerciniai Šotki (*angl.* Schottky) [33,34] detektoriai, mikrobolometrų masyvai [16,35–37], lauko tranzistoriai (*angl.* field effect transistor – FET) su nanometriniu užtūra kanale [38–40], kurių veikimas remiasi plazminių bangų lyginimo reiškiniu dvimačiame elektronų dujų sluoksnyje [41]. Jie gali veikti tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose [42] iki 2.5 THz [43]. Tinkamas dizainas ir antenos parinkimas leidžia optimizuoti detektoriaus jautrį norimam dažniui. Pavyzdžiui, taikant „peteliškės“ tipo antenas THz spinduliuotės surinkimui į komercinės 130 nm technologijos CMOS lauko tranzistorių galima pasiekti jautrį iki 5 kV/W dažnių srityje nuo 0.27 THz iki 1.05 THz [44]. Keičiant „peteliškės“ tipo anteną į rezonansinę plokštelinę (*angl.* patch) anteną, komercinės 150 nm technologijos lauko tranzistorių matrica veiks ties antenos rezonansiniu dažniu [NP 11].

Paminėti jutikliai yra jautrūs ir spartūs, tačiau vienas iš pagrindinių reikalavimų praktiškomis vaizdinimo sistemoms yra jų ilgaamžiškumas, patvarumas ir, žinoma – kaina. Deja, paminėti jutikliai šiomis savybėmis nepasižymi.

1.3 „Peteliškės“ formos jutikliai THz dažnių ruožui

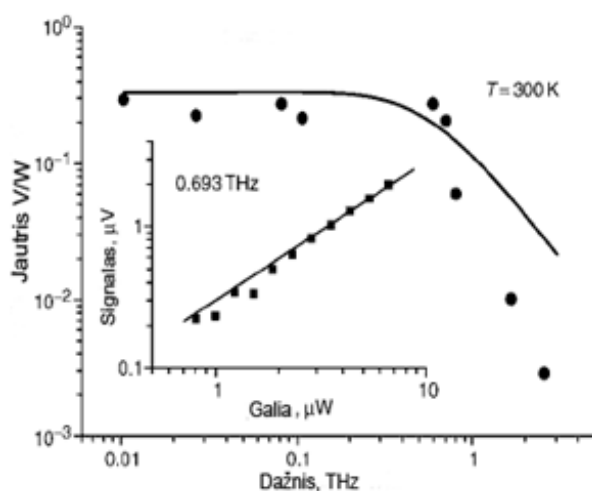
Ieškant patvaraus ir technologiškai paprasto jutiklio būtų galima paminėti 2003 metais [17] darbe pristatytą asimetrinės formos $n-n^+$ GaAs struktūrą. Jos principinis vaizdas pateiktas 2 a pav. Ją sudaro fotolitografijos būdu suformuotas asimetrinis GaAs sluoksnis su l sritimi, kuri legiruota 10^{15} cm^{-3} ir h sritimi legiruota 10^{18} cm^{-3} . Suformuoti stačiakampiai Ge-Ni-Au kontaktai. Viskas padengta $10 \mu\text{m}$ poliamido sluoksniu, o likęs GaAs nuėsdinamas iš kitos pusės taip ant poliamido padėklo paliekant tik asimetrinę GaAs dalį su kontaktais. Jutiklio veikimo principas aiškinamas netolygiu laisvų krūvininkų kaitimo efektu l ir h srityse [45].



2 pav. Principinis jutiklio su asimetrine sąsmauka vaizdas (a). Jutiklis su „peteliškės“ formos antena ir jo skerspjūvis (b). [17,46]

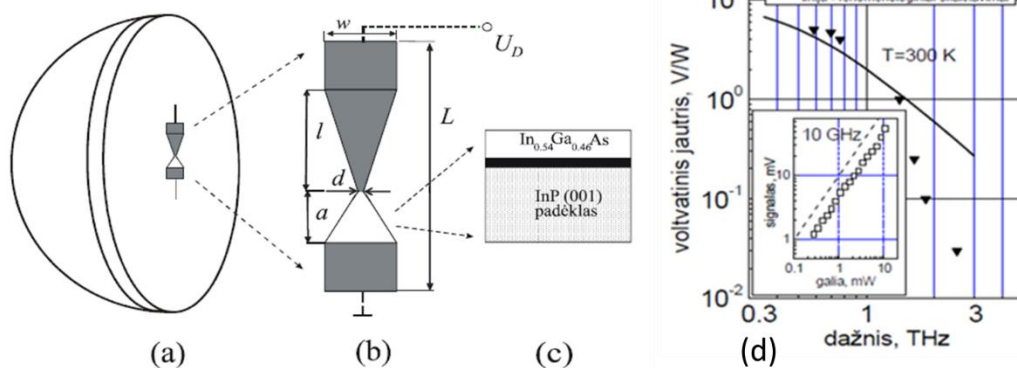
Šis jutiklis yra atsparus elektrostatiniam krūviui ir nekeičia savybių, jį apšvietus pastovia net 1 W galios elektromagnetine spinduliuote. Šių struktūrų voltatinis jautris nepriklauso nuo dažnio 30 GHz – 700 GHz intervale. Jautrio vertė kambario temperatūroje siekia apie 0.3 V/W, o skysto azoto temperatūroje dėl didesnio krūvininkų judrio – 20 V/W [17,45]. 2004 metais [46] autoriai pabandė pritaikyti plačiajuostę „peteliškės“ formos anteną. Jie pagamino

„peteliškės“ formos GaAs/AlGaAs detektorių su dvimačių elektronų dujų sluoksniu. Jo forma ir sandara yra pavaizduota 2 b pav. Antena nėra simetriška: kairysis „lapas“ metalizuotas, o dešinysis yra tik dvimačių elektronų dujų sluoksnis po nemetalizuotu paviršiumi. Šio jutiklio išmatuota jautrio priklausomybė yra pateikta 3 pav. Nustatyta, kad intervale nuo 10 GHz iki 0.8 THz, jautris yra pastovus, o jo vertė nesiskiria nuo n-n⁺ GaAs detektoriaus jautrio ir siekia 0.3 V/W. Aukštesniuose dažniuose jautris monotoniškai krinta ir pasiekia 3·10⁻³ V/W ties 2.52 THz.



3 pav. GaAs/AlGaAs detektoriaus jautrio priklausomybė nuo dažnio. Taškais pažymėti eksperimentiniai duomenys, o linija žymi fenomenologinį skaičiavimą. Intarpe pateikta eksperimentiškai registruojamo jutiklio atsako priklausomybė nuo krintančios bangos galios. [46]

Šie rezultatai rodo, kad antenos nepakanka norint pasiekti didesnę jutiklio jautrį. 2006 metais pasirodė straipsnis [19], siūlantis pakeisti GaAs medžiagą, kur krūvininkų tankis yra 5.5·10¹¹ cm⁻³, o judris 4700 cm²/Vs, panaudojant InGaAs, su krūvininkų tankiu 2·10¹⁵ cm⁻³, o judris gali siekti iki 13300 cm²/Vs. Geresnei spinduliuotės koncentracijai į aktyviąją sritį autoriai pasiūlė papildomai naudoti Si lęšį (4 a pav.).



4 pav. Principinis detektoriaus su Si lęšiu vaizdas (a) Jutiklio geometrija ir aktyviosios dalies dizainas (b) bei aktyviosios dalies skerspjūvis (c). Jautrio priklausomybė nuo dažnio (d), trikampaiais pažymėti eksperimentiniai duomenys, o linija – fenomenologinis skaičiavimas. Intarpe pavaizduota eksperimentiškai registruojamo jutiklio atsako priklausomybė nuo krantinčios bangos galios. [19]

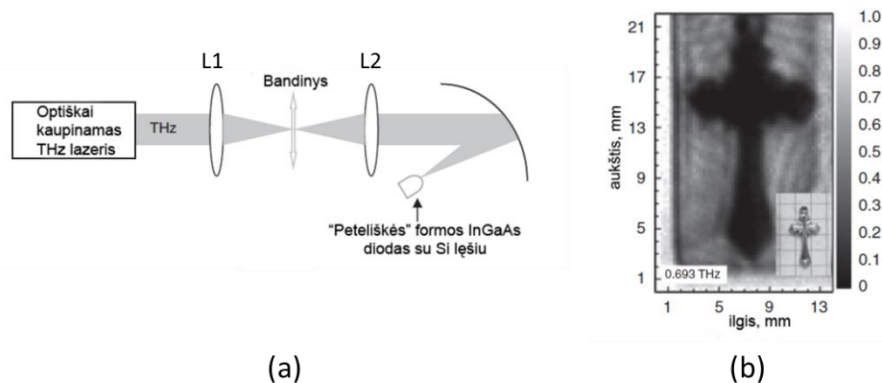
Šie sprendimai pasiteisino ir jutiklio jautris kambario temperatūroje dažniuose nuo 0.584 – 0.763 THz padidėjo iki 5 V/W (4 d pav.). Ši vertė yra daugiau nei eile didesnė nei GaAs „peteliškės“ formos jutiklio dėl gerokai didesnio elektronų judrio aktyviojoje srityje. Tačiau aukštesniuose dažniuose, jautris, kaip ir GaAs jutiklio atveju gerokai stipriau nei numato fenomenologinis modelis sumažėja. Šiuo atveju, jis krinta nuo 1 V/W iki $3 \cdot 10^{-2}$ V/W ties 1.4 THz (4 d pav.). Autorių manymu, tai lėmė anteniniai efektai.

1.3.1 Vaizdinimo sistemos su BT jutikliu

2009 metais autoriai [18] pirmą kartą panaudojo BT jutiklį (4 a pav.) terahercinėje vaizdinimo sistemoje. Straipsnyje akcentuojama, kad jutiklio atsako laikas siekia tik 7 ns. Įvertintas dinaminis diapazonas yra apie 20 dB, kai praleidžiamų dažnių juosta 100 MHz, o NEP yra $5.8 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Lyginant su lauko tranzistoriais ar mikrobolometrais ši vertė yra keliomis eilėmis mažesnė [47].

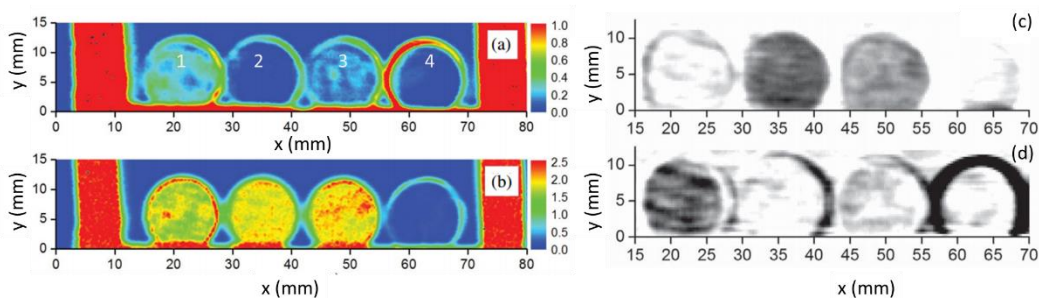
Vaizdinimo eksperimento schema ir voke esančio metalinio kryžiuo THz vaizdas pralaidume ties 0.693 THz yra pateiktas 5 pav. Vaizdinimas atliktas sinchronizuotai judinant bandinį lęšio L1 židinio plokštumoje ir taip kiekviename taške nuskaitant THz jutiklio signalo amplitudės vertę. 5 b pav.

aiškiai matome metalinio kryžiuo kontūrus ir šešėlius, atsirandančius dėl THz spinduliuotės atspindžių tarp voko sienelių.



5 pav. Uždarame voke patalpinto metalinio kryžiuo 0.693 THz vaizdas. Intensyvumas normuotas į maksimalią vertę. Intarpe pateikta kryžiuo nuotrauka. [18]

Galimybė BT [19] jutikli taikyti spektroskopiniam vaizdinimui THz dažnių ruože buvo pristatyta 2011 metais [48] darbe. Autoriai atliko sacharozės ir vyno rūgštis tablečių, kurių spektrai yra panašūs į sprogmėnų spektrus [49], vaizdinimą pralaidume dažnių intervale nuo 0.58 THz iki 2.52 THz. Jiems pavyko užregistruoti sacharozės ir vyno rūgštis spektrinius ypatumus, kurie gerai sutapo su išmatuotais šių bandinių sugerties spektrais naudojant Furjė (Fourier) spektroskopiją [48,50]. Simuliatorių tablečių, kurių storis 1.4 mm, THz vaizdas ties 0.76 THz ir 2.52 THz (z skalėje atidėtas pralaidumo T logaritmas – $\lg(T)$) pateiktas 6 a ir b pav. Matome, kad ties 0.76 THz tabletės 1 ir 3, kurias sudaro 10 % ir 5 % vyno rūgštis, labiau sugeria THz spinduliuotę lyginant su tablete 2, sudaryta iš 10 % sacharozės, ir atramine tablete 4, sudaryta iš 100 % PFTE. Ties 2.52 THz, matomas ryškesnis tabletės kraštas dėl į bandinius fokusuojamos trumpesnio bangos ilgio spinduliuotės. Atlikus daugiadažnį THz vaizdinimą ir matematinius skaičiavimus [50] autoriai pateikia sacharozės ir vyno rūgštis koncentracijos pasiskirstymą tabletėse 6 pav. c, d.



6 pav. Sprogmenų simulatorių THz vaizdai ties 0.76 THz (a) ir 2.52 THz (b). Sacharozės (c) ir vyno rūgšties (d) koncentracijų pasiskirstymas tabletėse. [50]

Apibendrinant galima teigti, kad BT tipo jutikliai yra tinkami kambario temperatūroje veikiančioms THz vaizdinimo sistemoms. Geriausias šių jutiklių jautris dažnių intervale 0.584 THz – 0.763 THz siekia 5V/W, o NEP=5 nW/√Hz. Šių verčių pakanka, kad sistemos signalo – triukšmo santykis siektų 300 ir daugiau kartų esant kelių milivatų THz spinduliuotės galiai. Naudojant šiuos jutiklius spektroskopiniam vaizdinimui buvo pademonstruota galimybė atskirti medžiagas, jų pasiskirstymą bei sudėtį.

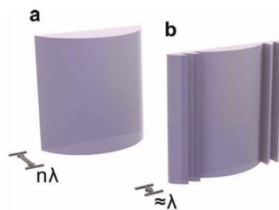
1.4 Difrakcinė optika THz spinduliuotės fokusavimui

Terahercinių šaltinių [51] ir detektorių tyrimai [52] skatina toliau ieškoti naujų sprendimų kuriant kompaktiškas vaizdinimo sistemas. Dažniausiai tokiose sistemose naudojami standartiniai lęšiai, gaminami iš teflono ar didelio tankio polietileno (HDPE) bei paraboliniai veidrodžiai. Mažinant sistemos matmenis ir didinant vaizdinimo rezoliuciją reikalingi trumpo židinio nuotolio lęšiai, jie neišvengiamai bus stori ir slopins pro juos praeinančią THz spinduliuotę. Išgaubtas hiperbolinis paviršius komplikuoja šių elementų gamybą ir juos padaro brangiais. Šiuos komponentus būtų galima pakeisti daug kompaktiškesniais difrakciniais komponentais. Zoninės plokštelės ar binariniai lęšiai [53] yra sąlyginai nebrangūs, kompaktiški fokusuojantys elementai, tinkantys THz spinduliuotės valdymui. Dažniausiai jie yra naudojami monochromatinės spinduliuotės fokusavimui. Toks lęšis susideda iš žiedų, Frenelio zonų (Fresnel), kurių plotis ir atstumas tarp kraštų vis mažėja tolstant nuo centro. Šie elementai geriausiai veikia tik vienam bangos ilgiui, o kitiems

sumažėja vaizdo kontrastas ir fokusavimo efektyvumas. Tačiau tokio tipo kompaktinės optikos sprendimai gana ženkliai galėtų sumažinti terahercinės vaizdinimo sistemos komponentų dydį bei atvertų galimybes juos integruoti į detektorių masyvus. Specifinėms vaizdinimo sistemoms, tokioms kaip spektroskopinis vaizdinimas [48,50], yra aktualios tik tam tikros spektrinės linijos. Tinkamus specifinius dažnius galima parinkti naudojant siaurajuosčius rezonansinius filtrus [54] ar kitus dažniui selektyvius komponentus [55–60]. Šios sistemos puikiai tinka paketuose paslėptų medžiagų atpažinimui.

1.4.1 Zoninės plokštelės

Tradiciškai elektromagnetinės spinduliuotės fokusavimui yra naudojami lęšiai. Jie keičia bangos fazę dėl optinių kelių skirtumo, kuris priklauso nuo lęšio storio ir medžiagos lūžio rodiklio n . Tokio lęšio storis bus proporcingas sandaugai tarp lūžio rodiklio n ir fokusuojamos bangos ilgio λ (7 a pav.). Fokusuojančio elemento storį, palyginamą su bangos ilgiu, galima pasiekti naudojant klasikinį Frenelio (Fresnel) lęšį, kurį sudaro žiedai ar linijos, išdėstytos vienoje plokštumoje (7 b pav.).



7 pav. Lęšio (a) ir Frenelio lęšio (a) storių pavyzdžiai. [61]

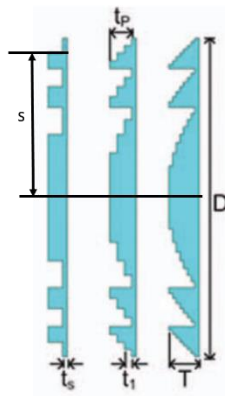
Taip galima turėti didelės apertūros ir trumpo židinio nuotolio lengvą lęšį. Šių lęšių veikimas pagrįstas bangos atspindžio ir refrakcijos efektais. Kiekvienas lęšis gali būti charakterizuojamas skaitine apertūra NA – židinio nuotolio ir lęšio skersmens santykiu:

$$NA = \frac{F}{D}, \quad (1.1)$$

kur F – lęšio židinio nuotolis, o D – lęšio skersmuo. Priklausomai nuo šio santykio, lęšis apibūdinamas kaip aukštos ($NA > 0.5$) ir žemos ($NA < 0.5$) skaitinės apertūros lęšis. Aukštos NA lęšis yra laikomas plonu, o žemos NA – storu [62]. Šie sprendimai puikiai tinka dirbant regimojoje spektro dalyje.

Fokusuojant THz dažnio spinduliuotę naudojamos mažos dielektrinės skvarbos medžiagos, todėl lęšiai ne visuomet yra geras sprendimas, nors praktikoje dar dažnai taikomas.

Kitas metodas fokusuoti THz spinduliuotę panaudojant difrakcinę optiką. Standartinė zoninė plokštelė (SZP), kurios veikimo principas remiasi difrakcijos efektu, jau gana seniai yra naudojama optikoje. Ją sudaro koncentrinų žiedų sistema. Zonos išdėstomos taip, kad difragavusi spinduliuotė interferuotų židinio taške. Paskutinį dešimtmetį, jos vis dažniau pritaikomos THz ruože [63–65]. Zoninė plokštelė pasižymi aukšta skaitine apertūra, yra plona ir lengva. Siekiant efektyvesnio spinduliuotės fokusavimo yra ieškoma įvairių fazės keitimo būdų: pjaunamos skirtingo gylio zonos dielektrike [62,65,66], struktūra daroma iš skirtingų dielektrinės skvarbos medžiagų [67] bei naudojamas metalas taip formuojant uždarytą žiedų sritis [68,69]. Ji, skirtingai nei lęšis, bangos fazę keičia laipsniškai. Didinant vienoje zonoje esančių pazonių skaičių galima priartėti prie tolygaus fazės pokyčio, kuris pasiekiamas lęšiuose dėl jų hiperbolinio paviršiaus. SZP, kuri sudaryta iš $p=2, 4, 8$ pazonių yra pavaizduota 8 pav. Priklausomai nuo pazonių skaičiaus, fazė yra keičiama per $2\pi/p$.



8 pav. SZP, sudarytos iš 2-jų, 4-ių ir 8-ių laiptelių, profiliai. [62]

Išorinės zonos s ($s=1, 2, \dots$) pazonės spindulys b_s aprašomas:

$$b_s = \sqrt{\frac{2s\lambda_0 F}{p} + \left(\frac{s\lambda_0}{p}\right)^2}, \quad (1.2)$$

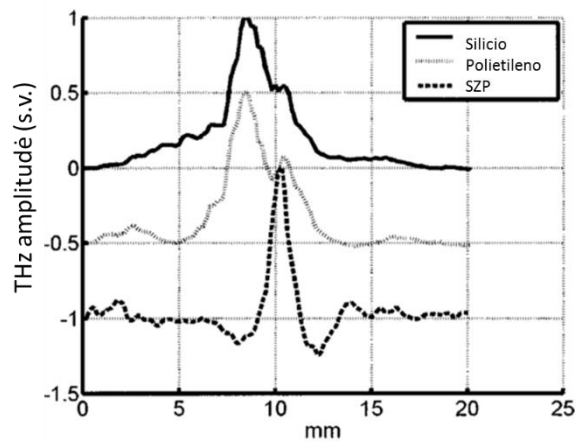
kur λ_0 – bangos ilgis, F – židinio nuotolis. Pazonės laiptelio gylis:

$$t_1 = \frac{\lambda_0}{p(n-1)}, \quad (1.3)$$

kur n – medžiagos lūžio rodiklis. Tada bendras SZP gylis t_p :

$$t_p = \frac{(p-1)\lambda_0}{p(n-1)}. \quad (1.4)$$

Fokusuotos 1 THz dažnio spinduliuotės profilio židinio taške palyginimas fokusuojant su 4 laiptelių silicio zonine plokštele ($F=26$ mm), silicio ($F=10$ cm) ir polietileno ($F=5$ cm) lęšiu pateiktas 9 pav. Intensityumo pasiskirstymo smailė siauresnė ir simetriškesnė zoninės plokštelės atveju [65].



9 pav. SZP silicio lęšio ir polietileno lęšio fokusavimo palyginimas. Kreivės paslinktos per 0.5 s.v. [65]

Tikėtinas laiptuotos SZP difrakcijos efektyvumas (fokusuotos spinduliuotės amplitudės padidėjimas židinio taške laikant, kad tos pačios medžiagos, skersmens ir židinio nuotolio lęšis fokusuoja 100 %) yra pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. SZP difrakcijos efektyvumas esant skirtingam laiptelių skaičiui [65].

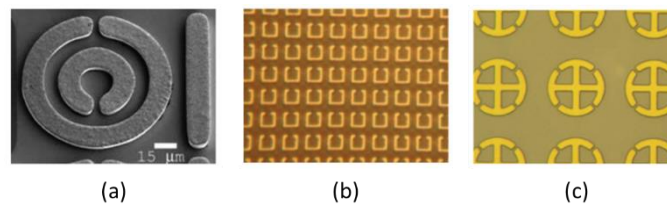
Difrakcijos efektyvumas η	2 laipteliai	4 laipteliai	8 laipteliai
Skaičiuotas	41%	81%	95%
Išmatuotas	11%	75%	90%

Iš 1 lentelės matome, kad didinant pazonių skaičių fokusavimo efektyvumas didėja ir beveik pasiekia lęšio fokusavimo efektyvumą, o energijos nuostoliai minimalūs. Tyrimai parodė, kad difrakcinė optika pasižymi mažesnėmis aberacijomis ir spinduliuotės slopinimu bei universalumu ją

integruojant detektorių masyvuose ar jungiant kartu su dažniui selektyviomis struktūromis.

1.4.2 Fokusuojantys dažniui selektyvūs paviršiai

Dažniui selektyvūs paviršiai (DSP) yra sudaryti iš pasikartojančių periodinių įvairių konfiguracijų struktūrų [70]. Keletas pavyzdžių yra pateikti 10 pav. DSP yra plačiai naudojami mikrobangų ruože ir radiolokacijoje kaip imtuvų ar siųstuvų antenų apsaugos ir siaurajuosčiai dažnių filtrai [71].



10 pav. Įvairių dizainų dažniui selektyvių struktūrų nuotraukos. Žiedų ir strypelio kombinacija (a), atvirų stačiakampių (b), kryžiukų (c) pavyzdžiai. [70]

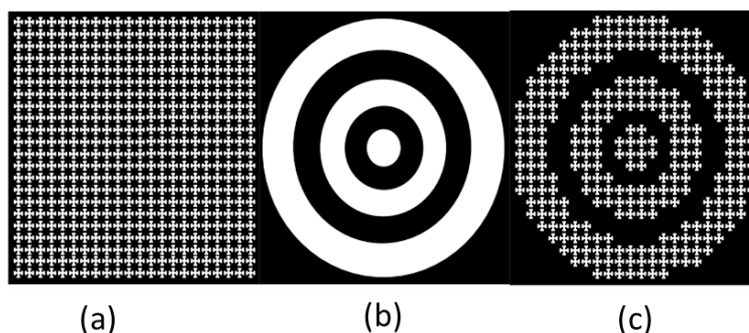
DSP sukurti taip, kad praleistų ar atspindėtų tam tikro dažnių ruožo spinduliuotę. Šių struktūrų matmenys ir periodas priklauso nuo bangos ilgio, o forma parenkama pagal taikymų sritis. Svarbu paminėti, kad DSP masyvo atspindžio ar pralaidumo koeficientas stipriai priklauso nuo periodinių struktūrų skaičiaus.

Šių ir panašių struktūrų gamyba priklausomai nuo dažnių srities, kurioje jie dirba, gali būti atliekama naudojant net ir frezavimo technologiją. Tačiau ši technologija netinkama kai reikalingi struktūrų matmenys yra maži ir siekia šimtus mikrometrų. Tokiu atveju pasitelkiama litografijos technologija kartu su ėsdinimo procedūromis. Fotolitografijos atveju pasiekama kelių mikrometrų rezoliucija ir 10-čių nanometrų rezoliucija elektronų litografijos atveju. Tačiau minėtos metodikos turi savų trūkumų, tokių kaip ilgas gamybos laikas, sudėtinga gamybos procedūra, struktūrų ėsdinimui priklausomai nuo medžiagos reikalingi skirtingi ėsdikliai. Gerokai universalesnis paviršiaus apdirbimo būdas – lazerinė spinduliuotė.

Lazerinės abliacijos sistema (LAS) yra lankstus būdas įvairių medžiagų apdirbimui. Jos skyra siekia keletą mikrometrų ir priklauso nuo sistemoje

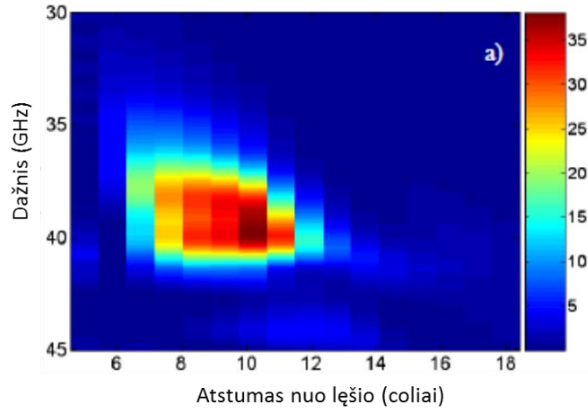
naudojamo lazerio bangos ilgio, jo impulso galios, pasikartojimo dažnio, abliacijos greičio ir kitų parametru [72]. Autoriai [54] darbe pademonstravo vektorinę ir rastrinę THz filtrų masyvo abliacijos strategijas. Jiems puikiai pavyko suformuoti DSP struktūras plieno folijoje ir molibdene parenkant skirtingus LAS abliacijos parametrus. Tai leidžia manyti, kad būtent ši technologija yra patraukli DSP, skirtų THz ruožui, gamybai.

Svarbu paminėti, kad difrakcinė optika gali būti kombinuojama su dažniui selektyviomis struktūromis, taip apjungiant skirtingų elementų savybes. Vienas iš bandymų sujungti DSP struktūras ir zoninės plokštelės savybes taip gaunant dažniui selektyvų fokusuojantį elementą buvo pademonstruotas [73] darbe. Tokia struktūra veikia kaip lęšis tik tam tikro bangos ilgio spinduliuotei.



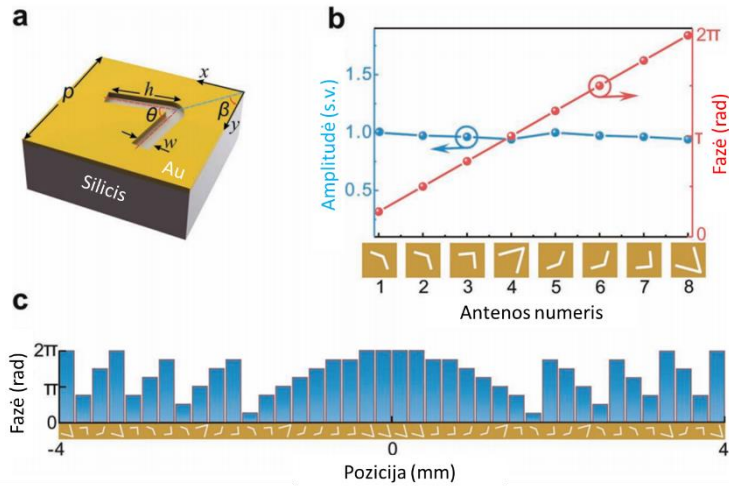
11 pav. Dažniui selektyvaus paviršiaus vaizdas (a), zoninės plokštelės vaizdas (b), sujungtos *a* ir *b* struktūros vaizdas (c). [73]

Išmatuotas spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymas už šios struktūros pateiktas 12 pav. Matome, kad toks elementas veikia kaip lęšis ir už jo spinduliuotės intensyvumas yra iki 35 kartų didesnis nei prieš DSP. Ji sufokusuoja elektromagnetinę spinduliuotę 25 cm atstumu nuo detektoriaus. Struktūra veikia dažnių ruože tarp 37 GHz ir 41 GHz.



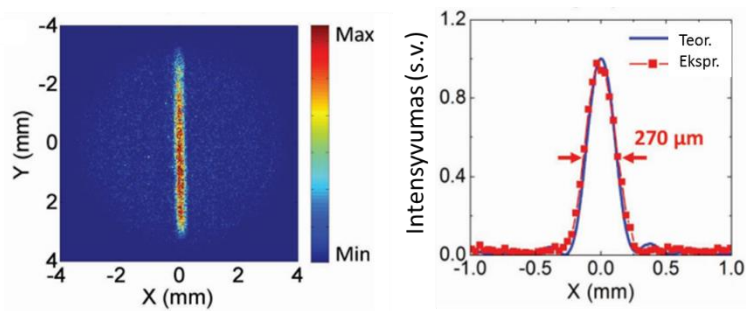
12 pav. Praėjusios pro difrakcinį elementą fokusuotos spinduliuotės intensyvumo spektrinis pasiskirstymas erdvėje. [73]

Kiti praktikoje rečiau sutinkami būdai, kurie leistų moduluoti fazę ir amplitudę taip dar labiau sumažinant fokusuojančio elemento storį, yra pristatyti [74] darbe. Autoriai pristato koloidinius tirpalus, kuriuose formuojamos nanofotoninės struktūros taip sukuriant optinius nanoklasterius, pasižyminčius rezonansinėmis savybėmis. Prieš keletą metų buvo atrastas staigus fazės kitimas sąsajoje tarp dviejų terpių, kur vienoje iš šių terpių yra suformuojamas antenų masyvas [75,76]. Remiantis Hiugenso principu, jeigu labai plonos antenos bus erdviškai išdėstytos tarp dviejų paviršių, atėjusios ir praėjusios bangos fazės pokytis gali būti valdomas priklausomai nuo antenų geometrijos. Remiantis šiuo principu [61] autoriai suprojektavo V tipo plyšinių antenų blokus ant 100 nm aukso sluoksniu padengto 500 μm silicio padėklo. Šio elemento principinis vaizdas pateiktas 13 pav. Antenų blokai leidžia keisti fazę nuo 0 iki 2π , $\pi/4$ intervalu. Tokios antenos charakteringi dydžiai pavaizduoti 13 a pav. Antenų masyvas praleidžia tik norimą dažnį, kuris parenkamas pagal plyšio plotį w ir bloko periodą p . Polinkio kampas θ ir plyšio ilgis h parenkami atliekant FDTD modeliavimus taip, kad būtų gaunamas norimas fazės pasukimas.



13 pav. V-tipo plyšinės antenos modelis (a). Amplitudės ir fazės pokytis praėjus skirtingą plyšinės antenos bloką (b). Iš V-tipo plyšinės antenos bloką sudėliota cilindrinio lęšio konfigūracija (c). [61]

8-ių skirtingų formų plyšinių antenų blokai ir jų poveikis praėjusios bangos fazei ir amplitudei pateikti 13 b pav. Sudėliojus antenų blokus tvarka, kuri pavaizduota 13 c pav. sudarytas 4 mm židinio nuotolio fokusuojantis elementas, kurio fokusavimo charakteristikos panašios į cilindrinio lęšio. 750 GHz fokusuotos spinduliuotės pasiskirstymas šio DSP lęšio židinio plokštumoje yra pavaizduotas 14 pav. kairėje. Skerspjūvis pateiktas 14 pav. dešinėje.



14 pav. Fokusuotos spinduliuotės pasiskirstymas erdvėje (kairėje), teoriškai suskaičiuotas (Teor.) ir eksperimentiškai išmatuotas (Ekspr.) fokusuotos spinduliuotės skerspjūvis židinyje. [61]

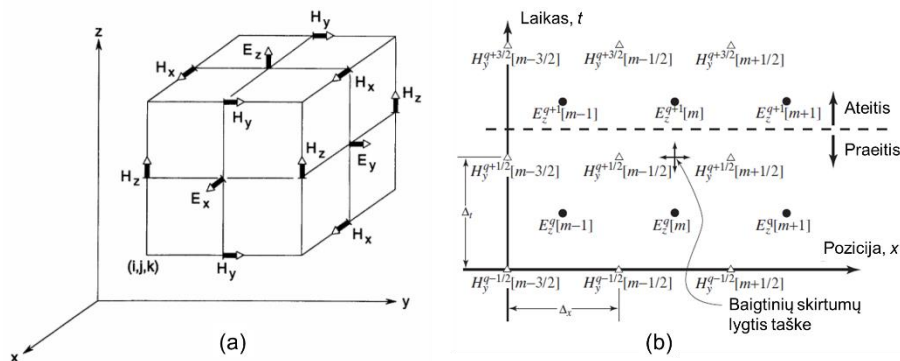
Matome, kad teoriškai suskaičiuoti ir išmatuoti skerspjūviai gerai sutampa, o Gausinio spindulio plotis pusės maksimalios amplitudės aukštyje – $FWHM = 270 \mu\text{m}$. Klasikinio tokio pat židinio nuotolio ir diametro

lęšio fokusuotos spinduliuotės FWHM = 255 μm . Šių plyšinių antenų masyvo eksperimentiškai įvertintas efektyvumas siekia 38 %.

Šiame skyrelyje buvo pristatyti difrakcinės optikos ypatumai, aptartos dažniui selektyvių paviršių savybės ir šių elementų sujungimo galimybės. Minėti sprendimai leistų pakeisti THz vaizdinimo sistemose esamus masyvius optinius komponentus bei praplėsti sistemos galimybes.

1.5 Baigtinių skirtumų laiko srityje metodas

Baigtinių skirtumų laiko srityje (*angl.* „finite-difference time-domain“, FDTD) metodas, praktikoje taikomas nuo 1975 m., kai Taflove ir Brodwin išleido publikaciją [77], aprašančią elektromagnetinės bangos sąveikos su medžiaga trimatį uždavinio sprendimą. Nuo to laiko šis metodas dažnai naudojamas elektromagnetinių bangų modeliavime [78]. Kane Yee [79] dar 1966 m. pasiūlė „padalinti“ erdvės dalį, kurioje elektromagnetiniai laukai modeliuojami taip, kad Maksvelo (Maxwell) lygčių dalines išvestines (1.5) ir (1.6) būtų galima pakeisti baigtinių skirtumų išraiškomis, kurios būtų modeliuojamos kompiuteriu.



15 pav. Yee gardelė (a) [79]. Elektrinių ir magnetinių laukų mazgų išsidėstymas erdvėje ir laike (b). Taškas žymi vietą, kur duotuoju momentu skaičiuojama baigtinių skirtumų lygtis naujai H_y vertei. [80]

Yee algoritmu tiesiogiai skaičiuojami Maksvelo lygtimis susieti erdvėje ir laike kintantys elektriniai ir magnetiniai laukai. Elektromagnetinio lauko dedamosios \vec{E} ir \vec{H} trimatėje erdvėje yra išdėstytos taip, kad kiekviena \vec{E} dedamoji yra apsupta keturiomis \vec{H} dedamosiomis, o kiekviena \vec{H} dedamoji

yra apsupta keturiomis \vec{E} dedamosiomis.(15 pav.) Visa modeliuojama erdvės dalis yra užpildyta tokiais „surištų“ kontūrų masyvais.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{1}{\mu} (\vec{M}_{source} + \sigma^* \vec{H}), \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\vec{J}_{source} + \sigma \vec{E}), \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} &= C_a(m) \hat{E}_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + \hat{C}_b(m) \cdot \left(H_z \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - \right. \\ &\left. H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n + H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n + J_{source_x} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \Delta \right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

\hat{E}_y ir \hat{E}_z analogiškai.

$$\begin{aligned} H_x \Big|_{i-1/2,j+1,k+1}^{n+1} &= H_x \Big|_{i-1/2,j+1,k+1}^n + \hat{E}_y \Big|_{i-1/2,j+1,k+3/2}^{n+1/2} - \hat{E}_y \Big|_{i-1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2} + \\ &\hat{E}_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - \hat{E}_z \Big|_{i-1/2,j+3/2,k+1}^{n+1/2} - \hat{M}_{source_x} \Big|_{i-1/2,j+1,k+1}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (1.8)$$

H_y ir H_z analogiškai.

Čia \vec{E} : elektrinio lauko stiprio vektorius (V/m); \vec{D} : elektrinės slinkties vektorius (C/m²); \vec{H} : magnetinio lauko stiprio vektorius (A/m); ε : dielektrinė skvarba (F/m); μ : magnetinė skvarba (H/m); \vec{J}_{source} ir \vec{M}_{source} – elektrinio ir magnetinio lauko šaltiniai; $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ yra erdvės tinklelio celės dydis.

Kadangi tai yra laiko skalės metodas, sprendiniai gali apimti plačią dažnių sritį bei taip įvertinti netiesines medžiagos savybes atliekant vieną skaičiavimą. Baigtinių skirtumų išraiškos yra skaičiuojamos taip, kad elektrinio lauko vektoriaus komponentės gardelės erdvėje yra skaičiuojamos duotu laiko momentu, tada yra skaičiuojamos magnetinio lauko vektoriaus komponentės toje pačioje gardelėje (15 b pav.). Procesas kartojasi, kol pasiekiamas stabilus elektromagnetinio lauko sprendinys [78].

1.6 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgtos terahercinio vaizdinimo sistemos ir jose naudojami jutikliai. Apibendrintas pagrindinių jutiklių parametrų ir technologijų palyginimas yra pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Skirtingų THz jutiklių, veikiančių kambario temperatūroje, parametrų palyginimas.

	BT jutikliai [IP 6]	MOSFET [NP 10]	JLFET [81]	Mikrobolometrai [16]
Gamyba	Nesudėtinga	Sudėtinga (komerciškai prieinama)	Sudėtinga (komerciškai prieinama)	Labai sudėtinga
Dažnių ruožas	Iki 3 THz	Iki 4.3 THz	Netirta	Iki 2 THz
Jautris	10 V/W	350 V/W	70 V/W	1 kV/W
NEP	4 nW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	42 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	460 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	5 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Privalumai	Atsparūs iki 1W spinduliuotės galiui; Atsparūs elektrostatiniams krūviams; Mechaniškai patvarūs; Veikia neprijungus postūmio įtampos	Silicio technologija; Komerciškai prieinami	Nebūtinas užtūros kontaktas; Veikia neprijungus postūmio įtampos	Puikūs parametrai; Mažai jautrūs elektrostatiniams krūviams

Lyginant mikrobolometrų ir FET jutiklių šeimas su „peteliškės“ tipo jutikliais, pastarieji pasižymi gerokai paprastesne ir pigesne gamybos technologija ir nereikalauja nuolatinės postūmio įtampos darbo taško parinkimui. Atsparumas elektrostatiniams krūviams ir didelėms spinduliuotės galioms bei mechaninis patvarumas užtikrina šių jutiklių darbą sudėtingose aplinkos sąlygose.

„Peteliškės“ tipo jutiklių praktiniam pritaikymui vaizdinimo sistemose reikėtų įvertinti anteninių efektų įtaką detektoriaus jautriui. Taikant baigtinių skirtumų laiko srityje metodą būtų galima sukurti optimalų InGaAs jutiklio dizainą, tinkantį detektorių matricių gamybai. Mažas jutiklio jautris galėtų būti padidinamas į jo padėklą integruojant šiame skyriuje apžvelgtus difrakcinės optikos elementus.

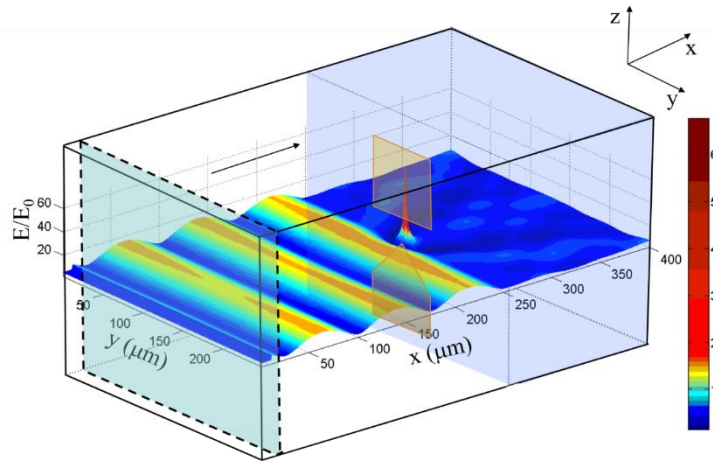
2 JUTIKLIO ANTENINIŲ EFEKTŲ MODELIAVIMAS

Dažniuose virš 1 THz BT detektoriaus jautris yra mažas dėl silpno spinduliuotės įsiskverbimo į aktyviają dalį [19]. Galimų šio BT jutiklio anteninių efektų analizavimui yra skirtas šis skyrius. Jame aprašomi baigtinių skirtumų laiko srityje metodu apskaičiuoti elektromagnetinių laukų priklausomybės nuo dažnio rezultatai skirtingų formų InGaAs jutikliuose ir jų aplinkoje.

2.1 Modeliavimo metodika

Tipinė modeliavimo sritis ir tipinis sumodeliuotas elektrinio lauko amplitudės E pasiskirstymas yra pavaizduoti 16 pav. Stačiakampio gretasienio kraštinės žymi modeliavimo srities dydį. Rodyklė rodo krintančios bangos sklidimo kryptį. Modeliavimo zonos dalis, kurią užima InP padėklas, yra patamsinta, ant padėklo priekinės sienelės yra uždėtas detektorius, kurio metalizuotos dalies kontūrai pažymėti oranžine spalva. Brūkšnine linija žymima riba tarp dviejų modeliavimo sričių, kurių vienoje (kairėje) modeliuojamas tik atsispindėjusios bangos laukas, o kitoje (dešinėje) – visas, krintančios ir atsispindėjusios bangos suminis laukas. Praėjusi į padėklą banga „sugeriamo“ modeliavimo srities paskutiniame erdvės narvelyje dėl absorbuojančių kraštinių sąlygų (angl. absorbing boundary conditions – ABC) [82]. Analogiškai, atsispindėjusi banga yra sugeriamo dėl kraštinių sąlygų priekinėje modeliavimo srities sienelėje. Šiems tyrimams buvo adaptuota C++ programavimo kalba parašyta programa, kurioje naudojamas trimatis FDTD metodas. Kadangi šis metodas reikalauja itin didelių kompiuterinės technikos resursų (6 masyvai saugantys elektrinio ir magnetinio laukų vertes vienam tinklelio narveliui, paprastai jau mažo uždavinio tinklelį sudaro bent $2000 \times 200 \times 200$ narvelių, tai jau reikalauja 4 GB atminties esant 8 baitų vertės tikslumui). Vertės dėl ribotų kompiuterio resursų atnaujinamos kelis kartus per sekundę, o žingsnių skaičius paprastai būna tūkstančiai, todėl tipinis skaičiavimo laikas siekia keliolika valandų ar net parų. Atliekant skaičiavimus buvo taikoma keletas apribojimų: tiriamas idealizuoto jutiklio elektrinio lauko pasiskirstymas THz dažnių srityje,

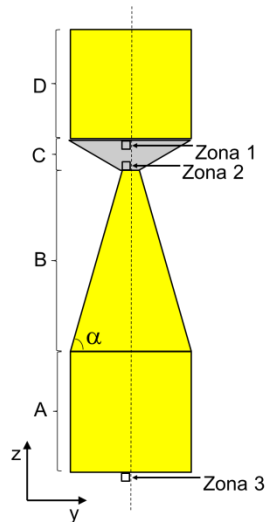
laikant santykinai mažo elektronų tankio dvimačiame sluoksnyje įtaką bangų sklidimui nykstamai maža, o metalą – idealiu laidininku. Pasirinktoje srityje duomenys yra įrašomi, atliekama Furjė transformacija ir duomenys analizuojami.



16 pav. Trimačiu FDTD metodu sumodeliuotas elektrinio lauko amplitudės E pasiskirstymas erdvės srityje ties BT detektoriumi. Rodykle nurodyta krintančios bangos sklidimo kryptis. Modeliavimo zonos dalis, užimama InP padėklo, yra patamsinta, o ant jos priekinės sienelės pavaizduoti detektoriaus metalizuotos dalies kontūrai. Brūkšnine linija pažymėta riba tarp dviejų modeliavimo sričių. [IP 7]

2.2 Jutiklio anteninės dalies dizainas

Modeliuojamo jutiklio dizainas ir matmenys buvo parinkti pagal „peteliškės“ formos jutiklio prototipą, integruotą ant silicio lęšio, kuris, kaip eksperimentai parodė, yra jautrus THz spinduliuotei [19]. „Peteliškės“ formos jutiklio dizainas yra pavaizduotas 17 pav.



17 pav. Jutiklio forma. Jutiklį sudaro keturios sritys: A ir D sritys – elektrodai, B sritys – koncentruoja spinduliuotę į aktyviają dalį, C – aktyvioji sritys. Modeliuojama pusė jutiklio (brūkšninė linija žymi simetrijos ašį), o kitoje pusėje laukų pasiskirstymas laikomas simetrišku. Zona 1,2,3 žymi sritys, kur registruojamas elektrinis laukas E_z . Geltona spalva žymi metalizuotas dalis. Mastelis neišlaikytas.

Modeliuojant skirtingų anteninių sričių įtaką jutiklio rezonansui vienu atveju metalizacija buvo nuimta nuo A ir B dalies kitu atveju nuo D dalies. Jutiklio matmenys pateikti 3-oje lentelėje.

3 lentelė. Jutiklio matmenys.

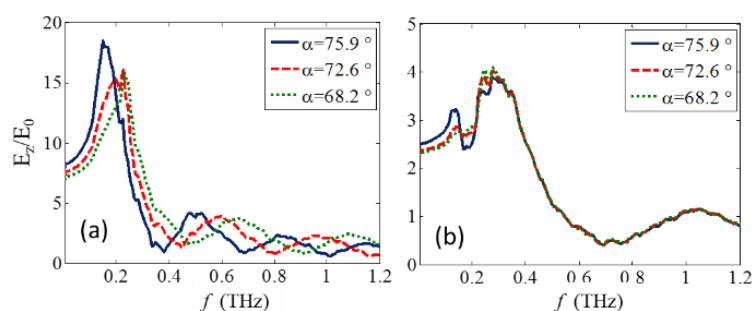
Sritis	Ilgis y kryptimi (μm)	Ilgis z kryptimi (μm)	Metalizacija
A	50	100	metalizuota
B	50	nuo 125 iki 295	metalizuota
C	50	nuo 5 iki 175	nemetalizuota
D	50	125	metalizuota

A ir D dalies matmenys buvo fiksuoti, B srities plotis fiksuotas, o ilgis buvo keičiamas priklausomai nuo kampo α .

2.3 Jutiklio sąsmaukos kampo įtaka

Siekiant įvertinti (E_z/E_0) priklausomybę nuo modeliuojamo kampo α , skaičiavimo rezultatai buvo registruojami zonoje 2 ir zonoje 1. Jutiklis „apšviečiamas“ tiesiškai poliarizuota plokščia banga z kryptimi. Elektrinio lauko stiprio E_z komponentė yra svarbiausia, nes E_y , H_z , H_x yra lygios 0, dėl simetrijos

plokštumos, E_x yra nukreipta statmenai laidumo plokštumai, o H_y yra lygiagreti. Sumodeliuotos elektrinio lauko stiprio vertės zonoje 2 ir zonoje 3 yra pateiktos 18 a ir b pav. Iš pateiktų grafikų aiškiai matosi, kad amplitudės maksimumas ir jos pozicija priklauso nuo kampo α . Kai atstumas tarp zonos 1 ir zonos 2 yra mažas ($\alpha=75.9^\circ$) stebimas didžiausias elektrinių laukų stiprio E_z/E_0 santykis. Matome, kad 18 a pav. E_z/E_0 (vertės skaičiuotos zonoje 2) mažinant kampą α rezonansas slenkasi į trumpesnių bangų pusę, o E_z/E_0 , ties zona 1 (18 b pav.), pozicija nepriklauso nuo kampo bei amplitudžių vertės 4 kartus mažesnės dėl metalizuotos dalies formos.



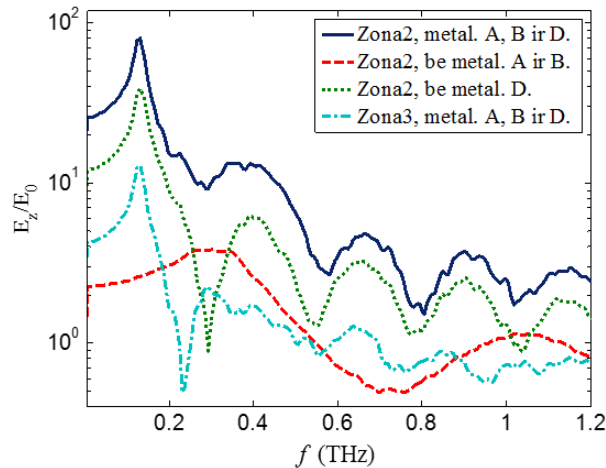
18 pav. Elektrinio lauko stiprio amplitudės E_z ir krintančios bangos elektrinio lauko stiprio amplitudės E_0 santykio priklausomybė nuo dažnio esant skirtingiems kampams α . Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas įrašomas ties zona 2 (a) ir zona 1 (b). [IP 7]

Interpretuojant šiuose dviejuose paveiksluose pateiktus duomenis, reiktų paminėti keletą dalykų. Pirma, metalizuotos detektoriaus sritys „elgiasi“ kaip dvi atskiros antenos. Antra, ties B srities smaile fiksuojamo elektrinio lauko spektro poslinkis yra susijęs su bendru A ir B sričių ilgiu. Trečia, ties D sritimi užfiksuoto elektrinio lauko stiprio spektras praktiškai nesikeičia. Ketvirta, visoms tirtoms antenoms užfiksuotas ženklus maksimalios elektrinio lauko amplitudės ties smaile mažėjimas augant rezonanso dažniui.

2.4 Metalizuotų sričių įtaka antenos rezonansui

Norint išsiaiškinti metalizuotų sričių įtaką antenos rezonansui buvo atlikti modeliavimai keičiant metalizuotas sritis. Rezultatai pateikti 19 pav. Pirmiausia buvo nuimta metalizacija nuo A ir B dalių, kitu atveju tik nuo D dalies. Elektrinių laukų santykis registruotas zonoje 2 ir zonoje 3. Palyginimui pateikti duomenys pilnos metalizacijos atveju. Kaip matome iš 19 pav., pirmojo (mėlyna linija) ir

trečiojo spektro (žali taškai) smailės turi tą patį rezonansinį dažnį, kurį lemia B srities metalizacija. Amplitudės skiriasi kadangi elektrinis laukas nebeturi būti sukonzentruotas mažame tarpe tarp metalizuotų paviršių smailių.



19 pav. Elektrinio lauko amplitudės E_z santykio su krintančios bangos amplitude E_0 priklausomybė nuo dažnio keičiant metalizacijos sritis. Elektrinių laukų vertės stebimos zonoje 2 ir zonoje 3 esant pastoviam kampui $\alpha=80.4^\circ$. [IP 7]

Elektrinio lauko stiprio spektras kai tik jutiklio D dalis yra metalizuota (raudona brūkšninė linija) paaiškina, kodėl pilnos metalizacijos atveju nebuvo stebimas ženklus elektrinio lauko sumažėjimas tarp pirmojo ir antrojo maksimumo pirmajame spektre (mėlyna linija) – tai nulėmė D dalis, kuriai pirmas amplitudės maksimumas yra ties 0.25 – 0.3 THz. Tokiu būdu yra kompensuojamas antenos A ir B dalies lemtas minimumas ties 0.3 THz ir išlaikomas elektrinio lauko stipris tarp metalizuotų antenos kontaktų.

2.5 Efektinio aplinkos lūžio rodiklio įvertinimas

Norint įvertinti įvairių antenos konfigūracijų metalizuotos dalies sąryšį su rezonansiniu dažniu, būtų galima pritaikyti dipolinės antenos teoriją, kuri teigia, kad kiekvieno antenos dipolio ilgis yra proporcingas ketvirčiui elektromagnetinės bangos ilgio. Deja, šis principas analitiškai negali būti pritaikytas mūsų atveju nes, net ir supaprastintą modelį, sudaro dvi medžiagos (vakuumas ir InP padėklas) su skirtingais lūžio rodikliais. Taip pat nėra aišku kaip įskaityti vienos iš metalizuotų antenos dalių trapecijos pločio pokytį. Norint

surasti sąryšį tarp metalizuotos dalies geometrinių matmenų ir antenos rezonansinio dažnio buvo vertinamas efektyvus aplinkos lūžio rodiklis n_{ef} iš teorinių skaičiavimų rezultatų:

$$n_{ef} = \frac{c}{4f_{res}} \frac{N}{L_{A+B}}, \quad (2.1)$$

kur c – šviesos greitis vakuume, f_{res} – rezonansinis dažnis, imtas iš skaičiavimų, N – ketvirčio bangos ilgių skaičius, atitinkantis visus antenos A ir B dalies ilgius. Jei laikome, kad n_{ef} nekinta tam tikrame kampų α intervale, tada galime nustatyti tikėtiną rezonansinį dažnį įvairiems antenos kampams ir ilgiams pagal žemiau pateiktą formulę:

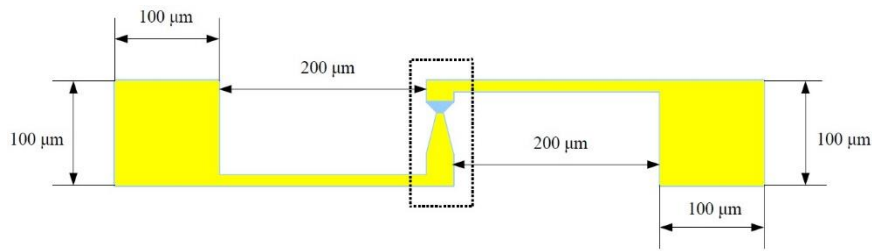
$$f'_{res} = \frac{c}{4n_{ef}} \frac{N}{L'_{A+B}}. \quad (2.2)$$

Įvertintas efektinis aplinkos lūžio rodiklis $n_{ef}=1.48\pm 0.11$. Ši vertė nekito intervale kai A ir B srities ilgis buvo keičiamas nuo 225 μm iki 395 μm . Iš šių rezultatų galima spręsti, kad ši aplinkos efektyvio lūžio rodiklio vertė gali būti naudojama įvertinti elektrinio lauko stiprio amplitudės rezonansinį dažnį esant kitiems antenos A ir B sričių ilgiams.

2.6 Jutiklio metalizuotos srities formos modeliavimas

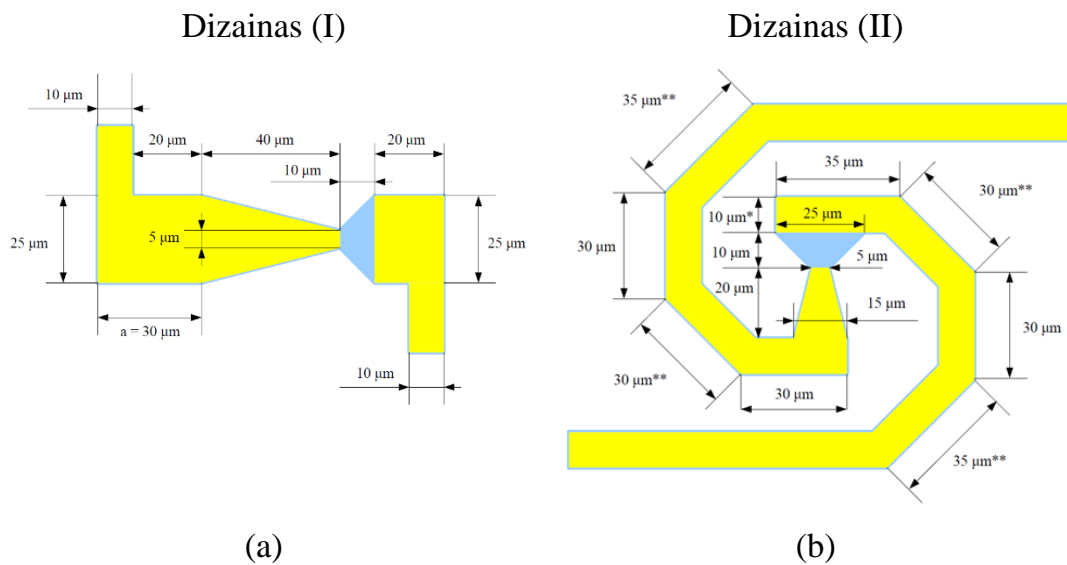
Senajame asimetrinės formos BT jutiklio dizaine neįvertinta kontaktinių vielučių įtaka, jutiklių sąveika masyve bei neoptimalūs antenos matmenys. Jutiklio anteninės dalies matmenis lemia santykinai trumpas terahercinės spinduliuotės bangos ilgis, dėl kurio tikėtinas optimalus jutiklio anteninės (smailiosios) dalies ilgis turėtų siekti kelias dešimtis μm (t.y. apie 1/4 bangos ilgio), o jos plotis būtų dar mažesnis. Siaurojoje dalyje plotis mažinamas iki kelių μm jautrio padidimui. Dėl tokių mažų matmenų būtų tiek technologiškai sunku pritvirtinti gan storas (pvz. 25 μm diametro) kontaktines vielutes prie jutiklio, tiek sunku tikėtis stabilių jutiklio savybių, nes papildomas laidininkas veiktų kaip papildoma antena. Buvo nuspręsta, jog šių problemų sprendimui pasitarnautų kontaktinių plokštelių suformavimas, jas nukeliant nuo centrinės detektoriaus dalies bent 200 μm . Kontaktinės plokštelės būtų sujungiamos su

detektoriumi siauromis, statmenomis krintančios bangos elektrinio lauko vektoriaus kryptiai, kontaktinėmis juostelėmis (20 pav.).



20 pav. Jutiklio projekto vaizdas.

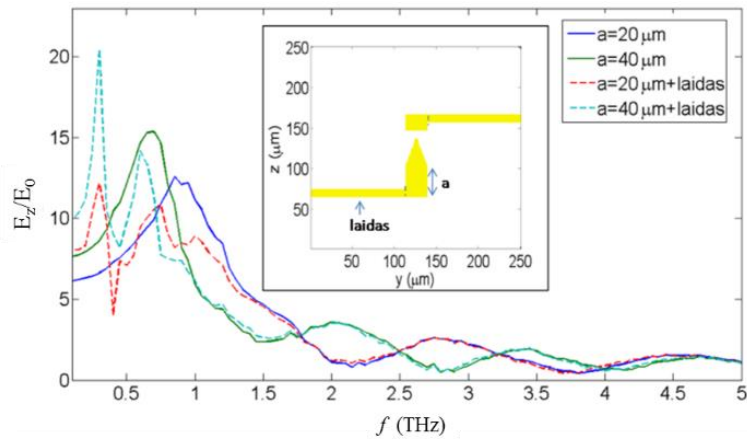
Palikus bendrą išorinę kontaktinę dalį, centrinė dalis buvo projektuojama pagal numatomas aktualias THz spinduliuotės spektro dalis. Buvo pasirinkti keli variantai: galimai rezonansiniai (apie $1/4$ bangos ilgio smailinta metalinio kontakto dalis) ties 0.7 THz (21 a pav.) bei plačiajuostės spiralinės antenos aproksimacija (21 b pav.).



21 pav. Jutiklio centrinės dalies projektas. Jutiklis optimizuotas 0.7 THz dažniui (a) ir plačiajuostei detekcijai (b).

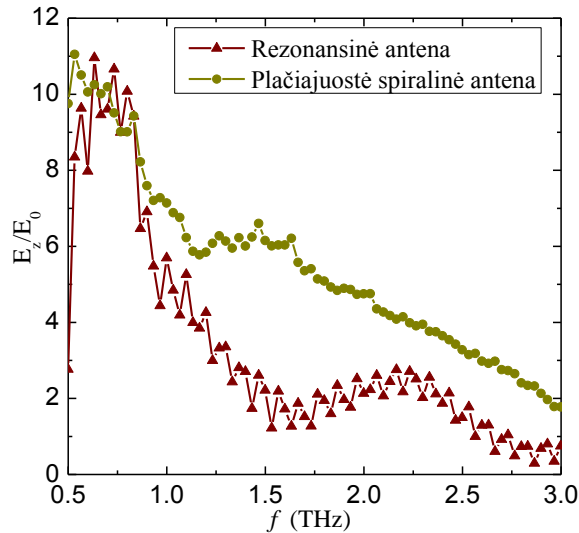
Paveiksle 22 matome, kaip keičiasi elektrinio lauko amplitudės spektras prie detektoriaus pridėdant kontaktinius takelius. Šiems modeliavimams buvo pasirinkta $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ dydžio modeliavimo sritis (parodyta 22 pav. intarpe). Modeliuojami du jutiklio dizaino (I) dalies ilgiai ($20 \mu\text{m}$ ir $40 \mu\text{m}$), bei du metalizacijos variantai (su takeliais, be takelių). Kaip matome iš 22 pav., ties $\lambda/4$ rezonansu išties galime tikėtis ženklaus elektrinio lauko amplitudės sustiprėjimo

iki 15 kartų kai nėra pridėtų kontaktinių takelių. Sutrumpinus jutiklio metalizuotos a srities ilgį, antenos rezonansinis dažnis pasislenka link aukštesnių dažnių. Tačiau prijungus kontaktinius takelius jutiklio dažninės savybės iškraipomos ir amplitudė ties smaile sumažėja. Spektras labai iškraipomas žemų dažnių srityje, kuriuose bendri sujungtų jutiklio centrinės dalies ir kontaktinių takelių matmenys tampa palyginami su bangos ilgio ketvirčiu.



22 pav. Elektrinio lauko amplitudės E_z santykio su krintančios bangos amplitudė E_0 priklausomybė nuo dažnio, registruojama pirmame narvelyje virš jutiklio smailės keičiant stačiakampės jutiklio dalies ilgį a bei pridėdant ar nuimant kontaktinius takelius. Intarpe pavaizduotas modeliuojamo jutiklio dizainas. Geltona spalva žymi metalizuotas sritis.

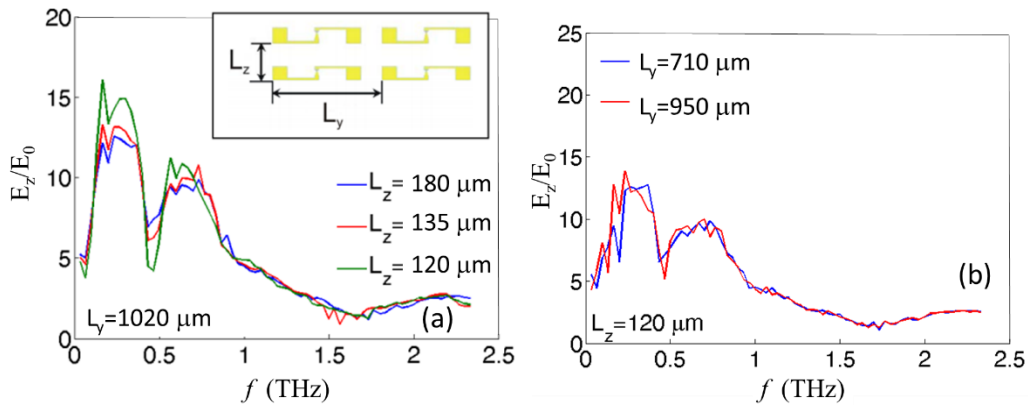
Analogiškai buvo sumodeliuotos ir detektoriaus su spiraline antena dažninės savybės. Šių dviejų skirtingų dizainų antenų dažninių charakteristikų palyginimas yra pateiktas (23 pav.). Matome, kad ties 0.7 THz elektrinių laukų santykis yra panašus, o ties 1.5 THz jutiklio su plačiajuoste spiraline antena jautris turėtų būti apie 9 kartus didesnis nei jutiklio su rezonansine antena.



23 pav. Rezonansinės ir plačiajuostės antenos elektrinio lauko stiprio amplitudės E_z santykio su krintančios bangos amplitudė E_0 priklausomybė nuo dažnio.

2.7 Jutiklių sąveikos masyvuose modeliavimas

Terahercinės spinduliuotės vaizdinimo sistemoms yra svarbios ne tik atskirų detektorių savybės, bet ir galimybės pagaminti jų matricas. Todėl yra svarbu išsiaiškinti kaip gretimi detektoriai sąveikauja matricoje. Siekiant įvertinti kokiais atstumais išdėstyti detektoriai mažai veiks vienas kitą, FDTD modeliavimuose buvo keičiamas narvelių skaičius y , z kryptimis ir vertinami elektrinio lauko amplitudės spektro pokyčiai. Dėl naudotų periodinių kraštinių sąlygų modeliavimo srities dydžio keitimas automatiškai reiškia atstumo tarp detektorių pokytį jų masyve. Rezultatai, gauti fiksuotam $1020 \mu\text{m}$ periodui L_y kryptimi (tai atitinka $400 \mu\text{m}$ atstumą iki artimiausio kito jutiklio) ir keičiant $L_z=120 - 180 \mu\text{m}$ pateikti 24 a pav. Matome, kad elektrinių laukų santykio spektras yra panašus visais atvejais, tik esant $20 \mu\text{m}$ atstumui iki kito jutiklio (atvejis kai $L_z=120 \mu\text{m}$) jau stebimas didesnis laukų padidėjimas iki 0.5 THz . Mus dominančių aukštesnių dažnių atveju (apie 0.7 THz) skirtumai yra gerokai mažesni ir neviršija 20% nuo vidutinės vertės.



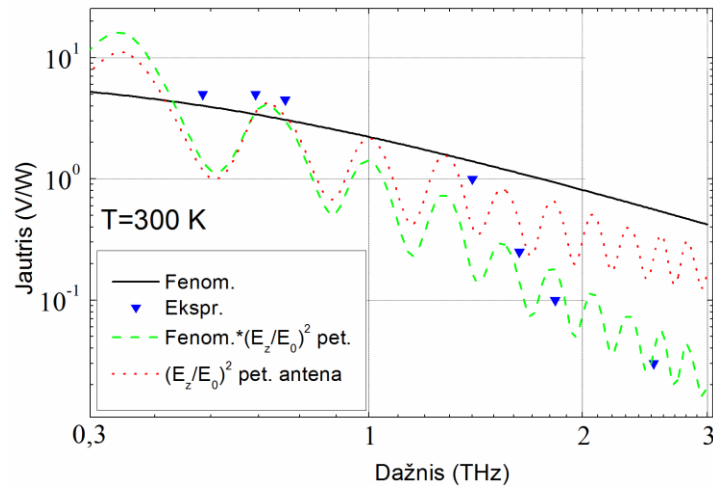
24 pav. Elektrinio lauko stiprio amplitudės E_z santykio su krintančios bangos amplitudė E_0 priklausomybė nuo dažnio skirtingiems L_z atstumams ir fiksuotam $L_y = 1024.5 \mu\text{m}$ atstumui (a). Intarpe pateiktas jutiklių išdėstymas masyve. E_z/E_0 priklausomybė nuo dažnio keičiant L_y esant fiksuotam L_z (b). [P 15]

Rezonansinis minimumas ties 0.5 THz yra sietinas su didesnėmis jutiklio metalinėmis dalimis (kontaktinės aikštelės, Au vielutės). Fiksuojant L_z atstumą iki detektorių ir keičiant L_y , kaip matome, rezultatai labai mažai keičiasi, todėl bent kelių šimtų mikrometrų atstumas tarp detektorių (kurių plotis viršija 600 μm) stulpelių yra pakankamas.

2.8 Teorinių rezultatų palyginimas su eksperimentiniais

Ankstesni tokio tipo jutiklio eksperimentiniai tyrimai parodė, kad jautrio dažninė priklausomybė mažėja greičiau nei tai numato fenomenologinis modelis [19]. Todėl jutiklio jautrį įvertiname dar kartą, pasinaudodami šiame skyriuje pristatytais tyrimų rezultatais.

Iš [19] darbo yra žinoma, kad tokio jutiklio atsakas yra tiesiškai proporcingas krintančios spinduliuotės galiai arba elektrinio lauko stiprio kvadrato amplitudei. Tačiau elektronai aktyviojoje jutiklio srityje yra veikiami lokalaus, antenos sukonzentruoto lauko. Lokalus elektronų kaitimas ar kiti lokalūs reiškiniai, lemiantys tiesinę jutiklio signalo priklausomybę nuo galios, neturėtų priklausyti nuo elektrinio lauko amplitudės padidėjimo priežasties. Todėl fenomenologinį jautrio vertinimo modelį galima taisyti, atsižvelgiant į šiame darbe sumodeliuoto elektrinio lauko amplitudžių santykio kvadrato pokyčius.



25 pav. Peteliškės formos detektoriaus jautrio priklausomybė nuo dažnio THz dažnių ruože. Juoda linija pavaizduoti fenomenologiniai skaičiavimai, mėlyni trikampių simboliai atitinka eksperimentinius duomenis [19]. Žalios spalvos brūkšninė linija pažymėta sumodeliuota „peteliškės“ formos jutiklio jautrio priklausomybė, kurioje atsižvelgiama tiek į fenomenologinį modelį, tiek į šiame darbe pristatytą jutiklio elektrinio lauko priklausomybę nuo dažnio. Sumodeliuota elektrinių laukų santykio $(E_z/E_0)^2$ priklausomybė nuo dažnio pažymėta taškuota raudona linija. [IP 7]

Tai buvo padaryta 25 pav., kuriame žalia spalva pažymėta brūkšninė linija atitinka pataisytą fenomenologinį modelį, įvertinant „peteliškės“ formos jutiklio modeliavimo rezultatus. Sumodeliuotas $(E_z/E_0)^2$ dažninis pasiskirstymas pavaizduotas raudona taškuota linija. Laisvai pasirenkamas daugiklis fenomenologiniame modelyje buvo pasirinktas taip, kad taškai sutaptų 0.7 THz dažnyje, nes tokiu atveju yra turimi tiek eksperimento, tiek teoriniai duomenys. Kaip matome iš 25 pav., ši kreivė gerokai tiksliau sutampa su eksperimentiniais rezultatais, nei nepatikslingo modelio atveju. Taip pat svarbu pažymėti, kad vertinant duomenų sutapimą, reikia atsižvelgti į visą jautrių intervalą, tarp rezonansinių smailių viršūnių ir duobių, nes eksperimento metu tiksliai rezonansinių maksimumų padėtis gali lemti prie kontaktų pritvirtinti laidai. Taip pat reikėtų paminėti, kad šie anteniniai efektai galėtų paaiškinti asimetrinės formos $n-n^+$ sandūros GaAs diodų nuokrypius nuo tiesinės dažninės priklausomybės intervale 1 – 2 THz [17].

2.9 Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje pristatyti FDTD metodu gauti elektromagnetinių bangų pasiskirstymo „peteliškės“ formos detektoriuje ir jo aplinkoje rezultatai keičiant geometrinius jutiklio metalinių sričių parametrus. Tirtos metalizuotų jutiklio sričių rezonansinės savybės bei kontaktinių takelių ir aikštelių įtaka elektrinio lauko stiprio amplitudei ties jutiklio aktyviosios srities ir metalo sandūros smaile. Analizuota detektorių tarpusavio įtaka masyvuose leido parinkti tinkamus atstumus iki gretimų jutiklių, o įvertinus modeliavimo rezultatus buvo patikslintas fenomenologinis modelis.

Šiame skyriuje aprašyti modeliavimo rezultatai leidžia suformuoti *pirmąjį ginamąjį teiginį*.

Eksperimentiškai nustatytam „peteliškės“ formos InGaAs detektoriaus jautrio mažėjimui virš 1 THz didžiausią įtaką turi elektrinio lauko stiprio priklausomybė nuo dažnio siaurojoje dalyje ties kontaktinės srities smaile, o atskiros jutiklio metalizuotos sritys veikia kaip dvi skirtingos antenos su aiškiai išreikštomis skirtingomis rezonansinėmis savybėmis.

3 JUTIKLIO GAMYBA IR CHARAKTERIZAVIMAS

3.1 Technologija ir gamyba

Šiame skyriuje bus pristatyta įvairių antenos dizainų THz jutiklių ir jų matricių gamybos technologija, korpusavimas, elektrinis pajungimas ir visas atliktas technologinis darbas gaminant prietaisą nuo sluoksnių garinimo iki vaizdinimo eksperimentams paruoštos jutiklių liniuotės.

3.1.1 Epitaksiniai InGaAs/InAs heterodariniai ant InP:Fe monokristalino padėklo

InGaAs/InP epitaksinių heterodarinių tyrimai [83] sulaukia nemažai dėmesio ne tik THz srityje, bet ir mažo draustinio tarpo optoelektronikos srityse įskaitant foto ar magnetinio lauko jutiklius [84,85]. Tiriant šią heterosandūrą, [86] straipsnio autoriai pastebėjo sisteminius difuzijos dėsningumus įterptinio (*angl.* interfacial) sluoksnio formavimosi sąsajoje tarp $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$. Jungdamasis *p*-Ga su $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ sluoksniu, skiriamajame sandūros paviršiuje konkuruoja su As dėl ryšio sandūroje. Atkaitinant šia heterosandūrą temperatūroje, artimoje auginimo temperatūrai, As gali difunduoti dešimtis nanometrų į InP. Toks sandūros pokytis gali turėti reikšmingos įtakos. Taip pat autoriai teigia, kad tokio tipo heterosandūros elektrinis laidumas yra priskiriamas priemaišiniam sluoksniui, susiformavusiam sandūroje tarp epitaksinio $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sluoksnio ir InP:Fe padėklo. Tuo tarpu, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ laidumo juostoje esančių elektronų indėlis elektriniam laidumui yra nereikšmingas. Priemaišinio sluoksnio laidumas yra aiškinamas kaip elektrinio krūvio perdavimas tarp atsitiktinai pasiskirsčiusių priemaišų ir sandūrinio sluoksnio. Didžiausia priemaišų koncentracija formuojasi sandūroje dėl jų difuzijos iš padėklo. Manoma, kad auginant $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ epitaksinį sluoksnį dėl savaiminio legiravimo gali formotis vieno komponento atomų perteklius, o kito – vakancijos, taip susiformuoja įtemptas sluoksnis.

Bandinių gamybai buvo naudojami dviejų colių 500 μm storio InP:Fe (001) padėklai. Fe naudojamas InP laidumo kompensavimui, siekiant pusiau izoliuojančio (ne laidaus) padėklo savybių. Ant jų, skirtingose molekulinėse pluoštelių epitaksijos mašinose (FTMC PFI, Vilnius ir Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, Vokietija) molekulinėse pluoštelių epitaksijos būdu skirtingomis sąlygomis užaugintas InGaAs sluoksnis bei tam tikrais atvejais InAs monosluoksnis. Jo susidarymas priklauso nuo technologinių parametrų (pvz.: struktūros kaitinimo laikas prieš garinimą). Bandinių ruošinių (*angl.*: wafer) suvestinė pateikta 4 lentelėje.

4 lentelė. Ruošinių, naudojamų gaminti THz jutiklius, specifikacijos, kur x – indžio (In) kiekis. Sutrumpinimas „Prikl. nuo poz.“ – priklauso nuo pozicijos.

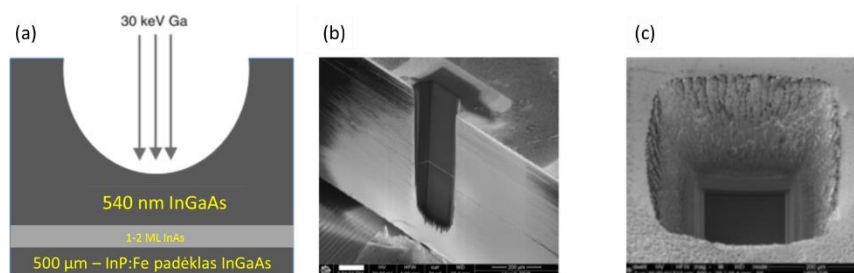
Bandinys	x (In)	Laidumo tipas	InAs monosluoksnis	Gaminta
I197	0.47	Prikl. nuo poz.	Ne	FTMC
I198	0.48	Prikl. nuo poz.	Ne	FTMC
I203	0.53	Prikl. nuo poz.	Taip	FTMC
I204	0.53	Prikl. nuo poz.	Taip	FTMC
II2929	0.54	n	Taip	Fraunhofer
II3169	0.53	n	Taip	Fraunhofer

Remiantis Fraunhofer instituto patirtimi ir jų užaugintais epitaksiniais InGaAs ant InP padėklo sluoksniais, vienas iš tikslų buvo mūsų centre sukurti InGaAs ant pusiau izoliuojančio InP padėklo auginimo technologiją, pasitelkiant molekulinėse pluoštelių epitaksijos metodą (*angl.* molecular beam epitaxy, MBE). Šiam tikslui iškelti keli uždaviniai:

- I. Ištirti padėklo temperatūros ir ekvivalentinių In, Ga srautų santykio įtaką kristalinėms medžiagos savybėms.
- II. Išanalizuoti užaugintų heterodarinių skerspjuvių vaizdus. Bandinių tyrimai buvo atliekami peršviečiančiuoju elektronų mikroskopu (TEM) Tecnai G2 F20 X-TWIN (FEI, Olandija, 2011 m. FTMC ChI). Skirtingos mikroskopo

skyros buvo pasirinktos siekiant įvertinti kelių monosluoksnių storio InAs įtempius, suformuojančius sluoksnių atomų tvarką ir defektiškumą.

Tyrimui buvo pasirinkti trys charakteringieji skirtingų cheminių sudėčių ir įtempių InGaAs sluoksnių bandiniai: I197, I198 ir I204. Skersinių pjūvių tyrimui fokusuotu galio jonų pluošteliu (FIB), įmontuotu skenuojančiajame elektroniniame mikroskope, pasirinktame plote buvo paruošiamas iki 50 μm pločio bandinys. Jo paruošimo esdinant Ga jonų pluošteliu iliustracija bei suformuotos konkrečiame bandinyje sritys yra parodytos 26 paveiksle.



26 pav. Bandinio paruošimo esdinant Ga jonų pluošteliu iliustracija (a). Suformuotos TEM tyrimui sritys bandinyje (b ir c). Matavimus atliko FTMC, Medžiagų struktūrinės analizės skyriaus darbuotojai.

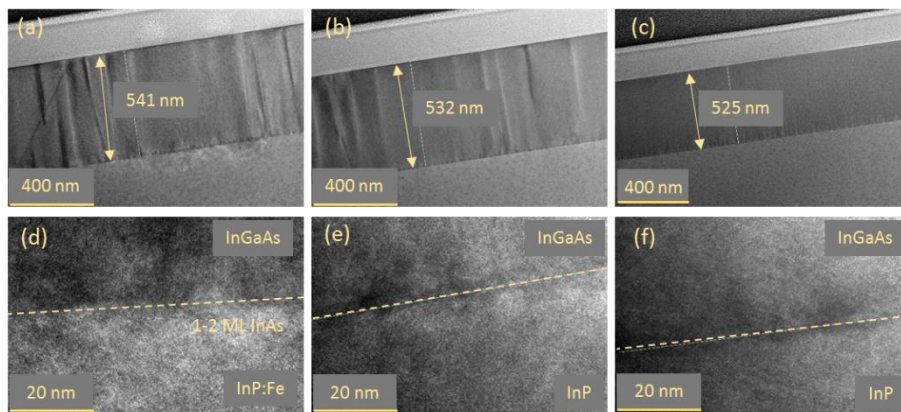
Išmatuoti pagamintų InGaAs/InP bandinių parametrai yra pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Pagamintų bandinių kristalinės sandaros ir paviršiaus parametrai: d – epitaksinio InGaAs sluoksnių storis iš TEM matavimų, rms – InGaAs sluoksnių paviršiaus šiurkštumas įvertintas su atominių jėgų mikroskopu (AFM).

Bandinys	TEM		AFM
	d (nm)	Ekvivalentinis In ir Ga srautų santykis	rms (nm)
I197	541	2.04	0.167
I198	532	2.05	0.551
I204	525	2.08	0.166

Bandinių skerspjūvių rezultatai, nustatyti iš TEM matavimų, yra pavaizduoti 27 paveiksle. Iš aukštesnės, iki kelių nanometrų skyros, tyrimo (27 pav. a-c) skerspjūvio vaizdų aiškiai matyti, kad esant ekvivalentiniam In ir Ga srautų santykiui 2.04 ir 2.05, aktyviojoje InGaAs terpėje gausu defektinių sričių. Dėl didesnio In atomo diametro ir mažesnio jo kiekio matomos

susiformavusios dislokacijos, ties kuriomis įtemptas InGaAs sluoksnis relaxuoja. Esant optimaliam In kiekiui InGaAs, t.y. $x=0.53$ (I204 bandinys), sluoksnyje, kai ekvivalentinis In ir Ga srautų santykis auginimo metu siekia 2.08, dislokacijos nesiformuoja ir gaunamas defektų kiekis yra minimalus. Atlikus itin didelės skyros (HRTEM matavimas 27 pav. d – f) tyrimus buvo įvertinta įtempius formuojančio kelių monosluoksnių InAs kristalinė kokybė ir vientisumas. Pastebėta, kad esant mažesniau augimo greičiui arba trumpesniau augimo laikui (27 pav. d ir e), InAs sluoksnis nevienodai padengia nuvalytą nuo natūralaus oksido padėklo paviršių: vietomis InAs sluoksnio storis siekia net iki 10 nm.



27 pav. Esant skirtingiems ekvivalentiniams In ir Ga srautų santykiams ir 500 °C padėklo temperatūrai, užaugintų ant InP:Fe padėklų InGaAs sluoksnių peršviečiančiosios elektronų mikroskopijos skerspjūvio vaizdai. Bandinys I197 – In/Ga – 2.04 (a ir d), I198 – In/Ga – 2.05 (b ir e), I204 – In/Ga – 2.08 (c ir f). Matavimus atliko Medžiagų struktūrinės analizės skyriaus darbuotojai, FTMC.

Homogeniško padengimo tendencija stebima, didėjant In srautui. Buvo įvertinta, kad siauriausias apie 2 nm ir ištiesai padengiantis padėklą pereinamasis sluoksnis susiformuoja esant In ir Ga srautų santykiui apie 2.08.

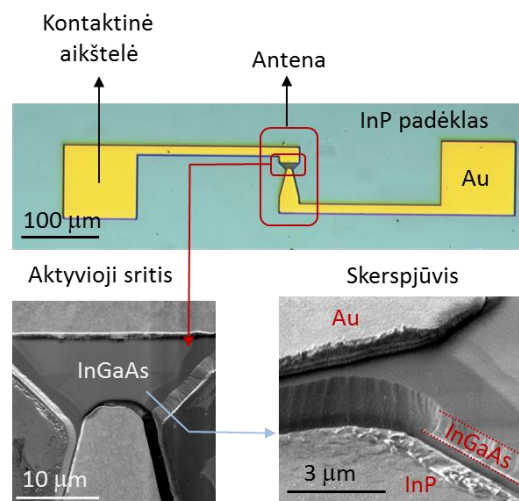
Matavimų tamsaus (27 pav. d) ir šviesaus lauko modoje (27 pav. e ir f) nuotraukose akivaizdžiai stebimas ribos pašviesėjimas arba patamsėjimas priklausomai nuo sunkesnių atomų sankaupos sričių. Pagal sankaupų formą galima nusakyti In atomų pasiskirstymo homogeniškumą.

Išanalizavus užaugintų heterodarinių skerspjūvių vaizdus, pasitelkiant peršviečiančiąją elektronų mikroskopiją, galime padaryti išvadą, kad

tobuliausios kristalinės sandaros InAs/InGaAs heterodariniai auga 500 °C temperatūroje, esant ekvivalentiniam In ir Ga srautų santykiui artimam 2.08. Šiose sąlygose glotniai padengtas ištisas ir vienodo storio InAs buferinis sluoksnis sudaro sąlygas epitaksiniam aktyviojo InGaAs sluoksnio augimui.

3.1.2 Jutiklio sandara

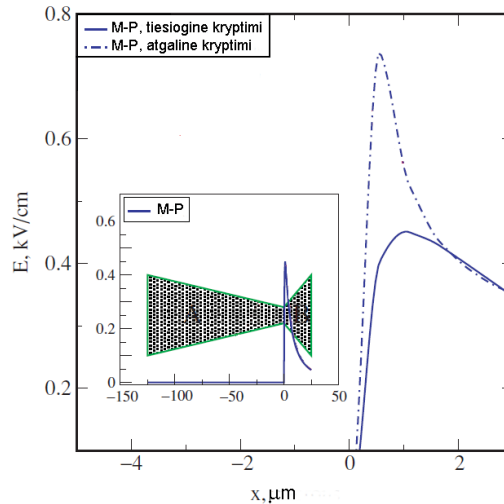
Gaminamo detektoriaus tipinė sandara yra pavaizduota 28 pav. Jį sudaro kontaktinės aikštelės, kurios nuo jutiklio įprastai yra nutolę per 200 μm, antena, kurios dizainai ir modifikacijos skiriasi, bei InGaAs aktyvioji sritis. Antenos forma nėra simetriška, ją sudaro siaurėjanti metalizuota sritis. Jos tikslas yra koncentruoti krintančią spinduliuotę į aktyviąją jutiklio sritį, sudarytą iš InGaAs ir InP heterosandūros.



28 pav. Jutiklio sandara. Jį sudaro kontaktinės aikštelės, metalizuota anteninė sritis, koncentruojanti krintančią spinduliuotę bei aktyvioji sritis, sudaryta iš InGaAs ant InP padėklo.

Tokio tipo diodo veikimo principas tradiciškai buvo aiškinamas [45] straipsnyje pateiktu fizikiniu modeliu: nevienalytis krūvininkų kaitimas diodo kakliuko srityje generuoja elektrovaros jėgą ant diodo kontaktų, jį apšvietus THz dažnio spinduliuote. Iš 29 pav. matome nevienodą vidinio elektrinio lauko pasiskirstymą ties jutiklio aktyviąja sritimi, o intarpe pavaizduotas bendras vidinio elektrinio lauko vaizdas jutiklyje. Šį nevienodą elektrinio lauko pasiskirstymą bandinyje lemia nevienoda difuzinė srovė pridėjus išorinį lauką

skirtingomis kryptimis. Taip pat, metalizuota anteninė sritis, dėl kurios elektrinio lauko pasiskirstymas atgaline kryptimi yra gerokai staigesnis, nei tiesiogine kryptimi bei formuojant ominių kontaktus susidariusi $n-n^+$ sandūra, kuri priklauso nuo gamybos technologijos.

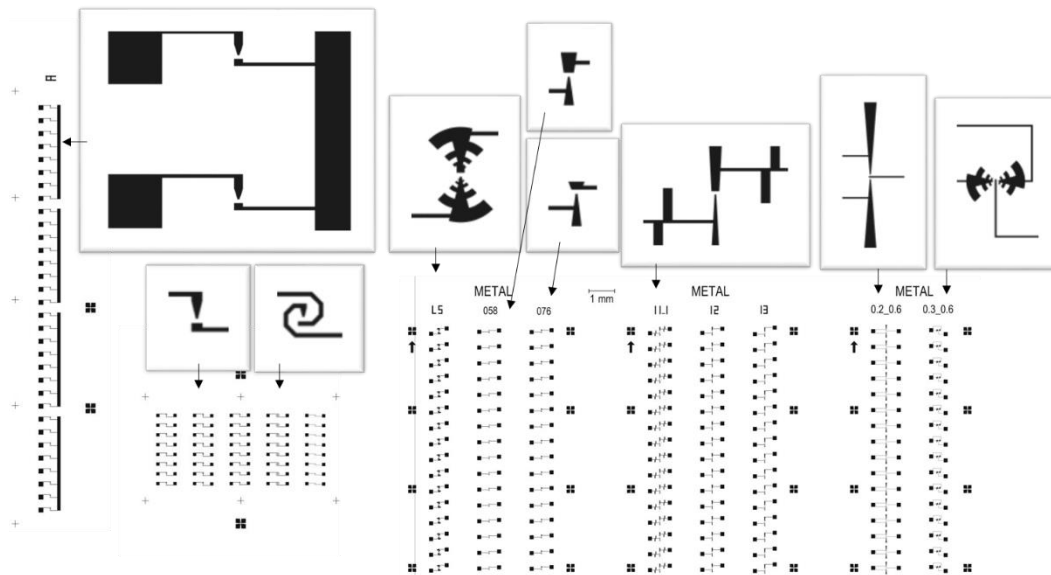


29 pav. Tikėtinas vidinio elektrinio lauko pasiskirstymas jutiklyje. [45]

Visgi, reikia pastebėti, kad šis karštųjų krūvininkų modelis neįskaito paviršinių būsenų ir krūvių nulemto lauko efekto įtakos.

3.1.3 Litografijos kaukės

Modeliavimų rezultatai, pateikti 2-ame skyriuje buvo panaudoti jutiklių bandinių gamybai reikalingos litografijos kaukės projektavime. Buvo atsižvelgta į jutiklių masyvų išdėstymą bei atstumus tarp atskirų bandinių. Bendras kaukės brėžinys ir atskiros jutiklių antenų išdidintos sritys pateiktos 30 pav. Litografijos kaukės buvo gamintos VŠĮ „Panevėžio mechatronikos centras“ ir „ML&C GmbH“ (Vokietija). Kaukės gamintos naudojant elektronų pluoštelių litografijos technologiją ant metalizuoto ir elektronų pluošteliui jautraus fotorezistu dengtu $4 \times 4 \times 0.06$ colių kvarcinio stiklo.



30 pav. Fotolitografijos kaukių projektas.

3.1.4 Gamyba

Jutiklių bandiniai buvo gaminami naudojant optinės litografijos metodiką 5-tos švarumo klasės kambaryje (angl.: cleanroom), Fizikos institute, Johann Wolfgang Goethe Universitete, Vokietijoje. Toliau yra pateikiama jutiklių gamybos eiga.

1. Fotolitografija – negatyvas kontaktų formavimui (31 a pav.).

- 1.1. Atskeliamas reikiamo dydžio ruošinys ir atliekamas jo valymas acetone, di-propanolyje, etanolyje, distiliuotame vandenyje, ultragarsinėje vonelėje (3min.), metanolyje (3min.), distiliuotame vandenyje bei nupučiama azoto dujomis.
- 1.2. Užnešamas fotorezistas (AR4040) sukant ruošinį 2000 aps/min 15 s, 6000 aps/min 45 s.
- 1.3. Ruošinys kaitinamas 5 min 86 °C temperatūroje.
- 1.4. Uždedama kaukė (metalizuotų sričių formavimui) ir apšviečiama gyvsidabrio lempa 8.3 s, 6.6 mW/cm² galia.
- 1.5. Kaitinamas 5 min 103 °C temperatūroje.
- 1.6. Apšviečiamas visas ruošinys 26 s 6.6 mW/cm².
- 1.7. Atliekamas ryškinimas 70-80 s lėtai judinant ruošinį ryškalo AR 300-35, sumaišyto su distiliuotu vandeniu santykiu 1:1, tirpale.

2. Kontaktų garinimas. Užgarintų metalizuotų sričių vaizdas pateiktas 31 b pav.

2.1. Valymas HCl tirpale (tik tuo atveju kai paviršiuje InGaAs) bei plazmoje (3 min).

2.2. Sukant ruošinį garinamas 20 nm Ti sluoksnis bei 180 nm Au sluoksnis.

3. Fotorezisto pašalinimas.

3.1. Ruošinys dedamas į fotorezisto tirpiklį (AR 300-70 NER) apie 2 h. Tokiu būdu yra pašalinamas Ti ir Au sluoksnis nuo fotorezistu padengto paviršiaus.

4. Fotolitografija – pozityvas ėsdinimui.

4.1. Valymas acetone, di-propanolyje, etanolyje, distiliuotame vandenyje, metanolyje (3 min.), distiliuotame vandenyje bei nupučiama azoto dujomis.

4.2. Užnešamas fotorezistas (AR4040) sukant ruošinį 2000 aps/min 15 s, 6000 aps/min 45 s.

4.3. Kaitinimas 10 min 86 °C temperatūroje.

4.4. Sutapatinama kaukė su aukso struktūra (31 c pav.). Turi būti išlaikoma 2 μm tikslumas. Šiame etape naudojama kaukė yra 2 μm platesnė nei naudota aukso garinimui. Tokiu būdu išėsdinimas po auksu yra mažiau tikėtinas. Apšvietos laikas 12 s 6.6 mW/cm².

4.5. Atliekamas ryškinimas 70-80 s lėtai judinant ruošinį ryškalo AR 300-35, sumaišyto su distiliuotu vandeniu santykiu 1:1, tirpale.

4.6. Kaitinama apie 1 h 65 °C temperatūroje, taip fotorezistas tampa atsparesnis rūgštims.

5. Ėsdinimas.

5.1. Valoma 3 min plazmoje.

5.2. InGaAs selektyvus ėsdinimas: H₂SO₄(98%):H₂O₂ (30%):H₂O tirpale santykiu 1:1:20. 500 nm ėsdinama apie 2.5 min.

5.3. InP selektyvus ėsdinimas: HCl (30%):H₃PO₄ (89%) tirpale santykiu 1:1. Per 20 s išėsdinama apie 600 nm.

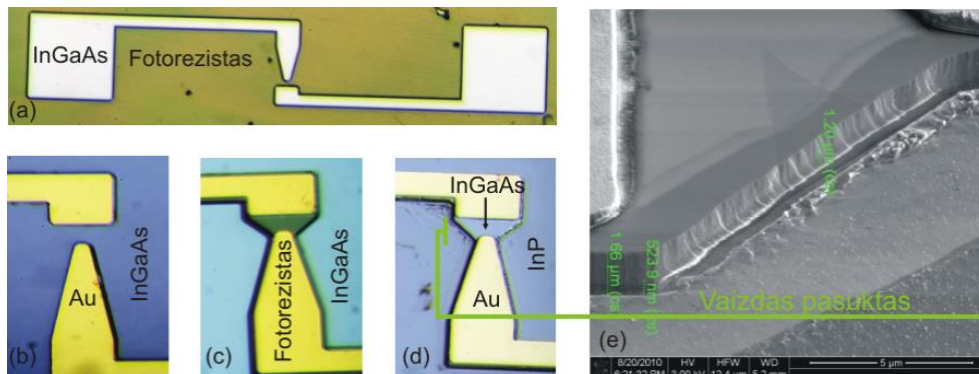
5.4. Atliekamas valymas ir fotorezisto pašalinimas.

5.5. Matuojamas išėsdinimo gylis (31 e pav.).

6. Greitas kontaktų atkaitinimas.

6.1. Suformuojami ominiai kontaktai atliekant greitą kontaktų atkaitinimą praretintose azoto dujose (10 s 400°C temperatūroje) remiantis metodika, aprašyta [87].

Pagaminto jutiklio vaizdas pateiktas 31 d pav. Matome InGaAs aktyviają sritį, metalizuotas sritis bei išėsdintą InP padėklą.

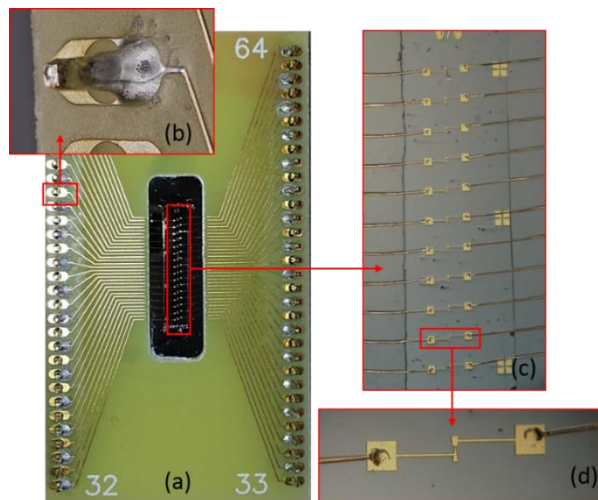


31 pav. Jutiklių gamybos eiga. Vaizdas paruošus garinti auksą (a). Vaizdas užgarinus aukso sluoksnį (b). Vaizdas paruošus struktūrą ėsdinimui (c). Pagaminto jutiklio nuotrauka (d). Ėsdinimo gylio matavimas FEI NOVA NanoLab600 (dviejų spindulių elektronų/jonų) mikroskopu, vaizdas pasuktas 90°(e).

3.1.5 Jutiklių montavimas specialiuose laikikliuose

Pagaminti bandiniai tolimesniems elektrinio prisijungimo reikalaujantiems tyrimams buvo montuojami į specialiai suprojektuotus laikiklius, kurie pagal užsakymą pagaminti „Beta LAYOUT Ltd.“ kompanijoje, Vokietijoje. Jų centre numatyta kiaurymė, kuri uždengta THz spinduliuotei pusiau laidžia aukštaomio silicio plokštele. Ant jos klijuojamos jutiklių liniuotės. Taip sumontavus jutiklius yra galimybė juos apšviesti THz spinduliuote iš abiejų pusių. Laikiklis pagamintas iš 1 mm storio stiklo tekstolito plokštelės. Kontaktiniai takeliai suformuoti frezavimo metodu ir elektrochemiškai padengti aukso sluoksniu. Naudojant ultragarsinį aukso vielos privirinimo aparatą buvo privirinamas vienas 25 μm diametro vielos galas prie jutiklio 100×100 μm² ploto kontaktinės aikštelės, o kitas galas prie vienos iš 64 laikiklio kontaktinių aikštelių. Kadangi bandinių buvo pagaminta daug serijų, toks jų korpusavimas supaprastina

prisijungimą, nes užtenka keisti tik laikiklį su kitais bandiniais. Detalus sukorpusuotų bandinių vaizdas pateiktas 32 pav.



32 pav. Sumontuoti detektoriai laikiklyje. Bendras jutiklių, laikiklio, išpjovos su silicio plokšte vaizdas (a). Auksuoto takelio ir prilituoto laikiklio išorinio kontakto vaizdas (b). Jutiklių liniuotės vaizdas (c). Ultragarsiniu būdu privirintos aukso vielutės prie jutiklio kontaktinės aikštelės vaizdas (d).

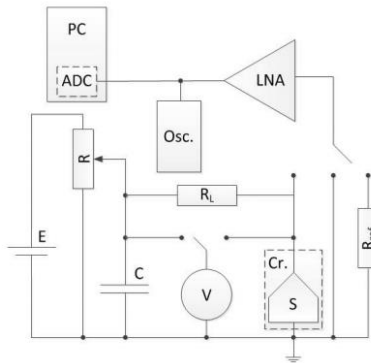
3.2 Jutiklių charakterizavimas

Šiame skyriuje aprašomi InGaAs BT jutiklio elektrinių ypatybių eksperimentiniai tyrimai ir teoriniai vertinimai. Vienas iš aktualių uždavinių, kuriuos reikia spręsti tobulinant InGaAs „peteliškės“ tipo detektorius, yra padidinti jų jautrį THz dažnių ruože. Tai galima pasiekti optimizuojant jutiklių dizainą arba supratus jutiklių triukšmų šaltinius [88,89]. Kitas uždavinys, pasinaudojus eksperimentiniais Kelvino zondo [90], tunelinių srovių mikroskopijos metodais bei teoriniais elektrinių laukų ir puslaidininkinių struktūrų modeliavimais įskaityti galimą paviršinių būsenų ir krūvių nulemto lauko efekto įtaką jutiklio elektrinėms savybėms.

3.2.1 Žemadažniai BT jutiklių triukšmai

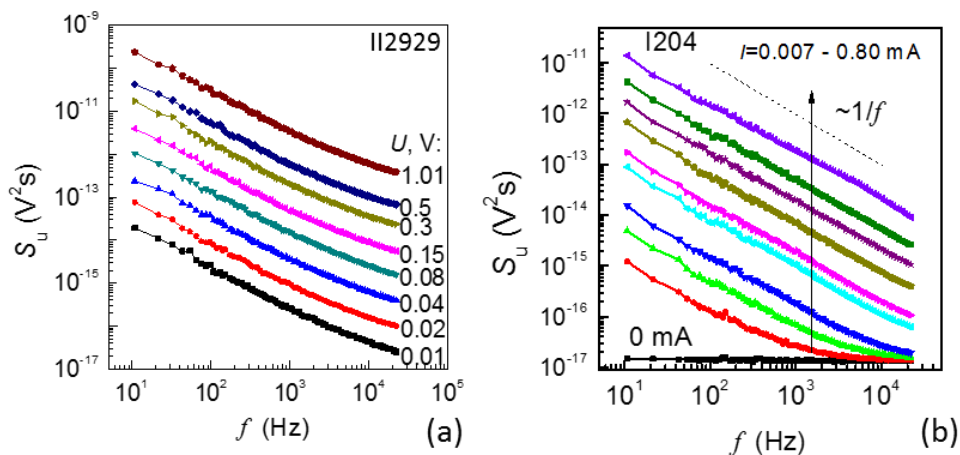
Žemo dažnio triukšmų tyrimai yra geras metodas vertinti ruošinio kokybę [88]. Kita vertus, detektoriaus triukšmo lygis yra veiksnys ribojantis vaizdo sistemos jautrį [91]. Preliminarus tyrimas parodė, kad spektrinis srovės triukšmų

tankis BT jutiklyje kinta kaip $1/f$. Žemo dažnio triukšmai buvo tirti 10 Hz – 20 kHz dažnių intervale 77 – 300 K temperatūroje naudojantis principine eksperimento schema, pateikta 33 pav. Eksperimento metodika detaliai aprašyta [P 7] ir [P 13].



33 pav. Triukšmų matavimo principinė schema. S – bandinys; R_L – apkrovos, R_{ref} – atraminė varža, LNA – mažatriukšmis stiprintuvas, ADC – analogas-kodas keitiklis, PC – kompiuteris, Osc – oscilografas, Cr. – kriostatas, V – voltmetras. [P 7] ir [P 13]

Žemo dažnio triukšmų spektrai, išmatuoti jutikliuose, kurių epitaksinis InGaAs sluoksnis buvo užaugintas FTMC (I204) ir Fraunhofer (II2929) centruose yra pavaizduoti 34 paveiksle.

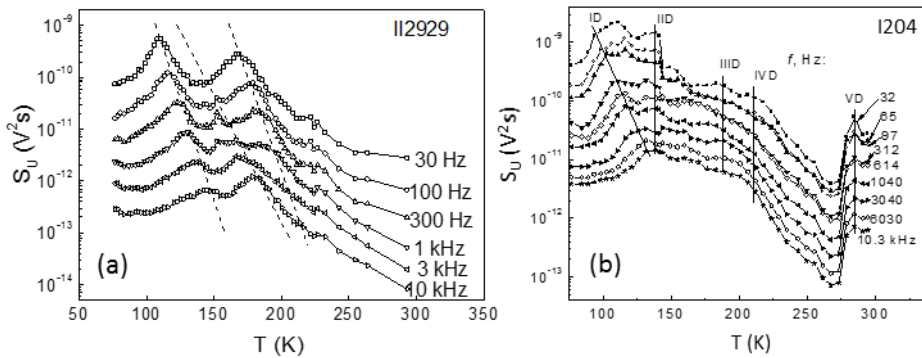


34 pav. Iš II2929 (a) ir I204 (b) ruošinių pagamintų BT jutiklių įtampos fluktuacijų spektrinis tankis esant skirtingai tiesioginei įtampai ir srovei kambario temperatūroje. [P 13], [P 4]

Iš 34 pav. matyti, kad įtampos fliuktuacijų spektrinis tankis kambario temperatūroje yra atvirkščiai proporcingas dažniui. Įtampos fliuktuacijos yra nulemtos krūvininkų pagavimo ir išlaisvinimo vyksmų daugelyje pagavimo centrų, kuriuos kuria defektai [P 4]. Jų kilmė yra krūvininkų generacijos-

rekombinacijos superpozicija defektuose, lokalizuotuose InGaAs ir InAs sluoksnių sandūroje [P 4]. 35 paveiksle parodytos tipinės įtampos fluktuacijų spektrinio tankio priklausomybės nuo temperatūros skirtingomis technologinėmis sąlygomis išaugintuose InGaAs BT bandiniuose. Matome, kad spektrinio tankio priklausomybės BT jutikliui ant I204 ruošinio turi aiškiai išreikštas smailes ties temperatūromis, kada efektinė relaksacijos trukmė tenkina sąlygą:

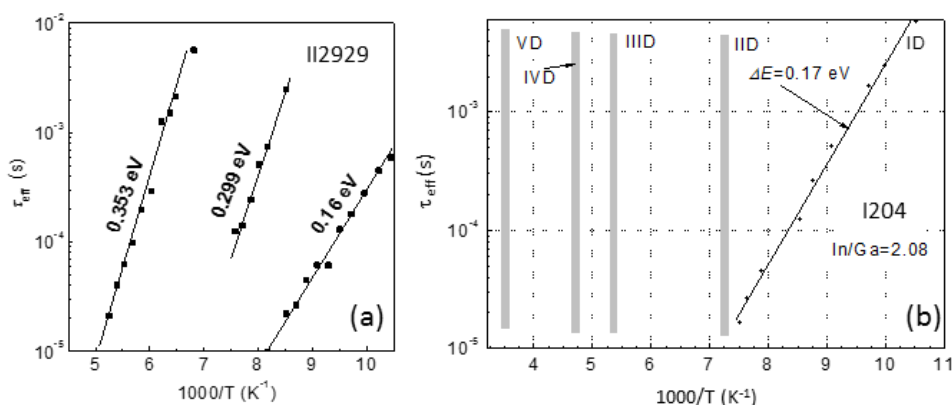
$$2\pi f_{0i} \tau_{i \text{ eff}} = 1. \quad (3.1)$$



35 pav. BT jutiklių, pagamintų ant ruošinio II2929 (a) ir ant ruošinio I204 (b) spektrinės triukšmų priklausomybės nuo temperatūros ties skirtingais dažniais. [P 13], [P 4]

Kadangi kiekviena smailė (35 pav.) tenkina (3.1) sąlygą, tada iš šių smaيليų galima įvertinti efektyvią relaksacijos trukmę τ_{eff} ir jos priklausomybę nuo temperatūros [P 4].

Kaip matyti iš 35 b pav., triukšmų smailes vieta BT jutikliui ant I204 ruošinio beveik nepriklauso nuo temperatūros. Šiuo atveju, tam tikroje temperatūroje Fermi lygmuo yra defektų lygmenų kontinuume, todėl relaksacijos laikai yra išplitę plačiame intervale. Įvertinti relaksacijos laikai keletui BT jutiklių ant skirtingų InGaAs ruošinių yra parodyti 36 pav.



36 pav. Relaksacijos laikų priklausomybė nuo temperatūros BT jutikliuose ant II2929 (a) ir I204 (b) ruošinio. Vertikalios kolonėlės parodo relaksacijos laikų pasiskirstymo intervalą. Taip pat pateikiamos įvertintos detektorių aktyvacijos energijos. [P 13], [P 4]

Šių fliktuacijų šaltinis yra pavieniai krūvininkų pagavimo centrai, kurių būdingosios trukmės pasiskirstę nuo kelių mikrosekundžių iki keliasdešimt milisekundžių. Aktyvacijos energija ΔE , atsirandanti dėl krūvininkų pagavos ir emisijos procesų, apskaičiuota pagal Arenijaus dėsnį:

$$\tau_{eff} = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right). \quad (3.2)$$

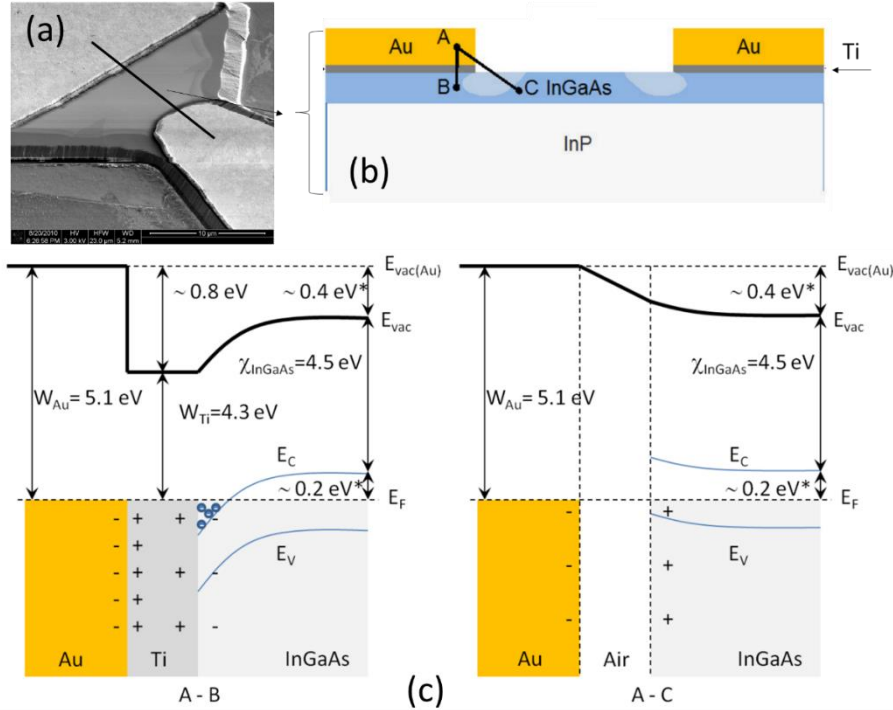
Iš 35 pav. apskaičiuotos aktyvacijos energijos bandiniams, pagamintiems ant ruošinio II2929 yra intervale nuo 0.16 eV iki 0.36 eV ir apie 0.17 eV bandiniams iš I204 ruošinio.

Triukšmų tyrimai parodė, jog defektai, esantys InGaAs/InAs/InP sandūroje yra atsakingi už generacijos-rekombinacijos procesus. Triukšmo lygis skirtingam bandiniui skiriasi dėl riboto skaičiaus aktyvių defektų centrų ir jų pozicijos sandūroje tarp InP ir InGaAs sluoksnių [P 4], [P 7], [P 13].

3.2.2 BT struktūros energijos juostų diagramos modelis

Analizuojamo jutiklio aktyviosios srities SEM nuotrauka ir jos skerspjūvio eskizas yra pavaizduotas 37 a, b pav. Tikslūs sluoksnių storai ir jutiklio matmenys plačiau aprašyti 3.1.2 skyriuje. Tikėtini energijos lygmenų pokyčiai tiriamoje struktūroje pjūviuose tarp taškų A-B ir A-C yra pateikti 37 c pav. Šiuo atveju yra laikoma, kad aukso išlaisvinimo darbas $W_{Au}=5.1$ eV, titano $W_{Ti}=$

4.3 eV, o elektroninis giminingumas $\chi_{\text{InGaAs}}=4.5$ eV. Prielaidos, kad Fermi lygmuo yra 0.2 eV žemiau nei laidumo juostos E_c minimumas, o išorinis elektrinis laukas yra visiškai ekranuojamas nuo InGaAs apačios bei susidarantis mažas juostų užlinkimas ties InGaAs paviršiumi prie aukso kontakto bus aptartos vėliau.



37 pav. BT jutiklio dalies SEM nuotrauka (a). BT jutiklio skerspjūvis (b) pjūvyje, kuris pažymėtas linija (a) paveiksle (matmenys neišlaikyti). Raidės „A“, „B“, „C“ žymi skerspjūvio vietas, kur atliekama energetinių juostų analizė. Šviesiai mėlynos sritys žymi tikėtinas InGaAs sritis, kur Au kontaktinis sluoksnis gali turėti įtakos krūvininkų koncentracijai. Tikėtinas elektronų energijos vakuume lygmens pasiskirstymas (stora juoda linija) (c) nepridėjus išorinės įtampos tarp sričių A – B (kairėje) ir tarp A – C (dešinėje). (*) žymi apytiksles energijos vertes. [PS 1]

Energijos juostų diagramoje, skerspjūvio A – B atveju matome, kad Ti išlaisvinimo darbas yra mažesnis nei InGaAs elektroninis giminingumas, todėl Ti ir InGaAs sandūroje susidaro elektronų potencinė duobė ir *n*-tipo InGaAs atveju turėtų formuotis ominis kontaktas. Ankstesni Ti/Pt/Au ominių kontaktų tyrimai [92] patvirtina, kad Ti sluoksnis ant InGaAs lieka nepakitęs struktūrai atkaitinant iki 450 °C, o aukštesnėje temperatūroje kontaktinė varža didėja dėl InGaAs skaidymosi. Mūsų bandinių atveju ši temperatūra buvo mažesnė, todėl,

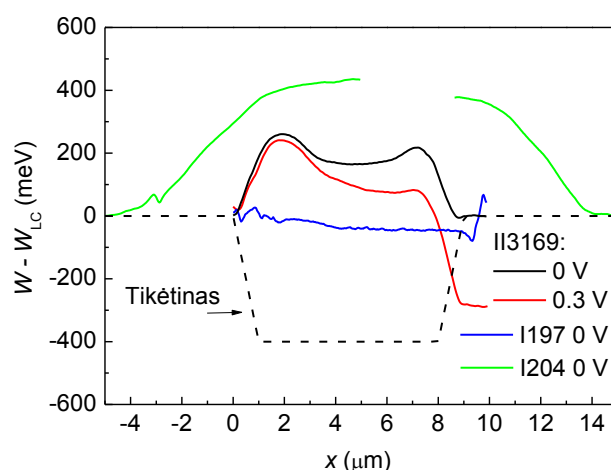
tikėtina, kad Ti/Au sluoksnis yra stabilus ir elektronų kaupimasis dėl mažo Ti išlaisvinimo darbo užtikrina ominio tipo kontaktą.

Neprijungus išorinės įtampos, Fermi lygmuo turėtų išlikti toje pačioje pozicijoje visose medžiagose. Dėl visiško elektrinio lauko ekranavimo yra tikėtinas kelių šimtų milivoltų potencialo skirtumas tarp Au ir InGaAs sluoksnio vietų, gerokai nutolusių nuo metalinio kontakto krašto. Situacija darosi kiek sudėtingesnė ties metalinio kontakto kraštu. Dėl plono 20 nm Ti sluoksnio, gerokai storesnis Au sluoksnis (daugiau nei 200 nm) per keliolikos nanometrų oro tarpą gali liestis su daugiau nei 500 nm storio InGaAs sluoksniu. Taip pat, reikia pabrėžti, kad BT jutiklio aktyvios srities sandara ir forma yra sudėtinga, todėl tiksliam elektrostatinio potencialo pasiskirstymui paprasto analitinio sprendinio nėra.

Naudojant Sypapsys TCAD paketą buvo atlikti elektrostatinio potencialo pasiskirstymo skaičiavimai skirtingiems metalo užvartų ant InGaAs paviršiaus ilgiams ir skirtingam paviršiniam krūviui. Struktūros modeliavimui pradiniai įvesties parametrai buvo paimti iš VACH ir skenuojančio Kelvino zondo mikroskopijos (SKZM) matavimų.

3.2.3 Matavimai Kelvino zonde

Išlaisvinimo darbų skirtumas tarp BT aktyviosios srities paviršiaus ir kairiojo kontakto buvo išmatuotas naudojant Veeco Dimension 3100/Nanoscope IV atominių jėgų mikroskopą. Matavimai atlikti išilgai BT jutiklio aktyviosios srities (vieta pažymėta juoda linija 37 a pav.). Matavimų rezultatai BT jutikliams, pagamintiems iš ruošinių I13169, I197 ir I204, yra pateikti 38 pav., kur 0 μm atitinka siauresniojo metalinio kontakto ribą su aktyviąja sritimi. BT jutiklio iš I204 ruošinio aktyvioji sritis buvo 19 μm ilgio, todėl buvo atlikti matavimai iš skirtingų aktyviosios srities pusių ir 38 pav. matomas žalios kreivės trūkis.



38 pav. BT jutiklio aktyviosios srities ir kairiojo kontakto išlaisvinimo darbų skirtumo ($W - W_{LC}$) pasiskirstymas išilgai BT jutiklio aktyviosios srities. Linijos žymi SKZM matavimo rezultatus, brūkšninė linija žymi tikėtiną (be paviršinio krūvio įtakos) išlaisvinimo darbų f-jos pasiskirstymą remiantis 37 c pav. Išlaisvinimo darbų skirtumas buvo matuojamas smalesniojo kontakto atžvilgiu. Šio kontakto riba su InGaAs aktyviaja sritimi pažymėta ties $x \approx 0 \mu\text{m}$ bandiniams iš II3169, I197 ruošinių ir ties $x \approx 5 \mu\text{m}$ bandiniui iš I204 ruošinio. Dešiniojo kontakto sritis prasideda ties $x \approx 9 \mu\text{m}$ bandiniams iš II3169, I197 ruošinių ir ties $x \approx 14 \mu\text{m}$ bandiniui iš I204 ruošinio. Išmatuotas išlaisvinimo darbų skirtumas BT jutikliui iš II3169 ruošinio tarp kontaktų prijungus 0.3 V įtampą pažymėtas raudona linija ir neprijungus įtampos – juoda linija. BT jutikliui iš I204 ruošinio (žalia linija) atlikti du atskiri matavimai dėl riboto zondo eigos nuotolio. [PS 1]

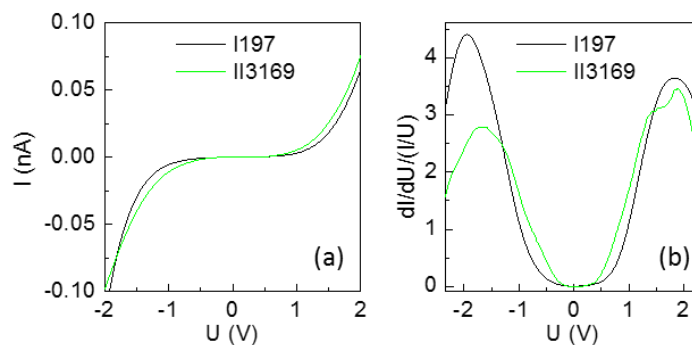
Iš 38 pav. matome, kad išlaisvinimo darbų skirtumas aukso paviršiaus atžvilgiu tolygiai didėja ir pasiekia 400 meV ir $>200 \text{ meV}$ už $1 \mu\text{m}$ nuo metalizuotos srities krašto bandiniams I204 ir II3169. Tuo tarpu, bandinyje I197 išmatuotas gerokai mažesnis skirtumas. Remiantis išlaisvinimo darbo ir elektroninio giminingumo vertėmis, aptartomis 37 c pav., tikėtinas kelių šimtų meV išlaisvinimo darbų skirtumas centre tarp BT kontaktų yra pavaizduotas brūkšnine linija 38 pav. Žymus rezultatų nesutapimas gali reikšti, kad Fermi lygmuo yra kelias šimtais meV žemiau nei buvo vertinama arba išmatuotiems rezultatams turėjo įtakos papildomi veiksniai: paviršiaus oksidacija, paviršinių būsenų įtaka ir paviršinis krūvis.

3.2.4 Tunelinės stovės matavimai

Fermi lygmens pozicija ir paviršinių būsenų tankis buvo įvertintas atlikus tunelinės stovės matavimus su Veeco Dimension 3100/Nanoscope IVa atominių jėgų mikroskopu. Tunelinės srovės ir jos normuotos išvestinės priklausomybė nuo prijungtos išorinės įtampos yra pateikta 39 pav. Matome, kad normuotos tunelinės srovės išvestinė (ir tuo pačiu paviršinių būsenų tankis) pradeda didėti ties 0.4 V ir -0.3 V įtampa. Šių įtampų skirtumas atitinka InGaAs draustinės energijos tarpą, o įtampos, atitinkančios sritis kur paviršinių būsenų tankis yra didesnis, pažymi, kad Fermi lygmuo yra šiek tiek žemiau nei draustinių energijų tarpo vidurys.

Sudėjus 0.4 eV skirtumo tarp Fermi lygmens ir InGaAs laidumo juostos apačios vertę su InGaAs 4.5 eV elektroninio giminingumo verte gauname 4.9 eV išlaisvinimo darbo vertę. Ši vertė keliais šimtais meV skiriasi nuo Kelvino zondo metodika išmatuotų rezultatų.

Panašus tunelinių srovių ir Kelvino zondo metodais gautų rezultatų nesutapimas buvo užfiksuotas ir [90]. Straipsnio autoriai teigia, kad šis nesutapimas gali atsirasti dėl skirtingų metodikų jautrio paviršiniam krūviui.



39 pav. Tunelinės srovės (a) ir jos išvestinės (b) priklausomybė nuo prijungtos išorinės įtampos bandiniams I13169 ir I197. [PS 1]

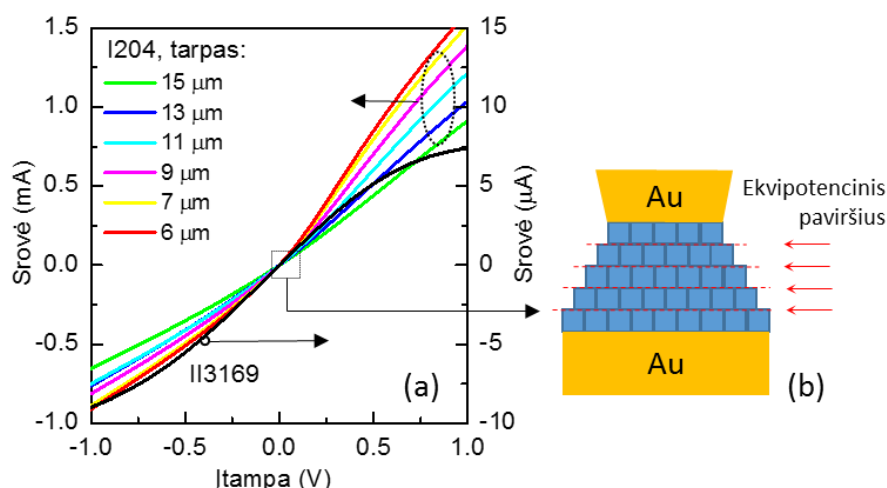
3.2.5 BT struktūrų voltamperinės charakteristikos

BT jutiklių, pagamintų iš ruošinių I13169 ir I204, išmatuotos voltamperinės charakteristikos yra pateiktos 40 pav. Jose išryškėja keletas dėsningumų: bandinių varžos verčių dviejų eilių skirtumas ties 0 V tašku (kreivių polinkis yra

panašus, tačiau kairiosios ir dešinėsios srovės skalių vertės skiriasi dvejomis eilėmis) ir didesnės varžos bandinio voltamperinės charakteristikos kreivės polinkis esant įtampai > 1 V.

Suvidurkinus 1 V potencialo skirtumą tarp dviejų metalinių kontaktų, nutolusių per 10 μm atstumą, gauname vidutinę elektrinio lauko stiprio vertę apie 1 kV/cm. Ši vertė yra tos pačios eilės, tačiau vis tiek mažesnė nei 3 kV/cm, kur galima tikėtis krūvininkų dreifinio greičio mažėjimo [93]. Todėl BT jutiklio iš I204 ruošinio voltamperinė charakteristika yra tiesinė ties 1 V įtampos verte net ir esant skirtingiems atstumams tarp metalizuotų sričių. Norint paaiškinti BT jutiklio, pagaminto iš II3169 ruošinio, VACH reikia ieškoti kitų veiksnių, tokių kaip, lauko efektas, susidaręs dėl paviršinio krūvio ar metalinių kontaktų kraštai, lemiantys lauko netolygumą InGaAs sluoksnyje.

Tikėtina aktyviosios srities varža (Ω) turėtų būti apie 80 % savitosios paviršinės varžos R_{sq} vertės. Ši vertė apytiksliai įvertinta jutiklio aktyviają sritį išdalinant į kvadratėlius, sudėtus į eiles. Šių kvadratėlių varža skaičiuojama laikant, kad linijose kvadratėliai sujungti lygiagrečiai, o tarp linijų sujungti nuosekliai (40 b pav.). Tokiu atveju, BT jutiklio, pagaminto iš II3169 ruošinio, aktyviosios srities varža $R \approx 100$ k Ω , laikant, kad elektronų judris $\mu = 9 \times 10^3$ cm²/V · s. Tada vidutinė InGaAs 500 nm sluoksnyje esančių krūvininkų koncentracija $N = 7 \cdot 10^{13}$ cm⁻³, o tikėtinas savitasis krūvininkų tankis $n_i = 6.3 \cdot 10^{11}$ cm⁻³ [94]. Dėl to gali atsirasti 0.2 eV skirtumas tarp InGaAs laidumo juostos dugno ir Fermi lygmens. Ši vertė naudota ir braižant energijos lygmenis toliau nuo metalinio kontakto (37 c pav.).



40 pav. BT jutiklių, pagamintų iš II3169 ir I204 ruošinių, voltamperinė charakteristika (a), tarpas matuojamas tarp metalizuotų sričių. Juodas stačiakampis žymi vertes, kurios naudotos skaičiuojant vidutinę krūvininkų koncentraciją. Varžos skaičiavimo modelio iliustracija (b). Aktyvioji sritis sudalinta į kvadratėlius, kurių varža skaičiuota laikant, kad linijose kvadratėliai sujungti lygiagrečiai, o tarp jų – nuosekliai. [PS 1]

Esant nuskurdintam InGaAs sluoksniui ir laikant, kad elektrinio lauko stipris ties apatiniu InGaAs sluoksniu yra lygus nuliui, jonizuotų donorų koncentracija $N_D = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, sluoksnio storis $t_{\text{InGaAs}}=534 \text{ nm}$ ir santykinė dielektrinė skvarba $\varepsilon = 13.9$, galima pritaikyti klasikinę FET kanalo potencialo skirtumo, reikalingo pilnai nuskurdinti kanalą, formulę:

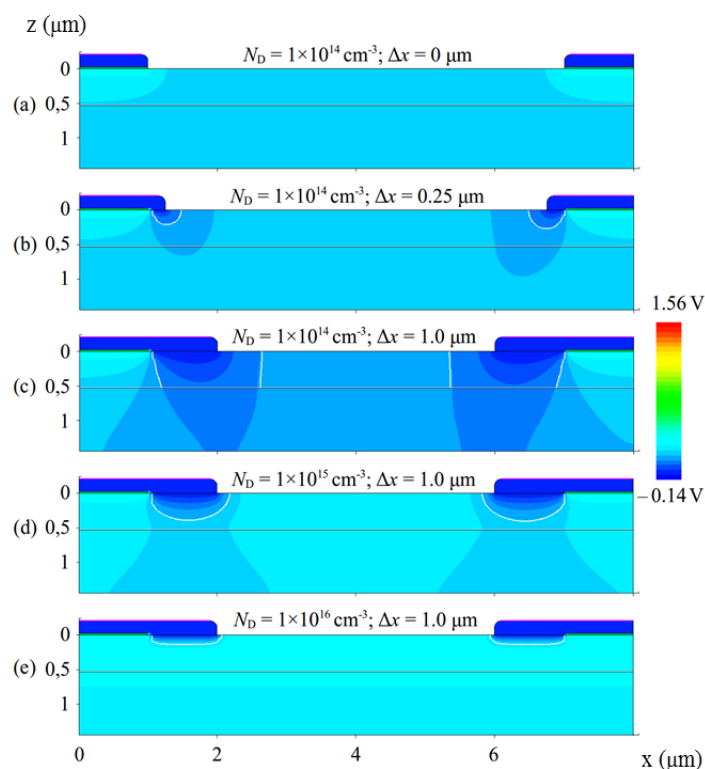
$$\Delta\varphi_{PO} = \int_0^{t_{\text{InGaAs}}} q_0 \times N_D \times \frac{t_{\text{InGaAs}}}{\varepsilon\varepsilon_0} = q_0 \times N_D \times \frac{t_{\text{InGaAs}}^2}{\varepsilon\varepsilon_0} \approx 13 \text{ mV}. \quad (3.3)$$

Šią vertę atitinkantis elektronų potencinės energijos skirtumas (13 meV) yra apytiksliai eile mažesnis nei užfiksuotas matuotų ir tikėtinų išlaisvinimo darbų verčių skirtumas (38 pav.). Todėl susidaręs paviršinis krūvis gali turėti esminės įtakos vertinant jutiklio elektrines savybes. Dalinis sluoksnių nuskurdinimas taip pat gali reikšti, kad tikėtina vidutinė krūvininkų koncentracija yra mažesnė nei tikroji legiruojančiųjų priemaišų koncentracija.

Todėl norint rasti BT jutiklių, pagamintų iš II3169 ruošinio sumažėjusio laidumo virš $\pm 1 \text{ V}$ (40 pav.) priežastį, buvo atlikti išsamūs voltamperinės charakteristikos modeliavimai naudojant Synopsys TCAD programinį paketą [95].

Buvo modeliuojami du kontaktų tipai: ominis kontaktas žemiau Ti sluoksnio ir Šotki kontaktas, vietose, kur susidariusios Au užvartos. Kadangi BT jutiklio, pagaminto iš II3169 ruošinio, VACH yra panaši į FET voltamperinę charakteristiką, buvo vertinamos kelios aplinkybės – Au kontakto užvarta, galinti suformuoti Šotki tipo užtūrą, ir kanalo nuskurdimas dėl paviršinio krūvio.

Vertinant elektrostatinio potencialo pasiskirstymą BT jutiklio aktyviosios srities pjūvyje, kai nėra prijungtos išorinės įtampos, buvo keičiamas aukso sluoksnio užvartos ant InGaAs paviršiaus ilgis ir fiksuojant užvartos ilgį keičiamas InGaAs sluoksnio legiravimas. Šių modeliavimų rezultatai pateikti 41 pav.



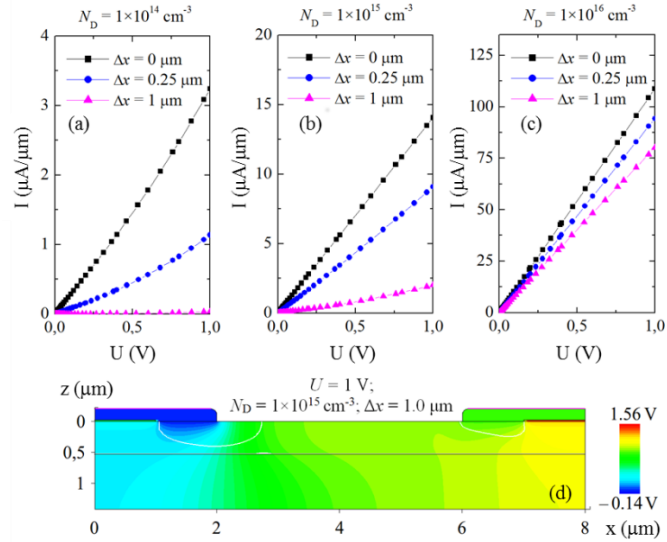
41 pav. Elektrostatinio potencialo pasiskirstymas BT aktyvios srities pjūvyje esant fiksuotai koncentracijai $N_D = 1 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ ir keičiant aukso sluoksnio užvartos ant InGaAs paviršiaus ilgį nuo $0\text{ }\mu\text{m}$ iki $1\text{ }\mu\text{m}$ (a – c); esant fiksuotam $1\text{ }\mu\text{m}$ užvartos ilgiui ir keičiant koncentraciją $N_D = 1 \cdot 10^{14\div 16}\text{ cm}^{-3}$ (c – e). [PS 1]

Matome, kad esant fiksuotai koncentracijai $N_D = 1 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ (41 a–c pav.) Šotki barjeras ir nuskurdintos sritys (sričių ribos preliminariai pažymėtos balta linija) dėl didelio aukso išlaisvinimo darbo susidaro būtent po

aukso sluoksniu. Esant 1 μm užvartai susidaro nuskurdinta sritis per visą InGaAs kanalo storį. Didinant šio sluoksnio legiravimą, dėl didesnio krūvininkų tankio, nuskurdinta sritis mažėja. Tuo pačiu mažėja ir elektrostatinio lauko ekranavimas.

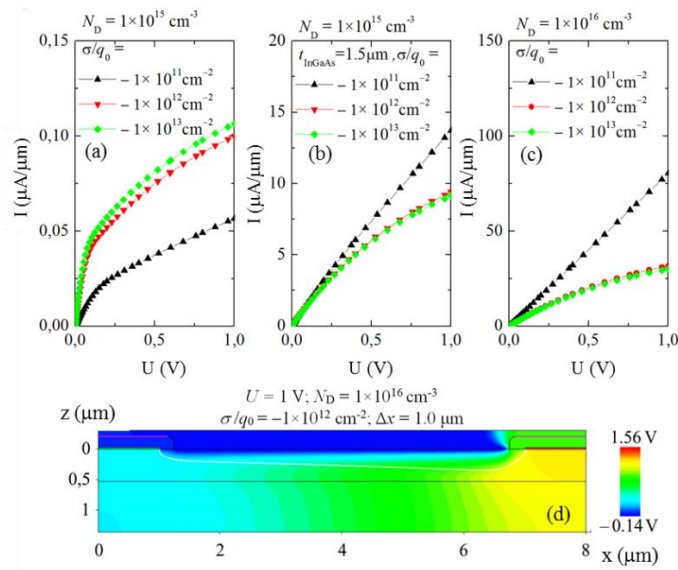
Modeliavimo rezultatai esant didesniai legiravimui leidžia paaiškinti eksperimentiškai matuotą BT voltamperinę charakteristiką (40 pav.). Dėl atviro kanalo ir didelės krūvininkų koncentracijos, ties mažomis įtampomis matoma tiesinė voltamperinės charakteristikos dalis. Mažesnio legiravimo atveju, matomas srovės ribojimas panašiai kaip FET dėl išplitusios nuskurdintos srities yra susijęs su siaurėjančio kanalo efektu. Tačiau, šį supaprastintą modelį apsunkina tai, kad InGaAs ir virš jo esančio metalo sluoksnio storiai yra panašūs.

Atlikti voltamperinės charakteristikos modeliavimai esant skirtingiems užvartos ilgiams ir sluoksnio legiravimui (42 a–c pav.) rodo, kad jokio VACh kreivės užlinkimo prie didesnių įtampų nėra, o kai kuriais atvejais atsiranda užlinkimas visai į priešingą pusę. Taip pat iš 42 d pav. matyti, kad prijungus išorinę įtampą, nuskurdintos srities storis didėja tik prie vieno metalinio kontakto, todėl būtent tik ten mažėja kanalo plotis ir stebimas didžiausias potencialo kritimas. Tai nederą su jau ankščiau 38 pav. pateiktais eksperimentiniais matavimų rezultatais. Šie nesutapimai skatina toliau tobulinti modelį. Darant ilgesnės (x kryptimi) nuskurdintos kanalo dalies prielaidą, vertinama paviršinio krūvio įtaka ties atvira InGaAs sritimi. Iš 42 pav. matome, kad netgi be srovės ribojimo norint turėti eksperimentiškai matuotas srovės vertes (40 pav.), reikia, kad krūvininkų koncentracija sluoksnyje būtų bent $N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ eilės.



42 pav. Teoriškai sumodeliuotos BT jutiklio voltameperinės charakteristikos esant skirtingiems legiravimams ir Au sluoksnio užvartos ilgiams (a–c). Elektrostatinio potencialo pasiskirstymas BT jutiklio aktyviosios srities pjūvyje esant prijungtai 1 V išorinei įtampai, 1 μm užvartai ir krūvininkų koncentracijai $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (d). [PS 1]

Pritaikius šias prielaidas, keletas geriausiai eksperimentinius rezultatus atitinkančių voltamperinių charakteristikų yra pateikta 43 pav.



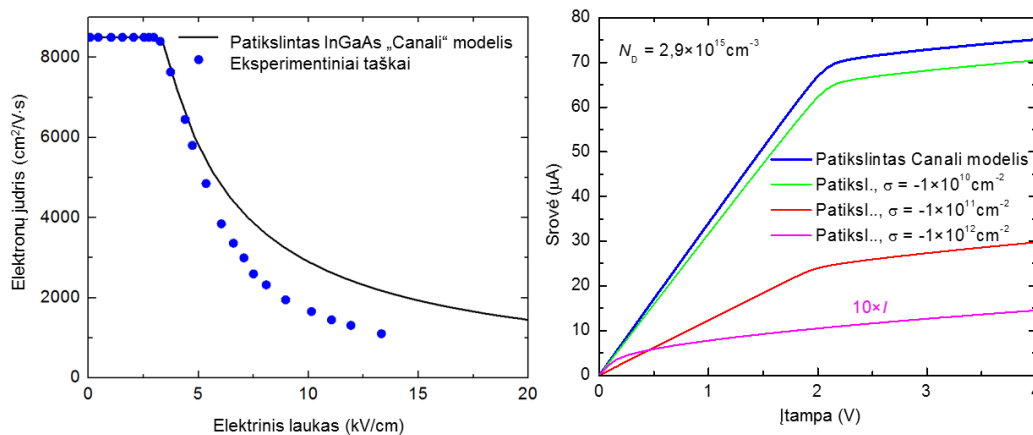
43 pav. Teoriškai sumodeliuotos BT voltamperinės charakteristikos esant skirtingiems legiravimams ir paviršiniam krūviui (a–c). Elektrostatinio potencialo pasiskirstymas BT aktyviosios srities pjūvyje esant prijungtai 1 V išorinei įtampai, 1 μm užvartai, $N_D = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ir paviršiniam krūvio tankiui $\sigma = 1 \cdot 10^{12} q_0 \cdot \text{cm}^{-2}$ (d). [PS 1]

Matome, kad įvertinus susidarantį paviršinį krūvį sumodeliuota voltamperinė charakteristika užsilenkia panašiai kaip ir eksperimentiškai

matuota 40 pav. Srovės vertės esant krūvininkų koncentracijai $N_D=1\cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ yra mažesnės nei matuotos, o esant krūvininkų koncentracijai $N_D=1\cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ srovės vertės yra didesnės nei išmatuotos 40 pav.

3.2.6 Stipraus elektrinio lauko įtaka

Šiuo atveju modeliuojant BT jutiklio voltamperinę charakteristiką buvo įvertinta elektronų judrio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio. Modeliuojant buvo panaudotas TCAD modeliavimo programinėje įrangoje esantis „Canali“ judrio modelis [96]. Jis aprašo krūvininkų judrio priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprio (44 pav. kairėje). Šis modelis buvo pritaikytas InGaAs medžiagai. Elektronų judrio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio InGaAs medžiagoje yra pateikta 44 pav. kairėje. Taip pat palyginimui atidėti ir eksperimentiniai judrio verčių taškai iš [93].

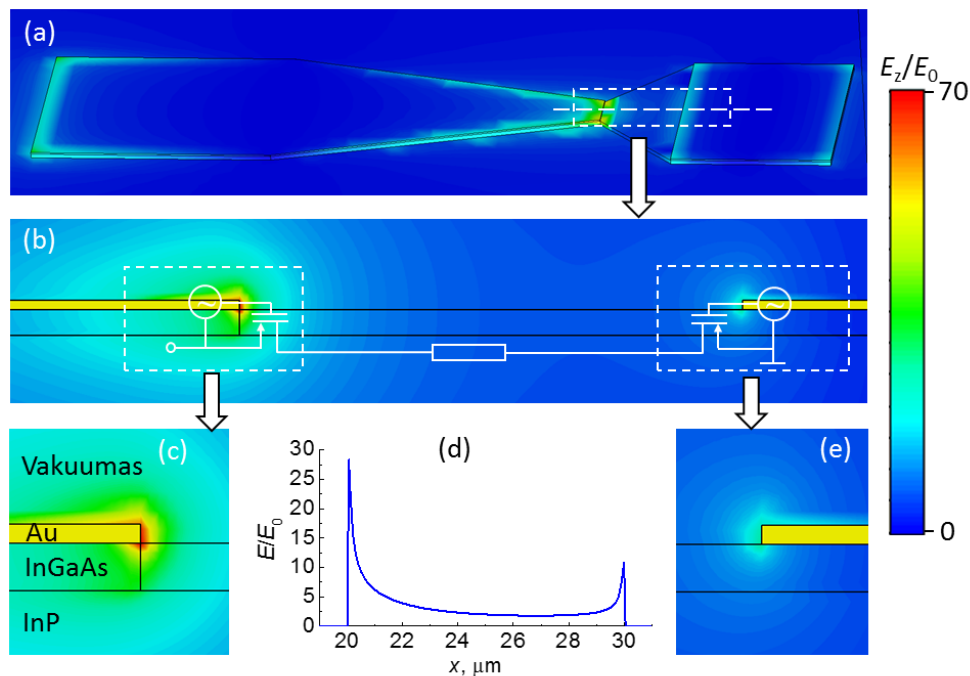


44 pav. Krūvininkų judrio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio bei eksperimentiniai taškai iš [93] (kairėje). Sumodeliuota voltamperinė charakteristika naudojant patikslintą „Canali“ modelį, įskaičius ir neįskaičius paviršinio krūvio. [PS 1]

Iš 44 pav. galima matyti, kad didesnės varžos bandiniams neigiamos diferencinės varžos, esant elektriniam laukui virš 3 kV/cm , neužtenka norint atkartoti eksperimentiškai matuotą voltamperinę charakteristiką. Reikėtų gerokai greitesnio judrio mažėjimo InGaAs medžiagoje. Patikslinus judrio modelį pavyko priartėti prie eksperimentiškai matuotos voltamperinės charakteristikos užlinkimo esant mažesnėms paviršinio krūvio tankio vertėms.

3.2.7 BT jutiklio detekcijos mechanizmo modelio papildymas

BT detekcijos mechanizmą aiškinantis karštųjų krūvininkų modelis [17] buvo papildytas vertinant anteninius BT jutiklio metalizuotų sričių efektus aukštuose dažniuose. Elektrinio lauko pasiskirstymas BT jutiklio aktyviojoje dalyje po metalu buvo sumodeliuotas naudojant FDTD metodą. Skaičiavimai atlikti ties 0.57 THz dažniu, narvelio dydis: $0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$ xyz kryptimis. Kaip matome iš 45 a–e pav., didesnės amplitudės elektrinis laukas koncentruojasi ties smailesniu jutiklio kontaktu. Šis kintantis elektrinis laukas veikia kaip aukšto dažnio įtampos šaltinis tarp užtūros ir ištakos, pavaizduotos ekvivalentinėje dviejų lauko tranzistorių schemoje (45 b pav.).



45 pav. Sumodeliuoto elektrinio lauko amplitudės pasiskirstymas BT jutiklyje ties 0.57 THz (a). Išdidinta viršutinio paveikslėlio stačiakampiu pažymėta dalis ir ekvivalentinė dviejų lauko tranzistorių schema (b). Elektrinio lauko amplitudės pasiskirstymas jutiklio aktyvios srities ir metalo sandūroje (c ir e). Elektrinio lauko amplitudės pasiskirstymas pjūvyje išilgai BT jutiklio aktyviosios srities (d). [PS 1]

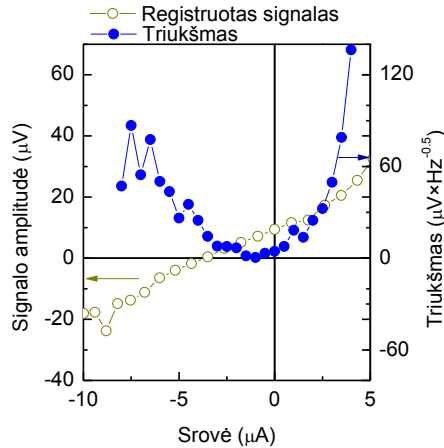
Vertikali elektrinio lauko komponentė E_y moduluoja kanalo laidumą, o kintama srovė, indukuota E_x horizontalios elektrinio lauko komponentės, yra lyginama. Kitoje jutiklio aktyviosios srities pusėje esantis kitas tranzistorius taip pat veikia kaip detektorius, tačiau jo įtaka yra gerokai mažesnė dėl mažesnės

elektrinio lauko amplitudės toje srityje. (45 e pav.). Šis THz signalo detekcijos mechanizmas turi panašumo su [81] darbe pristatytu nesandūrinių (*angl.* junctionless) lauko tranzistoriaus veikimo modeliu. Mūsų atveju BT jutiklio metalinės dalies kraštas veiktų kaip kompaktiška užtūra. O potencialų skirtumas tarp užtūros ir ištakos susidarytų dėl skirtingo išlaisvinimo darbo ir paviršinio krūvio.

3.2.8 Darbo taško įtaka BT atsakui ir triukšmui

Keletą tikėtinų BT detektoriaus savybių, remiantis 3.2.5 ir 3.2.7 skyreliuose aptartais modeliavimų rezultatais, reikėtų išskirti. Jei abiejuose aktyviosios srities pusėse susidariusių lauko tranzistorių kanalai neprijungus išorinės įtampos yra dalinai laidūs (37 ir 41 pav.) tai, pridėdant išorinę įtampą, galima tikėtis, kad vieno tranzistoriaus likusios laidžios kanalo dalies plotis didės, o kito – mažės (43 pav.). Dėl to galima tikėtis ir skirtingo išlygintos įtampos signalo iš šių dviejų jutiklio dalių, nes efektyviau kintamą lauką lygins arčiau atkirtos režimo esantis tranzistorius. Kai abiejų priešingomis kryptimis sujungtų tranzistorių įtaka pasidarys vienodai svarbi, BT nuolatinės įtampos komponentė turėtų būti lygi nuliui.

Ši prielaida buvo patvirtinta atlikus BT jutiklio atsako nuo darbo taško matavimus. Detektorius per $0.47\text{ M}\Omega$ varžą buvo nuosekliai prijungtas prie nuolatinės įtampos šaltinio. Apšvietus BT jutiklį 0.584 THz spinduliuote buvo registruojamas detektoriaus išduodamas signalas esant 10 s sinchroninio stiprintuvo integravimo trukmei. Užregistruoto signalo ir triukšmo lygio priklausomybė nuo pridėtos nuolatinės įtampos yra pavaizduota 46 pav.



46 pav. Registruojamo signalo amplitudės ir detektoriaus triukšmo priklausomybė nuo postūmio įtampos. [PS 1]

Kaip ir buvo tikėtasi, matuojamas BT detektoriaus signalas keičia ženklą apytiksliai prie $-4 \mu\text{A}$. Šiame taške, ties platesniu kontaktu esančio „tranzistoriaus“ kanale lyginant kintamą signalą gaunama įtampa kompensuoja iš siauresniojo kontakto tranzistoriaus kanalo gaunamą signalą (45 c pav.).

3.3 Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje buvo pristatytas molekulinį pluoštelių epitaksijos metodu užaugintų InGaAs/InP heterodarinių sluoksnių kokybės vertinimas esant skirtingoms auginimo sąlygoms. Ištirti žemo dažnio triukšmai ir nustatytas generacinių-rekombinacinių procesų mechanizmas, atsakingas už įtampos fliktuacijų spektrinio tankio kitimą pagal $1/f$ dėsnį. Taip pat papildytas „peteliškės“ tipo jutiklio veikimo principą aiškinantis karštųjų krūvininkų modelis, įvertinus paviršinių būsenų ir galimą lauko efekto įtaką.

Šiame skyriuje aprašyti InGaAs „peteliškės“ tipo jutiklių tyrimų rezultatai leidžia suformuoti *antrąją ginamąją teiginį*.

„Peteliškės“ formos InGaAs jutikliuose, pagamintuose iš didesnės nei $50 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ varžos InGaAs sluoksniu, voltamperinių charakteristikų formą ir jutiklio signalo pokyčius dėl juo tekančios nuolatinės srovės lemia paviršinių krūvių kuriamas elektrinis laukas.

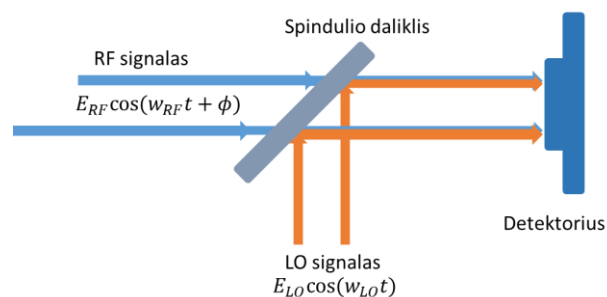
4 BT JUTIKLIŲ PANAUDOJIMAS THZ VAIZDINIMO SCHEMOSE

Šiame skyriuje vertinsime BT jutiklio galimybes jam veikiant heterodininės ir tiesioginės detekcijos režimuose. Taip pat bus pristatytos BT jutiklių liniuotės su integruota signalo stiprinimo elektronika. Pateikiamos statistinės jutiklių atsako charakteristikos ir pademonstruojamas spartesnis objektų vaizdinimo eksperimentas lygiagrečiai registruojant THz signalą su 32 jutikliais.

4.1 BT jutiklio taikymai tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose

4.1.1 Heterodininis signalo registravimo būdas

Šio principo sistemos yra gerokai sudėtingesnės ir brangesnės lyginant su tiesioginės detekcijos sistemomis, nes naudojami du THz spinduliuotę emituojantys šaltiniai. Šis signalo registravimo būdas buvo išrastas 1901 m ir pirmiausiai pritaikytas silpnų radijo signalų registravimui. Taip galima užregistruoti itin silpnus signalus, kurių tiesioginės detekcijos būdų jau neužregistruotume dėl gerokai didesnio į sistemą įnešamo triukšmo nei naudingas signalas. Heterodininės detekcijos [28] principo esmė – dviejų bangų netiesinis maišymas. Registruojamas signalas paverčiamas į mažesnio dažnio signalą, kuris yra lygus tarpiniam dviejų maišomų bangų dažniui f_{IF} . Maišant radijo dažnio šaltinio (RF) ir lokalaus osciliatoriaus (LO) elektromagnetinę spinduliuotę, kurių tarpusavio dažniai yra šiek tiek paslinkti, gaunamas tarpinis f_{IF} dažnis. Pats principas pavaizduotas 47 pav.



47 pav. Heterodininis signalo registravimo principas. [28]

Atraminis netiesinis detektorius, tinkantis f_{IF} dažnio signalo stiprinimui, pakeičia registruojamo signalo dažnį.

Jeigu turime RF signalą:

$$E_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \phi), \quad (4.1)$$

kur E_{RF} – RF šaltinio elektromagnetinės bangos lauko stipris; ω_{RF} – RF šaltinio spinduliuojamos bangos kampinis dažnis; t – laikas; ϕ – fazė. O lokalaus osciliatoriaus spinduliuojama elektromagnetinė banga aprašoma:

$$E_{LO} \cos(\omega_{LO} t). \quad (4.2)$$

Supaprastinus tariame, kad detektoriaus išėjime srovė I yra proporcinga elektrinių laukų sumos amplitudžių kvadratui:

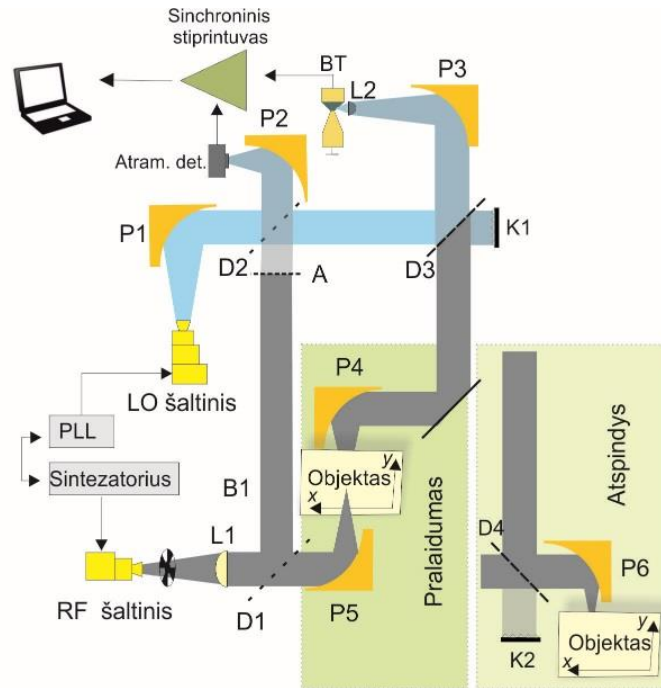
$$\begin{aligned} I &\propto (E_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \phi) + E_{LO} \cos(\omega_{LO} t))^2 = \\ &\frac{E_{RF}^2}{2} (1 + \cos(2\omega_{RF} t + 2\phi)) + \frac{E_{LO}^2}{2} (1 + \cos(2\omega_{LO} t)) \\ &+ E_{RF} E_{LO} [\cos((\omega_{RF} + \omega_{LO}) t + \phi) + \cos((\omega_{RF} - \omega_{LO}) t + \phi)] = \\ &\underbrace{\frac{E_{RF}^2 + E_{LO}^2}{2}}_{\text{pastovi komponentė}} + \\ &\underbrace{\frac{E_{RF}^2}{2} \cos(2\omega_{RF} t + 2\phi) + \frac{E_{LO}^2}{2} \cos(2\omega_{LO} t) + E_{RF} E_{LO} \cos((\omega_{RF} + \omega_{LO}) t + \phi)}_{\text{suminio dažnio komponentė}} \\ &+ \underbrace{E_{RF} E_{LO} \cos((\omega_{RF} - \omega_{LO}) t + \phi)}_{\text{tarpinio dažnio (IF) komponentė}}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Iš (4.3) lygties matome, kad sumaišius dvi bangas turime pastovią ir suminio dvigubo dažnio komponentę ($2\omega_{RF}$ ir $2\omega_{LO}$). Šios dvi komponentės yra nufiltruojamos ir paliekama tarpinio dažnio komponentė $\omega_{RF} - \omega_{LO}$, kuri yra proporcinga registruojamo signalo amplitudei. Naudojant šį signalų registravimo būdą galima nustatyti ir registruojamos bangos fazę. Signalų stabilumas priklauso nuo LO šaltinio stabilumo.

4.1.2 Tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemos

BT jutiklio galimybių tiesioginės ir heterodininės detekcijos režimuose tyrimams buvo surinktas standas, pavaizduotas 48 pav. Jame naudojami du elektroniniai šaltiniai: pirmasis šaltinis – tai stabilizuoto 98.57 GHz dažnio

Gano osciliatorius su 6 kartus dažnį dauginančia grandine (LO). Šis LO šaltinis per ruporinę anteną išspinduliuoja 591.4 GHz dažnio 420 μ W galios spinduliuotę. Galios matavimui naudotas kalibruotas galios matuoklis (Thomas Keating Absolute Power Meter System, Version 2). Antrąjį RF šaltinį sudaro dažnių daugintuvų grandinė, kuri sintetoriaus išduodamą dažnį padaugina 36 kartus. Šio šaltinio išėjime generuojamas dažnis yra 591.40044 GHz, o galia siekia 121 μ W. Tokiu būdu RF šaltinio spinduliuotė atžvilgiu LO šaltinio yra paslinkta per tarpinį dažnį $f_{IF}=43.964$ KHz. Šaltiniai sinchronizuojami 10 MHz dažniu. Spindulio daliklis D1 ir D2 kiekvieno šaltinio 10 % spinduliuojamos galios perduoda atraminiam Šotki tipo detektoriumi, kuris registruoja tarpinio dažnio komponentę. Likusi RF šaltinio spinduliuotė fokusuojama į objektą, praėjusi spinduliuotė surenkama veidrodžiais ir fokusuojama į BT detektoriumi, uždėtą ant pusiau sferinio silicio lęšio L2. Jutiklio signalas registruojamas sinchroniniu signalų stiprintuvu ir perduodamas kompiuteriui. Heterodininės detekcijos atveju LO ir RF šaltinių spinduliuotės maišymas santykiu 6:4 vyksta už spindulio daliklio D3. Naudojant motorizuotas ašis vaizdinamas objektas yra judinamas xy plokštumoje, statmenoje spindulio pluoštui. Tokiu būdu gaunamas rastrinis pralaidumo ar atspindžio tiriamo objekto vaizdas. Tiesioginės detekcijos atveju, naudojamas tik RF šaltinis. Jo spinduliuotė mechaniškai moduluojama 2 kHz dažniu, o signalas registruojamas sinchroniniu signalų stiprintuvu, kuris vėliau skaitmeniškai apdorojamas ir atvaizduojamas kompiuteriu. Vaizdinimui atspindyje vietoje parabolinio veidrodžio P5 įdėtas spindulio daliklis D4. Jį praėjusi spinduliuotė yra fokusuojama paraboliniu veidrodžiu P6 į bandinį. Nuo jo atsispindėjusią spinduliuotę tas pats daliklis nukreipia link detektoriaus.



48 pav. Supaprastinta principinė vaizdinimo schema, pritaikyta tiesioginės ir heterodininės detekcijos metodais vaizdinti objektus atspindyje ir pralaidume. BT – InGaAs asimetrinės formos detektorius; D – spindulio daliklis; K – slopintuvas; L – lęšis; P – parabolinis veidrodis; A – atenuatorius; PLL – susietos fazės generatorius. [IP 6]

4.1.3 BT jutiklio jautrio charakteristikos

BT jutiklio, veikiančio įtampos režime, jautrio įvertinimui naudojama formulė:

$$J = a \frac{\int x dS}{P_{spind} S_{Det}}, \quad (4.4)$$

kur J – jautris (V/W); $a=2.2$ konstanta; x – jutiklio signalas (V); dS – suminis spindulio plote registruotas signalas; $P_{spind}=121 \mu\text{W}$ – spinduliuotės galia. Efektyvus jutiklio plotas [81]:

$$S_{Det} = \frac{\pi\lambda^2}{4} = 2 \cdot 10^{-7} \text{m}^2, \quad (4.5)$$

kur $\lambda=500 \mu\text{m}$ – spinduliuotės bangos ilgis. Apskaičiuotas BT detektoriaus jautris siekia 6 V/W ties 0.59 THz ir 10.3 V/W ties 0.76 THz. Šios vertės yra palyginamos su [19] autorių deklaruojama 5 V/W verte ir eile didesnės lyginant su GaAs panašios antenos konfigūracijos detektoriais, kur jautris siekia 0.3 V/W [17,46].

Sistemos dinaminio diapazono palyginimas BT jutiklį naudojant skirtingais detekcijos režimais yra pateiktas 49 a pav. Triukšmo dažnių juosta:

$$\Delta f = \frac{0.25}{T_c} = 2 \text{ Hz}, \quad (4.6)$$

kur $T_c=500$ ms – stiprintuvo laiko konstanta. Minimali galia P_d , kurią gali registruoti jutiklis tiesioginės detekcijos būdu:

$$P_d = \Delta U_{Det} R_{RF} = 2.5 \text{ nW}, \quad (4.7)$$

kur ΔU_{Det} – santykis tarp minimalaus ir maksimalaus signalo tiesioginės detekcijos atveju. Šaltinio galia P_{RF} , kurią registruoja jutiklis:

$$P_{RF} = \frac{U_{Det}}{J} = 3.3 \text{ } \mu\text{W}. \quad (4.8)$$

Detektoriaus triukšmo ekvivalenti galia:

$$NEP = \frac{\sqrt{4kRT}}{J} = 4 \frac{\text{nW}}{\sqrt{\text{Hz}}}, \quad (4.9)$$

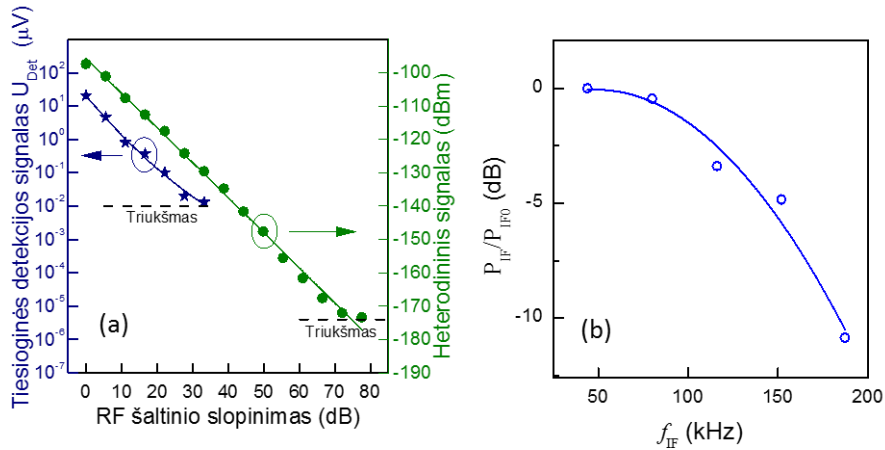
kur $k - 1.38 \cdot 10^{23}$ J/K, T – temperatūra (K), $R=36$ k Ω – jutiklio aktyviosios srities varža.

Heterodininės detekcijos atveju, jutiklio $NEP = 230 \text{ fW}(\text{Hz})^{-1}$, kai minimali galia P_{LO} , kurią registruoja BT siekia:

$$P_{LO} = P_{RF} \frac{U_{LO}}{U_{RF}} = 11 \text{ } \mu\text{W}, \quad (4.10)$$

kur $U_{LO} = 69.2 \text{ } \mu\text{V}$, o $U_{RF} = 20 \text{ } \mu\text{V}$ – LO ir RF šaltinio signalas, kurį registruoja BT.

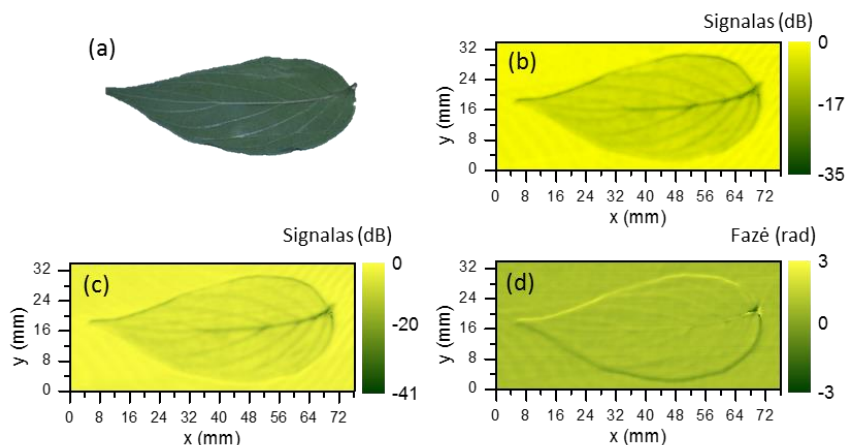
Iš 49 a pav. matome, kad sistemos dinaminis diapazonas yra 43 dB platesnis kai BT jutiklis veikia heterodininiam vaizdinimo režime. BT registruojamo heterodininio signalo slopinimo priklausomybė nuo moduliacijos dažnio kai $P_{LO} = 11 \text{ } \mu\text{V}$ yra pateikta 49 b pav. 3 dB slopinimas yra pasiekiamas esant 100 kHz moduliacijos dažniui, kurį riboja sinchroninio signalų stiprintuvo dažnių juosta.



49 pav. BT registruojamo signalo dinaminis diapazonas tiesioginės (mėlynos žvaizdutės) ir heterodininės detekcijos (žali apskritimai) atveju (a). Triukšmo lygis pažymėtas brūkšnine linija. Moduliacijos dažnio įtaka registruojamam signalui (b). [IP 6]

4.1.4 Objektų pralaidumo THz vaizdai

Vaizdinimo objektu buvo pasirinktas augalo lapas. Jis buvo patalpintas į voką taip imituojant realų paslėpto objekto paieškos atvejį. Atliekamas skenavimas judinant tiriamą objektą statmenai spindulio plokštumai. Lapo vaizdo užrašymo trukmė siekė 19 min, kai vaizdo taško dydis $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$, o viso vaizdo dydis $76 \times 34 \text{ mm}^2$. Objekto THz vaizdas registruojant signalą tiesioginės ir heterodininės detekcijos atvejais bei fazinis vaizdas pateikti 50 pav.

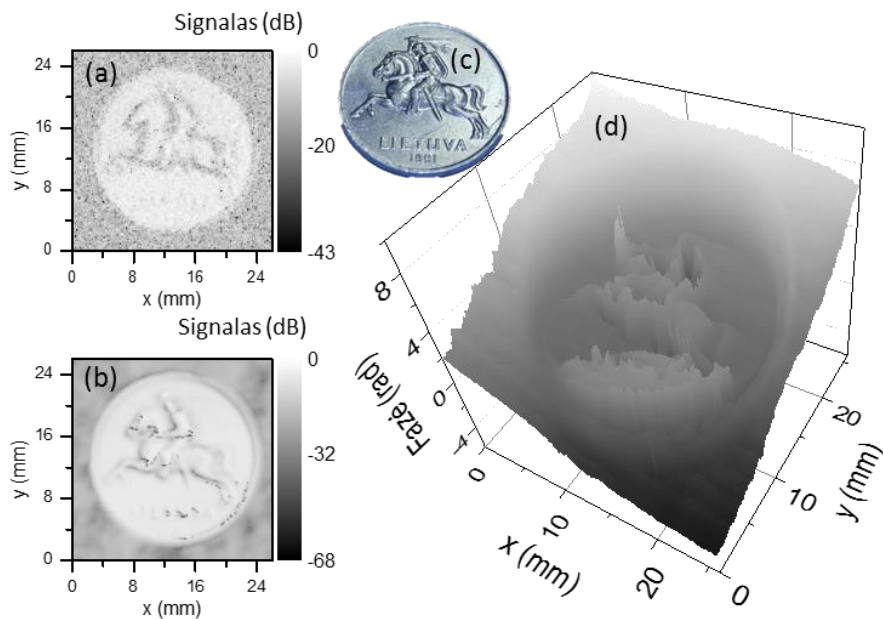


50 pav. Lapo THz vaizdai pralaidume. Lapo nuotrauka (a). Lapo THz vaizdas tiesiogiai registruojant pralaidumo signalą (b), heterodiniu būdu (c) ir lapo fazinis vaizdas (d). Vaizdo taško dydis $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$, vaizdinimo trukmė – 19 min. [IP 6]

Lyginant skirtingomis metodikomis užrašytus THz vaizdus gana sunku išvelgti skirtumus dėl silpnos THz spinduliuotės sugerties struktūroje. Optinį lapo storį galima matyti faziniame jo vaizde. Dėl skirtingo medžiagos lūžio rodiklio bangos fazė pasikeičia lyginant su LO šaltinio. Taip žinant medžiagos lūžio rodiklį ir fazės pokytį galima vertinti objekto storį.

4.1.5 Objektų atspindžio THz vaizdai

Lietuviškos vieno cento monetos, įdėtos į voka, THz vaizdai atspindyje pateikti 51 pav. Monetos vaizdinimo trukmė siekė 10 min, vaizdo taško dydis $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$, o viso vaizdo plotas $25 \times 25 \text{ mm}^2$. Šiuo atveju galima gerai matyti heterodininės schemos privalumą, nes dėl 25 dB didesnio dinaminio diapazono, triukšmas, kuris matomas tiesioginio vaizdinimo atveju, yra visai išnykęs. Vyčio struktūra yra aiškiai matoma, o fazinis jo vaizdas atrodo meniškai (galbūt todėl jis patiko Applied Physics Letters žurnalo redakcijai ir pateko ant žurnalo [IP 6] viršelio).



51 pav. Monetos THz vaizdai atspindyje. Monetos THz vaizdas tiesiogiai registruojant pralaidumo signalą (a), heterodiniu būdu (b) ir monetos fazinis vaizdas (d). Monetos nuotrauka (c) Vaizdo elemento dydis $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$, vaizdinimo trukmė – 10 min. [IP 6]

Vietose, kur objekto dalies aukštis yra palyginamas su bangos ilgiu ($507 \mu\text{m}$) ir vietose, kur susidaro stovinčios bangos tarp objekto ir parabolinio

veidrodžio P6, fazė pasislenka nežinoma skaičių kartų per 2π ir jos informacija prarandama. Todėl pritaikius matematinius fazės atstatymo algoritmus pilnas fazinis vaizdas buvo atstatytas ne visur.

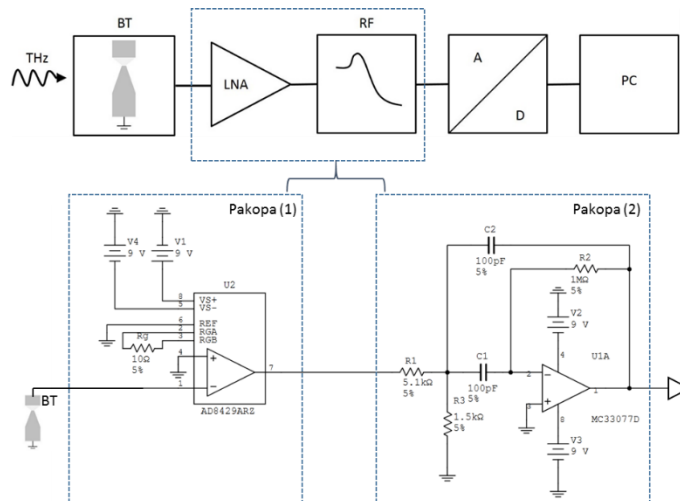
Heterodininio ir tiesioginio signalo registravimo būdais gauti atspindžio ir pralaidumo vaizdai ties 0.59 THz su BT jutikliais leidžia teigti, kad jie gali būti sėkmingai naudojami vaizdinimo sistemose. Šis sprendimas dėl paprastos jutiklių gamybos technologijos, jų atsparumo elektrostatiniams krūviams ir galimybės veikti pasyvioje schemoje neprijungiant išorinės įtampos leidžia pasiūlyti naujus jutiklių dizainus THz vaizdinimo sistemai. Šis skyrius yra svarbi gairė terahercinio dažnio ruožo vaizdo matricių kūrimo.

4.2 Vaizdinimas su BT jutiklių matricomis

Ištyrus BT jutiklių perspektyvas vaizdinimo sistemoje, kitas žingsnis yra jų kombinavimas į jutiklių matricas. Šis sprendimas leistų sumažinti vaizdinimo trukmę. Šiame poskyryje bus pristatoma detektorių signalų nuskaitymo ir stiprinimo elektronika, jutiklių elektrinių parametrų statistinis pasiskirstymas matricoje, bei vaizdinimo eksperimentai su jutiklių matricomis.

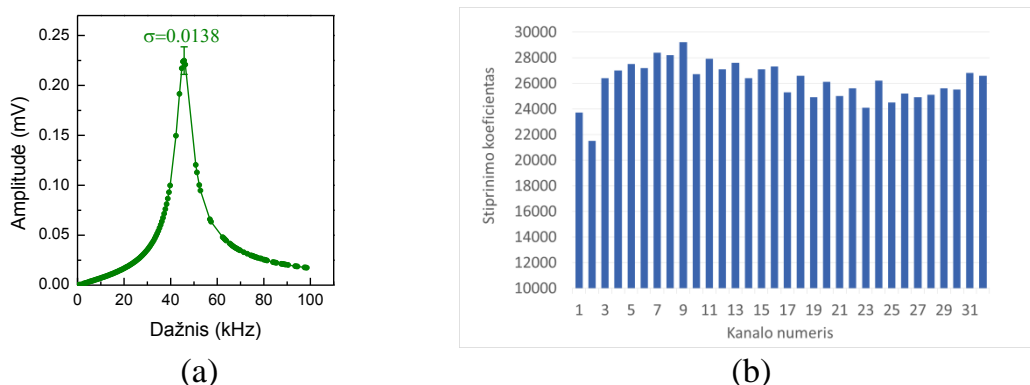
4.2.1 Detektorių matricos signalų nuskaitymas ir stiprinimas

Naudojant vieną jutiklį, jo signalas buvo nuskaitymas su komerciniu sinchroniniu signalų stiprintuvu. Šis sprendimas jutiklių matricoms netinka, nes kiekvienam kanalui reikalingas atskiras stiprintuvas. Todėl detektorių signalo nuskaitymui ir registravimui buvo sukonstruota 32 kanalų stiprintuvų grandinė, kurios centre įdedama 32-jų detektorių matrica. Vieno kanalo struktūrinė schema pateikta 52 pav. Selektvų stiprintuvą sudaro dvi pakopos: (52 pav. apačioje) pirmojoje naudojamas mažatriukšmis instrumentinis stiprintuvas AD8429, turintis labai mažą vidinį triukšmų lygį ir didelį stiprinimo koeficientą. Be kitų jo privalumų, jis patogus tuo, kad stiprinimo koeficiento vertę galima parinkti tik vienos varžos R_g pagalba.



52 pav. Stiprintuvų struktūrinė schema, BT – THz detektorius, LNA – mažatriukšmis instrumentinis stiprintuvas, FR – rezonansinis filtras, AD – daugiakanalis analogas – kodas keitiklis, PC – kompiuteris.

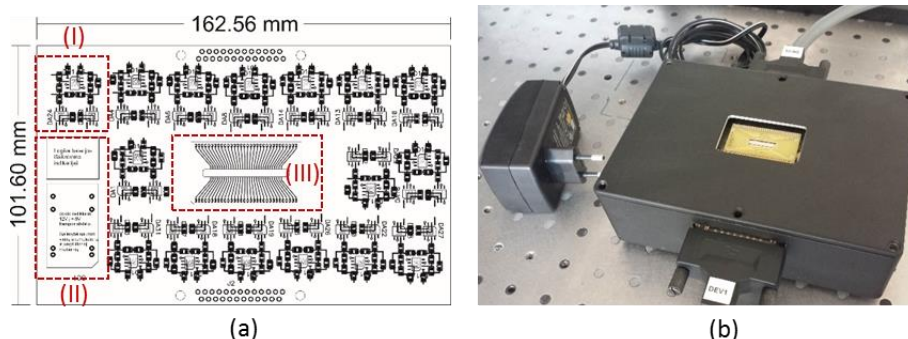
Šiuo atveju paskaičiuota $R_g = 10 \Omega$. Ji užtikrina reikalingą, daugiau negu 270 kartų įėjimo signalo (U_{in}) stiprinimą. Antrojeje selektyvaus stiprintuvo pakopoje U_{in} signalo dažniai nufiltruojami iki 35 kHz ir virš 55 kHz. Tada jis dar sustiprinamas apie 70 kartų naudojant operacinį stiprintuvą MC33077, įjungtą aktyvaus RC filtro schemoje. Teoriškai paskaičiuoti tokio filtro perdavimo charakteristikos parametrai yra: rezonansinis dažnis $f_o = 43 \text{ kHz}$, stiprinimas $G_{pk} = 39 \text{ dB}$, kokybės faktorius $Q = 14$. Atliktas selektyvių stiprintuvų pirminis charakterizavimas, išmatuotas kiekvieno kanalo stiprinimo koeficientas ir praleidžiamų dažnių ruožas (53 pav.).



53 pav. Stiprintuvo kanalų praleidžiamų dažnių juosta (a) bei stiprinimo koeficientas (b).

Iš grafiko galima matyti, kad visų kanalų praleidžiamų dažnių ruožas yra vienodas, o stiprinimo koeficientas nuo vidurkio skiriasi 14 %. Atlikus

atitinkamų komponentų nominalių verčių pakeitimus ir paderinimus stiprinimo koeficientas suvienodintas iki 7 %. Praktiškai gauti ribiniai šio dviejų pakopų selektyvaus stiprintuvo parametrai yra: U_{in} signalas $> 1\mu\text{V}$, $f_o \sim 46\text{ kHz}$, $G_{pk} > 19000$, maitinimo srovė $I_{mait} > 7\text{ mA}$ (kai maitinimo įtampa $U_{mait} = \pm 12\text{V}$). Stiprintuvų komponentų surinkimui buvo suprojektuota ir pagaminta dviejų pusių spausdintinio montažo plokštė. Į ją sumontuoti 1 % tikslumo paviršinio montažo pasyviniai komponentai. Numatyti keli schemas maitinimo variantai: tiesiai iš elektros tinko per išorinį 14 V maitinimo šaltinį arba nuo 12 V akumulatoriaus. Schemoje vienpolis išorinis DC maitinimas, panaudojus vidinį DC-DC keitiklį, keičiamas į dvipolį $\pm 9\text{V}$ maitinimą. Taip pat numatyta akumulatoriaus išsikrovimo indikacija. Maksimali visos plokštės naudojama galia siekia 6 W. Sustiprintas ir išfiltruotas signalas paduodamas į dvi 16 kanalų jungtis skirtingose plokštės pusėse. Toliau signalas patenka į analogas – kodas keitiklį, kur skaitmeniškai filtruojamas ir išskiriamas iš triukšmų. Stiprintuvų išdėstymo struktūrinė schema ir galutinio įrenginio nuotrauka yra pateikta 54 pav.

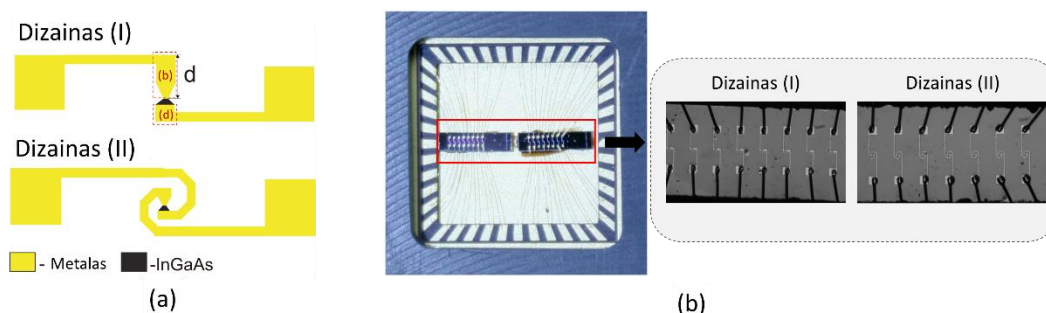


54 pav. Stiprintuvų kanalų išdėstymas ant spausdintinės plokštės (a), kur (I) – stiprintuvas vienam jutikliui, (II) DC-DC keitiklis ir maitinimo blokas, (III) – 32 jutiklių matrica. Bendras stiprintuvų su detektoriais ir maitinimo šaltiniu vaizdas (b).

4.2.2 Skirtingi antenos dizainai 8-ių jutiklių matricose

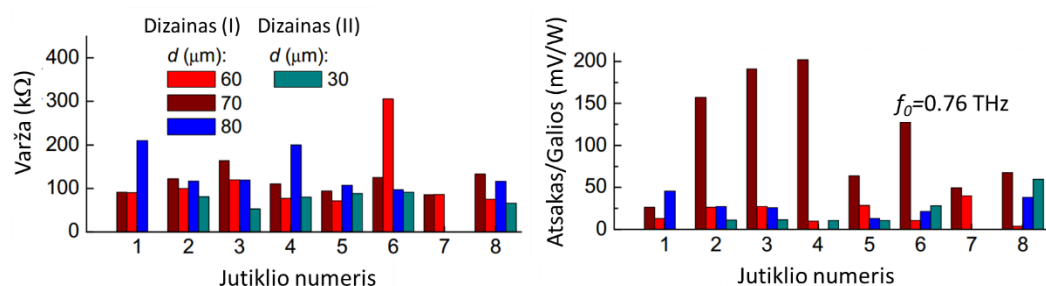
InGaAs jutikliai, pagaminti iš II3169 ruošinio su skirtingais peteliškės tipo antenos ilgiais $d= 20 - 40\ \mu\text{m}$ ir spiralinės antenos dizainai buvo tirti tiesioginės detekcijos schemoje. Anksčiau teoriškai modeliuotos tokio tipo jutiklio antenos dažninės savybės parodė, kad tikėtinas jautrio padidėjimas galimas tuo atveju jei

jutiklio asimetrinės metalizuotos antenos dalies matmenys bus palyginami su ketvirčiu bangos ilgio (55 a pav. sritis (b)). O stačiakampė viršutinė metalizuota jutiklio dalis bus mažesnė (55 a pav. sritis (d)) ir jos rezonansinis dažnis bus nustumtas link aukštesnių dažnių [IP 7].



55 pav. Skirtingo dizaino jutiklių vaizdas (a). Liniuočių, sumontuotų į keraminį laikiklį, nuotrauka (b). [P 15]

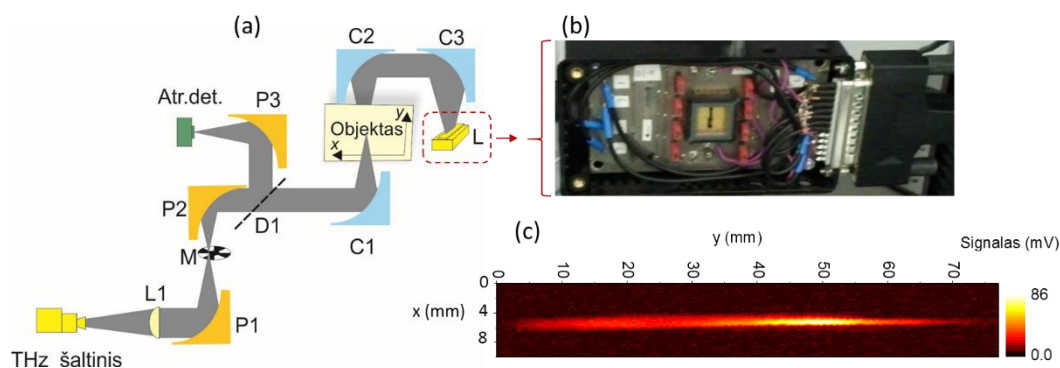
Šiuo atveju buvo tirtos 4-ios jutiklių matricos, sudarytos iš 8-ių į liniją išdėstytų detektorių. (55 a pav.). Trijose matricose buvo dizaino (I) jutikliai su skirtingais antenos (b) srities ilgiais (55 a pav.) ir viena matrica su dizaino (II) jutikliais (matmenys pateikti 21 b pav.). Tolimesniems eksperimentams šios matricos sumontuotos į keraminius laikiklius bei prijungtos naudojant ultragarsinę aukso vielos privirinimo technologiją prie laikiklio auksuotų aikštelių (55 b pav.). Statistinis pagamintų jutiklių matricų varžų ir atsako, jutiklių apšviečiant fokusuota 0.76 THz spinduliuote, palyginimas pateiktas 56 pav.



56 pav. Skirtingų jutiklių dizainų tipinis varžos (kairėje) ir THz atsako, normuoto į galią, verčių pasiskirstymas (dešinėje). [P 15]

Statistinis varžos išsibarstymas siekia 20 %. Nustatyta, kad geriausias dizaino (I) jutiklių atsakas į 0.76 THz dažnio spinduliuotę pasiekiamas kai antenos ilgis $d=70 \mu\text{m}$. Tačiau, jutiklių matricoje atsako išsibarstymas siekia apie 60 % nepriklausomai nuo dizaino.

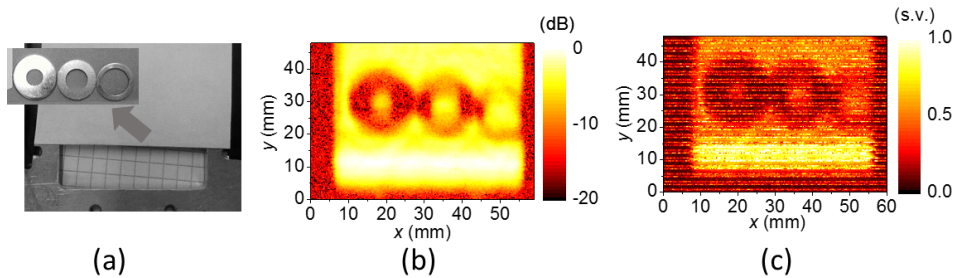
THz vaizdai buvo užrašyti naudojant optiškai kaupinamo molekulinio THz lazerio (FIRL100) 0.76 THz liniją. Eksperimento schema pateikta 57 a pav. Spinduliuotės galia siekė apie 2–2.5 mW. Pluoštas fokusuojamas su 5 cm židinio nuotolio paraboliniu veidrodžiu. Jo židinyje THz spinduliuotė buvo optiškai moduluojama 1 kHz dažniu, tada surenkama su kitu 5 cm paraboliniu veidrodžiu. Moduluota ir kolimuota spinduliuotė padalinama su spindulio dalikliu santykiu 10/1. 1/10 spinduliuotės dalis su 15 cm židinio nuotolio paraboliniu veidrodžiu sufokusuojama į atraminį detektorių lazerio darbo režimo sekimui. Kita dalis spinduliuotės su 10 cm židinio nuotolio cilindrinio veidrodžiu suspaudžiama į apie 1.3 mm pločio ir 13 mm aukščio dėmelę (vertinant ties FWHM 57 c pav.). Šioje vietoje dedamas bandinys arba detektorius spindulio profilio matavimui. Pro bandinį praėjusi spinduliuotė yra surenkama kitu cilindrinio veidrodžiu. Tada kolimuojama ir fokusuojama į detektorių matricą (57 b pav.) naudojant 5 cm židinio nuotolio cilindrinį veidrodį.



57 pav. Eksperimentinė schema (a), L – lęšis; D – spindulio daliklis; P – paraboliniai veidrodžiai; C – cilindriniai veidrodžiai; L – jutiklių matrica, Atr. Det. – atraminis detektorius; M – malūnelis. Detektorių liniuočių su integruotais stiprintuvais nuotrauka (b). Spindulio profilis už cilindrinio veidrodžio C1. Vaizdo taško dydis: 0.128 cm × 0.3 cm. Vaizdinimo trukmė – 294 s.

Objektui judant pastoviu greičiu x ašies kryptimi matuojamas visų matricos detektorių registruojamas sustiprintas signalas. Duomenų surinkimui buvo panaudoti didelės spartos „National Instruments NI USB-6363“ daugiakanaliai analogas-kodas keitikliai.

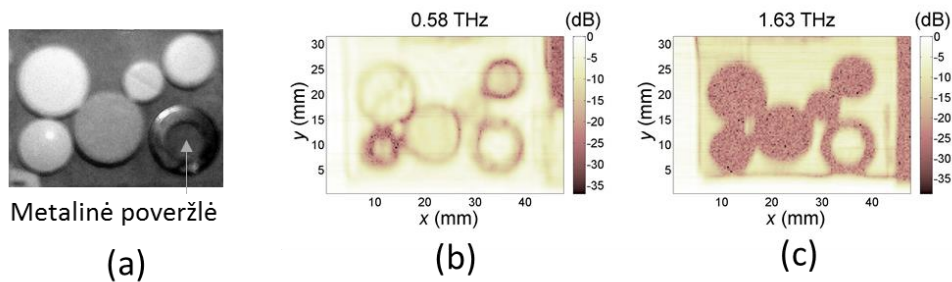
Metolinių poveržlių, supakuotų voke (58 a pav.), vaizdų palyginimas ties 0.76 THz, užrašytas naudojant dizaino (I) vieną jutiklį ir 8-ių detektorių liniuotę, pateiktas 58 b ir c paveiksluose.



58 pav. Metalinių poveržlių, supakuotų voke, nuotrauka (a) ir jų atvaizdas ties 0.76 THz, užrašytas su vienu jutikliu (b) ir su 8-ių jutiklių matrica (c). Vaizdo elemento dydis – $256 \times 300 \mu\text{m}^2$. Vaizdas sudarytas iš 269×160 vaizdo elementų. [P 6]

Matome, kad poveržlių kontūrai išryškėja abiem atvejais, dinaminis diapazonas siekia 20 dB. Rezoliucija y kryptimi yra šiek tiek prastesnė dėl sistemoje naudojamų cilindrinė veidrodžių, kurie spinduliuotę suspaudžia tik viena kryptimi. Vaizdo užrašymo trukmė su vienu jutikliu siekė 430 s, tuo tarpu su matrica – 60 s, kai x kryptimi judančios ašies greitis 32 mm/s.

Taip pat užrašyti THz vaizdai ties 0.58 THz ir 1.63 THz naudojant jutiklį su plačiajuoste (dizainas (II)), dažnių ruožas nuo 0.4 THz iki 2.5 THz) spiraline antena, kurios dizainas pateiktas 55 a pav.



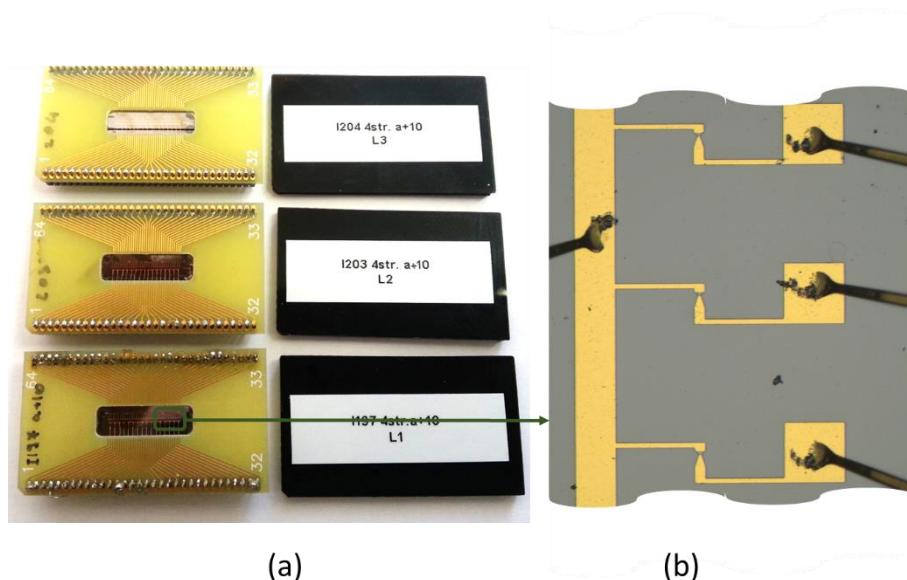
59 pav. Medikamentų nuotrauka (a). Medikamentų, supakuotų voke, atvaizdas ties 0.58 THz (b) ir ties 1.63 THz (c). Vaizdo elemento dydis – $300 \times 300 \mu\text{m}^2$. Vaizdas sudarytas iš 113×159 vaizdo elementų. [P 6]

Vaizdinimui į voką buvo sudėtos skirtingų dydžių, storių ir medžiagų tabletės su medikamentais bei metalinė poveržlė (59 a pav.). Objektų pralaidumo vaizdai ties 0.58 THz ir 1.63 THz yra pateikti 59 b ir c pav. Matome,

kad abiem atvejais aiškiai galima išskirti medikamentų formas ir dydžius. Be to, spinduliuotė ties žemesniu dažniu praeidama pro bandinį yra mažiau sugerama. Dėl didesnio bangos ilgio šiek tiek nukenčia skiriamoji geba, nes labiau pastebima difrakcija nuo objektų kraštų. Tai ypač gerai matosi lyginant metalinės poveržlės vaizdus. Ties 0.58 THz dinaminis diapazonas siekia apie 30 dB, tuo tarpu ties 1.63 THz dėl didesnės sugerties dinaminis diapazonas yra mažesnis.

4.2.3 Vaizdinimas su 32 jutiklių matricomis

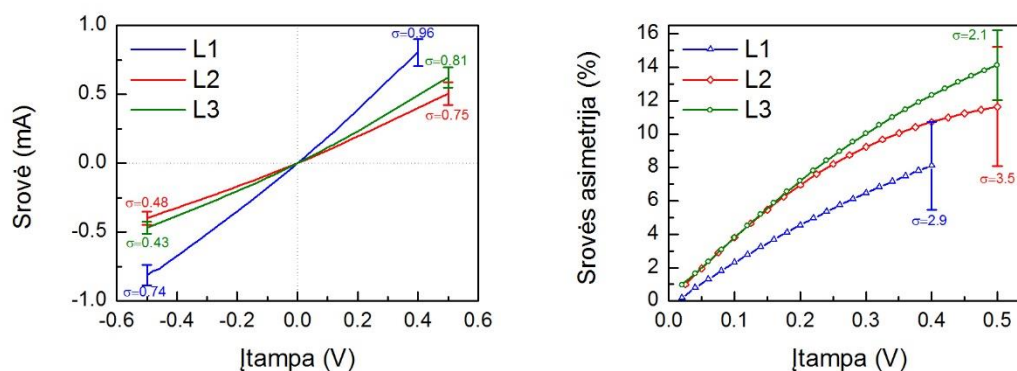
Šiuo metu prekyboje esančios kompaktiškos duomenų surinkimo plokštės dažniausiai turi iki 32 nepriklausomų kanalų. Todėl šio darbo metu buvo gaminamos dizaino (I) būtent 32 jutiklių matricos iš I197 (L1), I203 (L2) ir I204 (L3) ruošinių. Šių liniuočių nuotrauka yra pateikta 60 a paveiksle. Jutikliai buvo suskirstyti į 4 masyvus, kur viena antenos sritis (sritis (d), žiūrėti 55 a pav.) sujungta į viena kontaktą, naudojamą 8-iems jutikliams (60 b pav.). Tokiu atveju supaprastinama jutiklių liniuočių kontaktų jungimo procedūra ir sumažinama tikimybė matricoje turėti neveikiantį jutiklį.



60 pav. Detektorių matricos ant skirtingų ruošinių (a). Išdidintas matricos dalies jutiklių fragmentas (b).

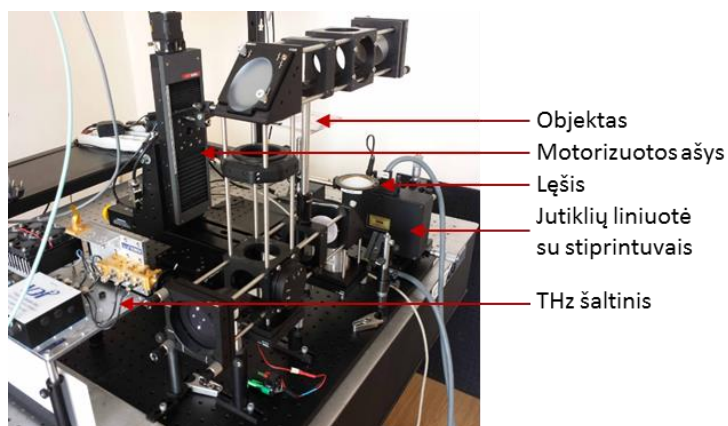
Sumontavus ir pajungus Au vielutes tarp jutiklio kontaktinių aikštelių ir laikiklio kontaktų buvo atlikti elektriniai matavimai. Jie parodo, ar jutiklis

kokybiškai pajungtas bei ar jis nebuvo pažeistas atliekant ultragarsinį laidininko virinimą. To paties dizaino jutiklių, pagamintų ant skirtingų ruošinių, voltamperinės charakteristikos yra pavaizduotos 61 a pav. Įtampos poliškumas keičiamas atžvilgiu susiaurintos metalizuotos srities. Standartinis nuokrypis matricoje L1 yra didžiausias ir siekia $\sigma=0.96$ mA teigiamoje VACH dalyje ir $\sigma=0.74$ mA neigiamoje VACH dalyje. Matricose L2 ir L3 standartinis nuokrypis yra mažesnis. Statistinį kiekvieno jutiklio srovės verčių išsibarstymą būtų galima paaiškinti struktūros aktyviosios srities netolygumais. Jie galėjo atsirasti gamybos proceso metu dėl galimų kaukės tapatinimo paklaidų ($\pm 2 \mu\text{m}$), kurios dėl panašių centrinės jutiklio dalies matmenų buvo labai jaučiamos. Todėl vietoj reikiamo $10 \mu\text{m}$ aktyviosios srities pločio, jis galėjo šiek tiek pakisti. Taip pat galima pastebėti, kad srovė, prijungus įtampą tiesiogine kryptimi, (teigiamas polius jungiamas prie susiaurėjusios metalizuotos srities kontakto) didėja daugiau nei įtampą prijungus atvirkščiai.



61 pav. Jutiklių matricų L1, L2, L3 voltamperinės ir asimetrijos charakteristikos.

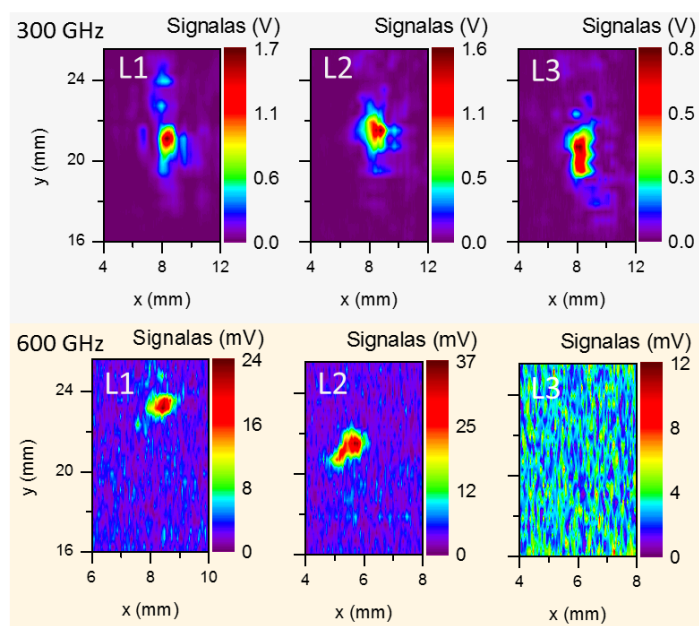
Iš pateiktos asimetrijos (61 b pav.) matome, kad mažiausias standartinis nuokrypis $\sigma=2.1$ % yra L3 jutiklių matricoje.



62 pav. Kompaktiško vaizdinimo stendo su 32 jutiklių matrica ir integruotais stiprintuvais nuotrauka.

Su šiais jutiklių masyvais buvo atlikti THz vaizdinimo eksperimentai. Stendo nuotrauka pateikta 62 pav. Pati vaizdinimo stendo schema labai panaši į pateiktą 57 a pav. Šiuo atveju naudojamas stabilus elektroninis 300/600 GHz VDI šaltinis, todėl nėra atraminio detektoriaus.

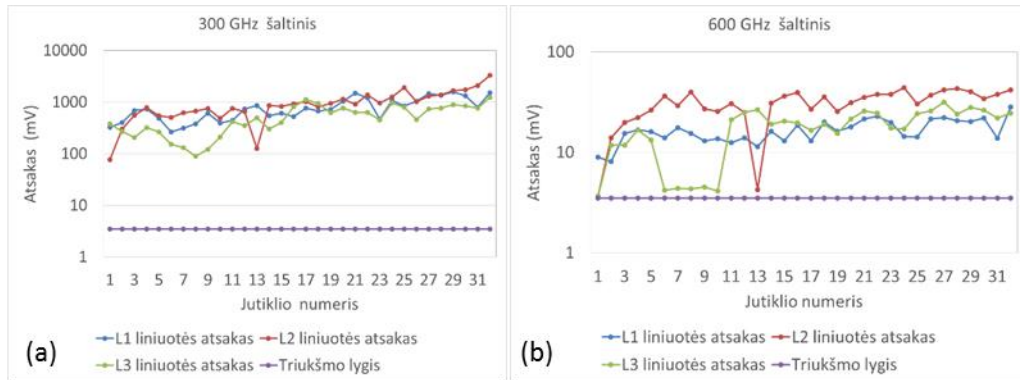
Atlikti 300 GHz ir 600 GHz spinduliuotės energinės apšvietos pasiskirstymo matavimai. Spindulio energijos srauto tankio pasiskirstymas, užrašytas su visais jutikliais, kai žingsnis x kryptimi buvo 0.1 mm, o y kryptimi žingsnis lygus matricos ilgiui, t. y. 12.8 mm, pateiktas 63 paveiksle. Reiktų pastebėti, kad fokusuoto spindulio vaizdas paveiksluose yra pasislinkęs dėl to, kad šiek tiek skiriasi skirtingų jutiklių liniuočių pozicijos korpusuose, jas naujai instaliavus kiekvienam naujam eksperimentui.



63 pav. Fokusuoto spindulio profilio vaizdas, užrašytas su L1, L2, L3 matricomis ties 300 GHz ir 600 GHz. Vaizdo taško dydis $0.096 \times 0.4 \text{ mm}^2$. Mechaninės ašies greitis x kryptimi 72 mm/s.

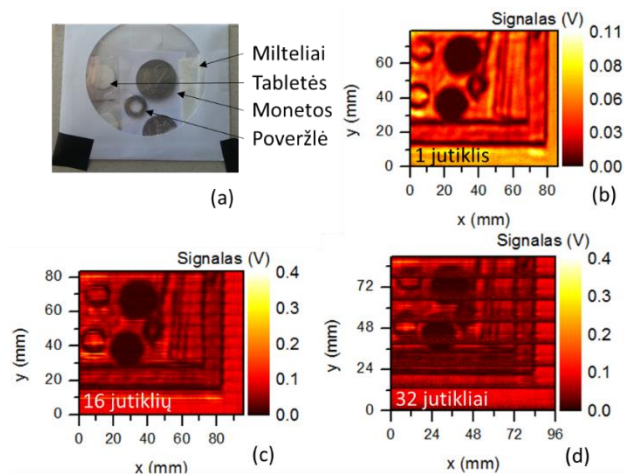
Iš 63 pav. rezultatų matome, kad 300 GHz fokusuotos spinduliuotės vaizdai, registruoti su jutiklių matricomis, yra šiek tiek išplitę, tačiau fokusuota dėmelė yra išskiriama. Matomas netiksliai išmatuotas profilis dėl jutiklių jautrių skirtumų. 600 GHz spinduliuotės vaizdas, užrašytas su matricomis L1 ir L2 yra matomas, tačiau L3 matrica vaizdo neregistravo. Spinduliuotės skerspjūvis siekia tik apie 1 mm, tai reiškia, kad tik 2 – 3 matricos jutikliai turėtų registruoti signalą. Kadangi spinduliuotės didžiausio intensyvumo pozicija sutapo su tais jutikliais, kurių jautris palyginamas su triukšmo lygiu (64 pav. L3), profilio nesimato. Iš 64 pav. pateikto kiekvieno jutiklio matricoje maksimalaus atsako matome, kad ties 300 GHz visų matricos detektorių atsakas didėja apie 6 kartus lyginant pirmus ir paskutinius detektorius. Tai galėjo lemti gamybos metu blogas kaukės pozicionavimas dėl santykinai ilgo matricos ilgio. Tokiu būdu detektorių aktyviosios sritys gali skirtis geometriškai. Nors elektriniai matavimai varžos verčių didelio išsibarstymo ir nerodo, tačiau kaip matome iš jutiklių palyginimo, jautris skiriasi priklausomai nuo jo pozicijos matricoje. 600 GHz atveju yra stebimas panašus jautrio pasiskirstymo efektas. Atsako priklausomybė nuo ruošinio auginimo sąlygų yra gana nežymi.

Signalas - triukšmas santykis ties 300 GHz siekia apie 100 kartų, o 600 GHz atveju – 10 kartų.



64 pav. Kiekvieno jutiklio matricoje L1, L2, L3 atsakas ties 300 GHz (a) ir 600 GHz (b).

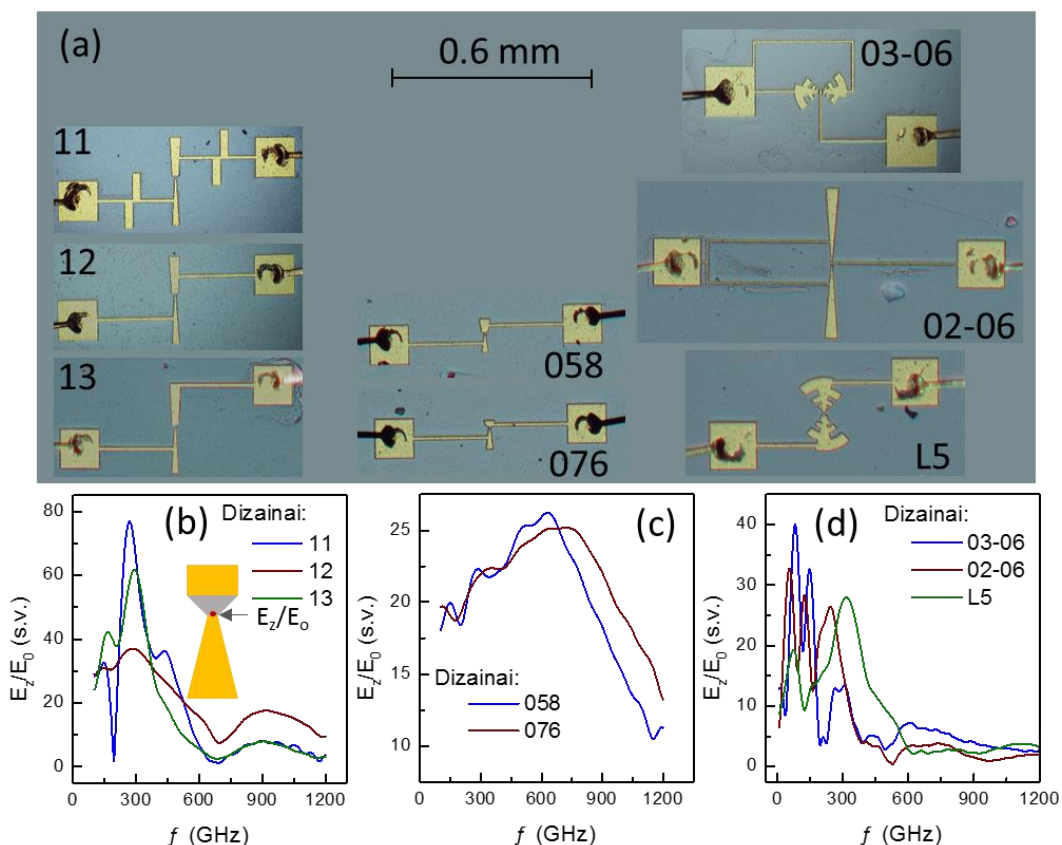
I voką supakuotų tablečių, monetų, poveržlės ir miltelių (65 a pav.) pralaidumo vaizdai ties 300 GHz, užrašyti naudojant jutiklių matricą L1, yra pateikti 65 pav. Vaizdo kokybės palyginimui yra pateiktas tas pats objektų vaizdas, užrašytas naudojant matricos L1 tik vieną jutiklį (jutiklio nr. 22), naudojant pusę matricoje esančių jutiklių (17-tas – 32-tas jutikliai) ir naudojant visus jutiklius (65 b-d pav.). Bandinio, kurio dydis $82 \times 95 \text{ mm}^2$, o vieno vaizdo taško dydis $0.096 \times 0.4 \text{ mm}^2$ terahercinio vaizdo užrašymas su vienu jutikliu, kai liniuotės greitis 72 mm/s, užtruko 493 s. Tuo tarpu, naudojant 16 ir 32 jutiklius – 31 s ir 16 s.



65 pav. 300 GHz pralaidumo vaizdai. Voke supakuotų bandinių nuotrauka (a) Vaizdas, kai signalas registruotas su 1 jutikliu (matrica L1, 22-as jutiklis) (b), 16 jutiklių (matrica L1, 17-tas – 32-tas jutiklis) (c) ir 32-ies jutikliais (d). Vaizdo taško dydis $0.096 \times 0.4 \text{ mm}^2$. Mechaninės ašies greitis x kryptimi 72 mm/s.

Iš 65 pav. matome, kad bandinio vaizdo kontūrai visais atvejais yra panašūs ir jų poziciją voke galima nesunkiai atskirti. Vaizde atsiranda triukšmas dėl skirtingų jutiklių jautrio. Lyginant su vaizdinimo greičio padidėjimu, šis trūkumas ne visais praktinio taikymo atvejais yra lemiantis veiksnys.

Doktorantūros metu buvo suprojektuota ir pagaminta ir daugiau jutiklių matricių. Atliekant FDTD modeliavimus, buvo kuriamos skirtingo rezonansinio dažnio antenos jutiklio aktyviają sritį ir medžiagas paliekant tas pačias. Nuotrauka su jutiklių fragmentais pateikta 66 a pav. Elektrinių laukų santykio priklausomybė nuo dažnio jutikliuose su skirtingomis antenomis yra pateikta 66 b - d pav. Antenos dizaine 11, papildomai pridėta prie kontaktinių aikštelių po du stačiakampius, kurie sumažina kontaktinių aikštelių įtaką spektre. Dizainai 12 ir 13 skiriasi tik kontaktinių aikštelių pajungimo vieta (66 a pav.). Šios antenos turi rezonansą ties 300 GHz (66 b pav.). Antenas (dizainas 058 ir 076) sudaro dvi skirtingo dydžio trapecijos, kurių rezonansiniai dažniai yra ties 0.58 THz ir 0.76 THz (66 c pav.). Kuriant antenos dizainą L5 buvo panaudota logoperiodinė antena, kuri pasižymi plačiu rezonansu ties 0.3 THz (66 d pav.) Jutiklių dizainai 03-06 ir 02-06 su logoperiodine ir dipoline antenomis yra eksperimentiniai. Juos sudaro dvi dvigubai sumažintos aktyviosios sritys (aktyviosios srities plotis – 5 μm , sąsmaukos plotis – 2 μm) sujungtos viena priešais kitą. Dėl ribotos gamybos technologijos tikslumo, šių jutiklių aktyviosios sritys buvo pagamintos netiksliai.



66 pav. Jutiklių dizainų su skirtingomis antenomis nuotraukos. Nuotraukose pateiktas vieno jutiklio fragmentas iš 16 jutiklių vienmatės matricos. Spektrinis elektrinių laukų santykio pasiskirstymas registruojamas ties jutiklio aktyviosios srities smaile (b intarpas).

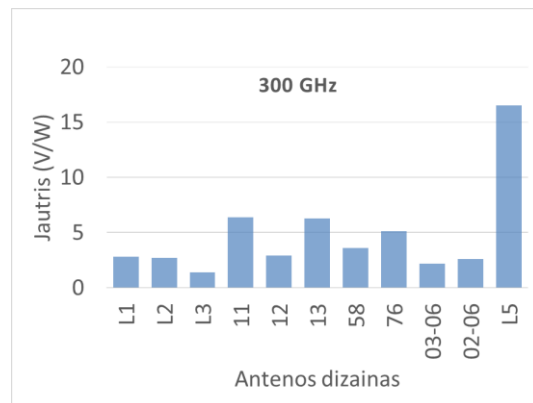
Iš 66 b-d pav. pateiktų modeliavimo rezultatų matome, kad elektrinių laukų santykis ties 300 GHz yra didesnis apie 1.5-5 karto lyginant su dizaino (I) jutikliais (55 a pav.). Taip pat šis santykis ties 600 GHz priklausomai nuo antenos yra apie 2 kartus didesnis nei dizaino (I) jutiklių. Kadangi elektrinių laukų santykio kvadratas yra proporcingas detektoriaus jautriui, detektoriai su naujomis antenomis ties 300 GHz galėtų būti 10 kartų jautresni, o ties 600 GHz – iki kelių kartų.

Pasinaudojus vaizdinimo stendu, kurio nuotrauka pateikta 62 pav., o principinė schema – 57 a pav. buvo išmatuoti jutiklių atsako signalai ties 300 GHz. Iš 67 pav. pateiktų rezultatų matome, kad jutiklių su rezonansinėmis antenomis (dizainai 11; 13) ties 300 GHz jautris yra didesnis apie du kartus, o jutiklio su logoperiodine antena (dizainas L5) jautris didesnis apie 6 kartus

lyginant su L1 jutiklių matrica. Dizainų 03-06 ir 02-06 dėl gamybos netikslumų eksperimentinius duomenis vertinti yra sudėtinga.

Antenos dizainas	Jautris (V/W)
L1	2.8
L2	2.7
L3	1.4
11	6.4
12	2.9
13	6.3
058	3.6
076	5.1
03-06	2.2
02-06	2.6
L5	16.5

(a)



(b)

67 pav. Skirtingų antenų dizainų jutiklių jautrio palyginimas ties 300 GHz.

Šie tyrimai parodė, kad skirtingi antenos dizainai gali padidinti jutiklio jautrį iki kelių kartų. Todėl vien tik antenos dizaino optimizavimas neduos apčiuopiamos naudos. Reikia ieškoti papildomų sprendimų, vienas jų – keisti [19] autorių siūlomą pusiau sferinį silicio lęšį į kompaktiškesnius difrakcinius komponentus.

4.3 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo vertinami „peteliškės“ formos InGaAs jutiklio taikymai tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemose atliekant atspindžio ir pralaidumo THz vaizdų užrašymą. Heterodininės detekcijos schemoje pasiekta 230 fW/Hz triukšmo ekvivalenčios galios vertė, kai minimali jutiklio registruojama galia 11 μ W, dėl triukšmų įtakos sumažinimo leido padidinti sistemos dinaminį diapazoną 43 dB. Vaizdinimo sistemoje panaudojus sukurtų InGaAs „peteliškės“ tipo jutiklių matricas su integruotais mažatriukšmiais stiprintuvais pavyko sutrumpinti THz vaizdų užrašymo trukmę iki 32 kartų lyginant su vieno jutiklio sistema. Gretimų jutiklių sąveika matricoje nepasireiškė dėl pakankamo 400 μ m atstumo tarp gretimų jutiklių, mažų antenos matmenų ir optimalios signalinių takelių topologijos plokštėje.

Skyriuje aprašyti InGaAs „peteliškės“ tipo jutiklių taikymo vaizdinimo sistemose tyrimų rezultatai leidžia suformuoti *trečiąjį ir ketvirtąjį ginamuosius teiginius*.

Sukurtus „peteliškės“ formos InGaAs jutiklius naudojant THz vaizdų įrašymui heterodininės detekcijos metodu, dėl triukšmų įtakos sumažinimo galima pasiekti virš 40 dB platesnį dinaminį diapazoną, lyginant su tiesioginės detekcijos sistema.

InGaAs „peteliškės“ formos jutiklių matrica gali būti naudojama lygiagrečiam THz vaizdų eilučių nuskaitymui, nes gretimi jutikliai turi mažai įtakos jutiklio signalui, jei periodas tarp jų siekia bent 135 μm , o spinduliuotės dažnis yra virš 0.5 THz.

5 DIFRAKČINIAI ELEMENTAI IR JŲ TAIKYMAS VAIZDINIMO SCHEMOSE

Šiame skyriuje bus aptarti teraherciniai difrakciniai elementai, jų kombinacijos su rezonansiniais filtrais ir šių elementų integracijos į THz jutiklių matricas perspektyvos.

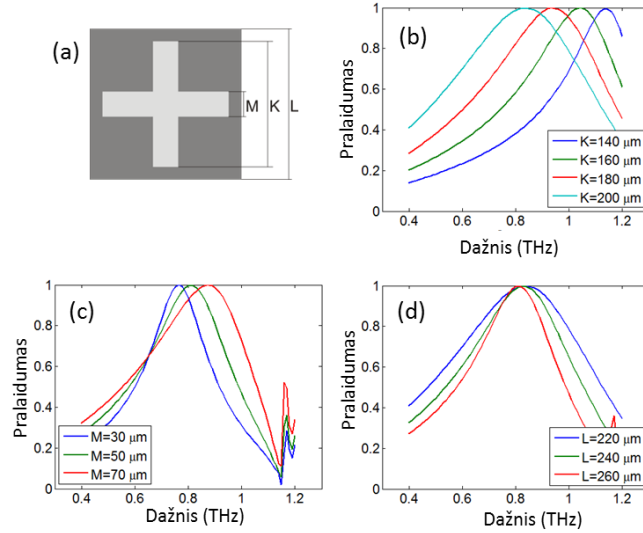
5.1 Zoninės plokštelės

Pirmiesiems eksperimentiniams difrakcinės optikos tyrimams FDTD metodu buvo suskaičiuoti ir sukurti keli zoninių plokštelių dizainai [IP 4]. Pirmasis tipas – standartinė zoninė plokštelė (SZP) su atviromis Frenelio zonomis, antrasis tipas – lazerinės abliacijos metodu išpjaustyti rezonansiniai filurai tose vietose, kur SZP buvo atviri žiedai, toliau bus vadinama kombinuota zoninė plokštelė (KZP).

Pirmieji bandomieji difrakcinės optikos elementai buvo skaičiuoti 0.76 THz spinduliuotės dažniui, kuris atitinka vieną iš stipriausių turimo optiškai kaupinimo molekulinio THz lazerio FIRL-100 (Edinburgh Instruments Ltd) linijų. Židinio nuotolis parinktas taip, kad į zoninių plokštelių atviras sritis tilptų kryžiuko formos filurai ir, kad bent keturios zonos aprėptų nefokusuotos spindulio diametrą. Tokio tipo filtro praleidžiamos bangos ilgis λ_r aprašomas formule [97]:

$$\lambda_r = 1.8K - 1.35M + 0.2L, \quad (5.1)$$

kur K – kryžiuko ilgis, M – kryžiuko plotis, L – kryžiukų periodas (68 a pav.).



68 pav. THz rezonansinio filtro elementas (a), kurį sudaro du sukryžiuoti stačiakampiai. Jų matmenys: plotis M , ilgis K , periodas L . THz filtrų skaitmeniškai suskaičiuoti pralaidumo spektrai esant skirtingiems matmenims pateikti b, c, d paveiksluose.

Iš 68 b pav. matome, kad didinant kryžiuko ilgį K mažinamas rezonansinis dažnis. Didinant kryžiuko plotį M plečiamas praleidžiamų dažnių ruožas ir šiek tiek didinamas rezonansinis dažnis. O didinant kryžiukų periodą L siaurinamas praleidžiamų dažnių ruožas. Reikia pastebėti ir tai, kad kryžiuką pasukus 90 laipsnių kampu, gausime tą patį rezultatą. Dažnių filtravimas nepriklauso nuo poliarizacijos dėl simetrinės filtro struktūros.

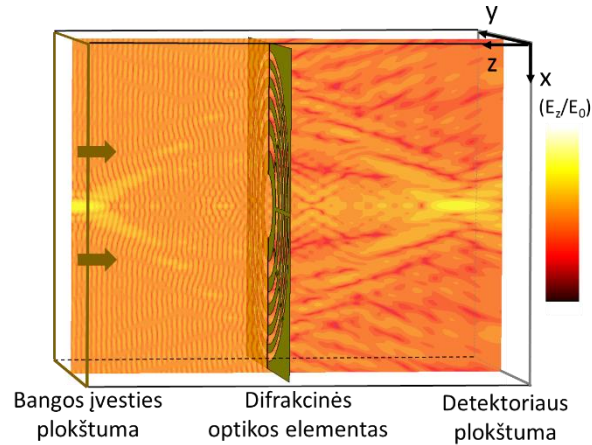
Rezonansinių THz filtrų matmenys buvo parinkti atlikus skaitmeninius skaičiavimus taip, kad jų matmenys tiktų į atvirų zonų sritis. Kryžiukai KZP buvo pjaustomi tik tuo atveju, jei jų centras patenka į SZP atviros zonos sritį. Zoninės plokštelės zonos spindulio lygtis:

$$r_n = \sqrt{n\lambda f + \frac{n^2 \lambda^2}{4}}, \quad (5.2)$$

kur n – sveikas zonų skaičius, λ – bangos ilgis, f – židinio nuotolis. Matome, kad zoninės plokštelės matmenys priklauso nuo židinio nuotolio, fokusuojamos spinduliuotės bangos ilgio bei zonų skaičiaus.

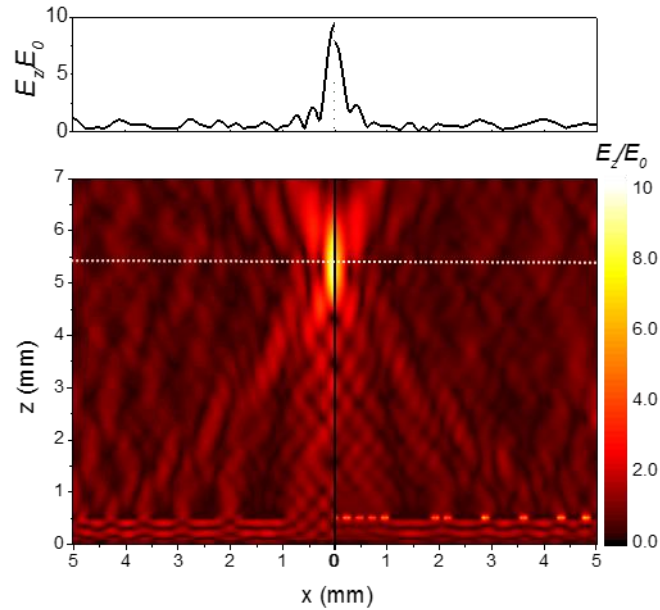
Tikėtinas fokusuotos spinduliuotės su sukurtais difrakciniais elementais elektrinių laukų stiprio pasiskirstymas erdvėje buvo suskaičiuotas naudojantis skyriuje 1.5 aprašyta modeliavimo metodika. Šiuo atveju buvo modeliuojama

$5 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$ erdvės sritis su $10 \text{ }\mu\text{m}$ skiriamąja geba. Modeliuotos struktūros iliustracija yra pateikta 69 pav. Joje pavaizduota plokščios bangos įvesties plokštuma, 5 zonų standartinės plokštelės pozicija erdvėje ir tipinis elektrinių laukų stiprio pasiskirstymas erdvėje prieš ir už fokusuojančio elemento.



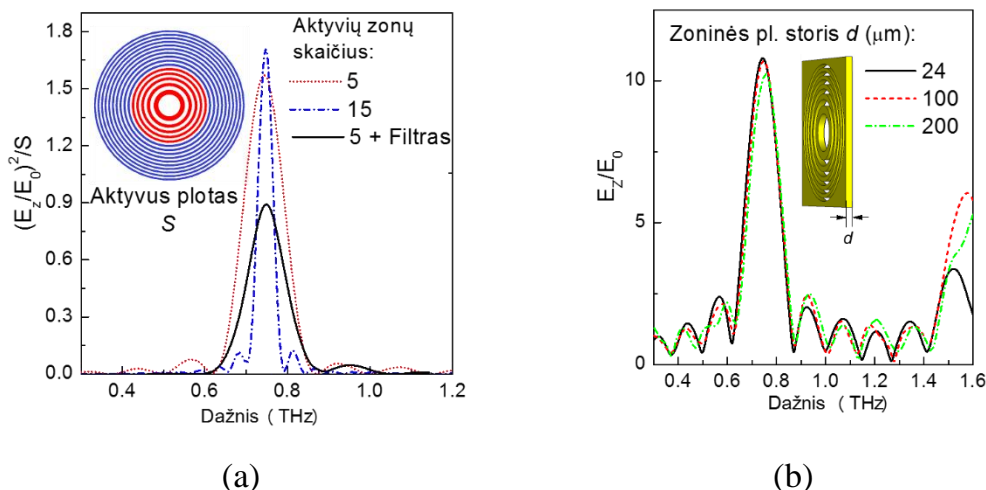
69 pav. Modeliavimo metodikos iliustracija su elektrinių laukų E_z/E_0 santykio pasiskirstymu xz plokštumoje prieš ir už difrakcinės optikos. [IP 2]

Modeliavimo rezultatai, palyginantys SZP ir KZP fokusuotos spinduliuotės elektrinių laukų amplitudžių pjūvius xz plokštumoje, pateikti 70 pav. Modeliavimai rodo, kad standartinė zoninė plokštelė geba daugiau nei eile padidinti fokusuotos spinduliuotės elektrinio lauko amplitudę židinio plokštumoje lyginant su plokščios bangos E_0 amplitude prieš zoninę plokštelę. Spinduliuotės, fokusuotos su kombinuota zoninė plokštele, amplitudė padidėja apie 8 kartus.



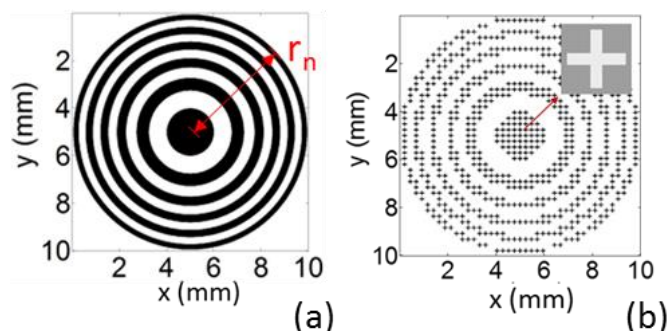
70 pav. Elektrinių laukų E_z/E_0 santykio pasiskirstymas erdvėje. Pjūvis židinio plokštumoje x kryptimi kai $z=5.4$ mm (viršuje). Žalia brūkšninė linija skiria ribą tarp SZP ir KZP. 0.76 THz dažnio elektrinių laukų amplitudės pasiskirstymas už SZP (apačioje kairėje) ir už KZP (apačioje dešinėje). Elektrinių laukų amplitudės yra normuotos į krintančios plokščios bangos amplitudę E_0 . SZP ir KZP pozicija $z=0.5$ mm plokštumoje, o jų centras ties $x=0$ mm. Balta brūkšninė linija žymi viršutinio grafiko pjūvio poziciją. [IP 4]

Norint parinkti tinkamas komponentų savybes ir palankias gamybos sąlygas (plonesnę foliją lengviau apdirbti, storesnė – tvirtesnis fokusuojantis elementas) buvo modeliuojama zoninėje plokštelėje esančių zonų skaičiaus bei metalinės folijos storio įtaka fokusuotos spinduliuotės amplitudei. Rezultatai pavaizduoti 71 pav. Matome, kad didėjant zonų skaičiui židinio taške siaurėja fokusuojamas dažnių ruožas, tuo tarpu, amplitudė mažai kinta (71 a pav.). Svarbu paminėti ir tai, kad zoninių plokštelių metalinės folijos storis neturi ženklios įtakos E_z/E_0 iki 1.4 THz (71 b pav.).



71 pav. Elektrinių laukų amplitudžių $(E_z/E_0)^2$ santykio židinio taške, normuoto į zoninės plokštelės plotą ($S_5=74.2 \text{ mm}^2$, $S_{15}=296.1 \text{ mm}^2$), priklausomybė nuo dažnio (a), Elektrinių laukų santykio židinio taške priklausomybė nuo dažnio esant skirtingiems SZP folijos storiams (b). [IP 2]

Įvertinus šiuos modeliavimus buvo sukurti pirmieji difrakcinės optikos dizainai (72 a, b pav.).



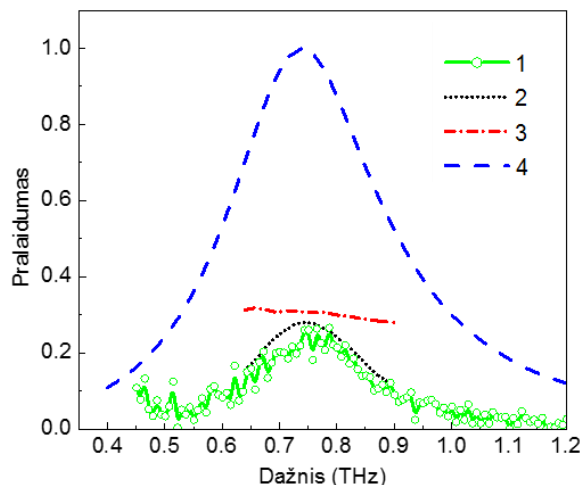
72 pav. Difrakcinės optikos elementų dizainai. Standartinės zoninės pl. dizainas (a) Kombinuotos zoninės pl. dizainas (b). Juoda spalva atitinka atviras sritis. [IP 4]

Pirmosios standartinės zoninės plokštelės buvo gamintos naudojant litografijos technologiją ant $30 \mu\text{m}$ storio vario sluoksniu padengtos stiklo tekstolito plokštelės. Varis išdintas FeCl_3 tirpale, paskui pašalinamas stiklo tekstolito padėklas. KZP gamybai buvo panaudota lazerinės abliacijos sistema (LAS). Kryžiukai buvo išpjaustyti $30 \mu\text{m}$ storio plieno folijoje naudojant parametrus, kurie plačiau aprašyti [54] straipsnyje.

Norint ištirti kombinuotos zoninės plokštelės selektyvumą dažniui buvo išmatuotas pralaidumo spektras naudojant modifikuotą vakuuminį Furjė

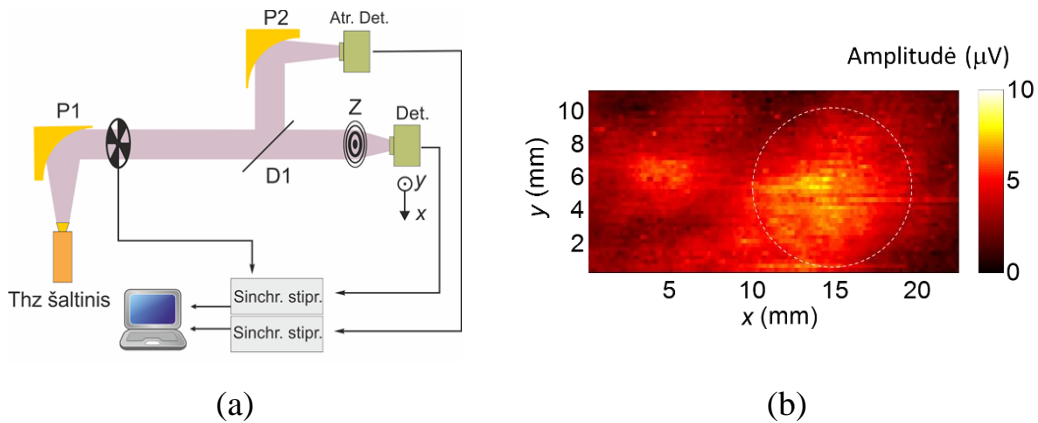
spektrometrą. Jame naudojamų veidrodžių židinio nuotolis gerokai didesnis nei tiriamų zoninių plokštelių, todėl jų pralaidumas buvo matuojamas kaip nefokusuojančių elementų. Eksperimentiniai ir teoriškai suskaičiuoti pralaidumo spektro rezultatai pateikti 73 pav. Kreivė 4 atitinka teoriškai suskaičiuotų filtrų masyvo pralaidumo spektrą kai kryžiukų matmenys ir periodas: $L=240 \mu\text{m}$, $K=200 \mu\text{m}$, $M=40 \mu\text{m}$. Kreivė 3 vaizduoja standartinės 5 zonų plokštelės pralaidumo spektrą. Matome, kad suskaičiuotas vidutinis zoninės plokštelės pralaidumas siekia apie 30 %. Iš išmatuotų spektrų matome, kad į zoninę plokštelę integravus rezonansinius filtrus, pralaidumo spektras (kreivė 1) lyginant su SZP turi aiškia smailę ties filtrų rezonansiniu dažniu $f=0.76 \text{ THz}$. Šį efektą gerai patvirtina ir suskaičiuota KZP pralaidumo spektro kreivė, pažymėta 2. Reiktų paminėti keletą veiksnių, turinčių įtakos išmatuotam pralaidumo spektrui:

- sumažėjęs spinduliuotės surinkimas Furjė spektrometre dėl papildomo zoninių plokštelių spinduliuotės fokusavimo efekto, todėl ne visas praėjęs signalas surenkamas Golajaus celėje.
- Tik dalis zoninės plokštelės yra apšviečiama, nes spektrometro optika jau fokusuoja spindulį, nukreiptą į bandinį (šiuo atveju zoninę plokštelę).



73 pav. Išmatuotas (pažymėtas kaip 1) ir suskaičiuotas (pažymėtas kaip 2) kombinuotos zoninės plokštelės pralaidumo spektras. Suskaičiuotas standartinės zoninės plokštelės pralaidumo spektras pažymėtas kaip 3. Filtrų masyvo suskaičiuotas pralaidumo spektras pažymėtas 4. Filtro matmenys ir periodas: $L=240 \mu\text{m}$, $K=200 \mu\text{m}$, $M=40 \mu\text{m}$. [IP 2]

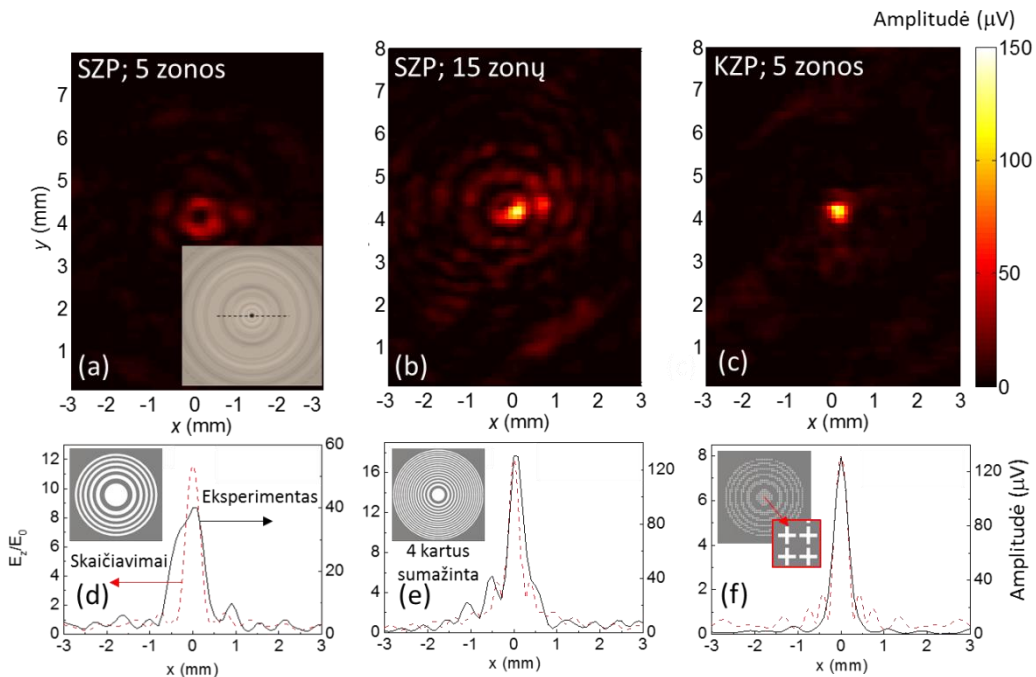
Kadangi šių faktorių įtaką teisingai įvertinti gana sunku, buvo atlikti papildomi vaizdinimo eksperimentai ties 0.76 THz rezonansiniu dažniu. Optiškai kaupinamo THz lazerio 0.76 THz spinduliuotės nefokusuotas ir fokusuotas pluoštas buvo matuojamas atliekant THz vaizdinimą. Eksperimento schema pavaizduota 74 a pav. Spinduliuotė buvo optiškai moduluojama 512 Hz dažniu. Daliklis D1 spinduliuotę padalino į dvi dalis santykiu 10:1. 10 % spinduliuotės galios su paraboliniu veidrodžiu P2 buvo nukreipta į atraminį piroelektrinį detektorių. Likusi spinduliuotės dalis, praėjusi pro zoninę plokštelę, buvo registruojama mažo antenos efektyvaus ploto (0.2 mm×0.2 mm) CMOS technologijos lauko tranzistoriumi [NP 10]. Nefokusuotos spinduliuotės profilis yra pavaizduotas 74 b pav. Matome, kad pluoštas yra išplitęs, susideda iš dviejų modų, o diametras siekia 10 mm. Stebimas netolygus signalo intensyvumo pasiskirstymas y ašyje dėl lazerio galios kitimo matavimo metu ir 2.5 karto mažesnės rezoliucijos nei x ašyje. Verta paminėti, kad naudojant tinkamą optiką net ir kelios lazerio generuojamos modos netrukdo gauti geros kokybės vaizdus [98].



74 pav. Spinduliuotės pluošto profilio matavimo schema (a), kur Det. – mažo ploto detektorius, Atr. Det. – atraminis piroelektrinis detektorius, P1, P2 – parabolinis veidrodys, D1 – spindulio daliklis, Z – difrakcinės optikos bandinys. Nefokusuotos 0.76 THz dažnio spinduliuotės profilis (b). Vaizdo taško dydis: $100 \times 250 \mu\text{m}^2$. Balta taškinė linija žymi 5 zonų plokštelės dydį. [IP 2]

Spindulio profilio vaizdinimo rezultatai fokusuojant su skirtingomis zoninėmis plokštelėmis yra pateikti 75 pav. Fokusuoto ir nefokusuoto pluošto amplitudė išauga iki 19 kartų. Matome, kad amplitudės svyravimas tolyn nuo

centrinio maksimumo yra mažesnis KZP atveju. Fokusuoto spindulio diametras yra palyginamas su 15 zonų standartine zonine plokštele fokusuoto spindulio diametru, tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad jos plotas $S_{15}/S_5=4$ yra keturis kartus didesnis. Spinduliuotės fokusavimą riboja tik difrakcijos apribota sritis, panašiai kaip ir paraboliniam veidrodžiui su aukšta skaitine apertūra, plačiau aprašyta [98]. Pluoštas, fokusuotas su KZP, yra to paties diametro kaip ir 15 zonų SZP atveju. Tačiau, elektrinių laukų santykis 75 f pav. matome yra tik du kartus mažesnis, o tuo tarpu šių elementų plotas skiriasi net 4 kartus.

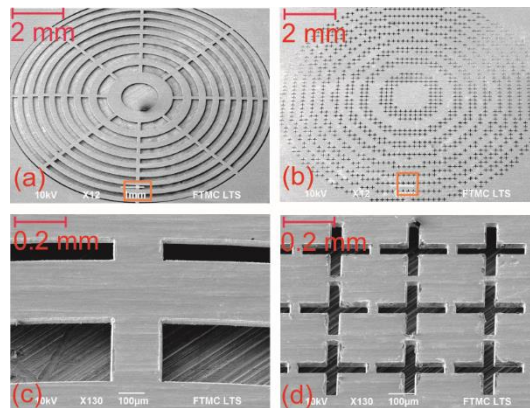


75 pav. Viršuje: 0.76 THz lazerio pluoštas židinio plokštumoje fokusuojant su SZP (a, b) ir KZP (c). Teoriškai suskaičiuotas plokščios bangos pluoštas židinio plokštumoje pateiktas (a) intarpe, kur brūkšninė linija žymi pjūvio vietą. Taško dydis: $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Apačioje: suskaičiuoti ir išmatuoti fokusuoto su SZP (d, e) ir KZP (f) pluošto pjūviai židinyje. Intarpuose pavaizduoti zoninių plokštelių dizainai. 15 zonų zoninė plokštelė sumažinta keturis kartus lyginant su 5 zonų plokštele. [IP 2]

Šie tyrimai parodė, kad kombinuota zoninė plokštelė efektyviau koncentruoja spinduliuotės pluoštą lyginant su SZP dizainais, pagamintais naudojant litografijos technologiją.

5.1.1 Zoninių plokštelių charakterizavimas

Norint giliau panagrinėti zoninių plokštelių fokusavimo galimybes ir jas tarpusavyje palyginti, buvo papildomai pagamintos 4-ių dizainų zoninės plokštelės naudojant tą pačią LAS technologiją ir medžiagas. Visų dizainų išorinis zonų diametras buvo 16.5 mm. Jis palyginamas su nefokusuoto Gausinio pluošto, emituojamo iš VDI šaltinio, diametru. Fokusuoto spindulio sąsmaukos pločio skirtingo nuotolio židinyje tyrimams buvo pagamintos 10 mm ir 5 mm židinio nuotolio zoninės plokštelės. Taip pat pagamintos ir šių plokštelių invertuotos versijos. Svarbu paminėti, kad neinvertuotos zoninės plokštelės yra patogesnės eksperimentiniams tyrimams dėl atviros centrinės zonos. Idėja su kombinuotų zonų plokštelių dizainais (filtrų rezonansinis dažnis 600 GHz) taip pat buvo pakartota tais pačiais variantais. Pagamintų 5 mm židinio nuotolio difrakcinių elementų SEM nuotraukos pateiktos 76 pav., o visų zoninių plokštelių suvestinė su pagrindiniais geometriniais parametrais yra pateikta 6 lentelėje. Joje pažymėtas bandinių židinio nuotolis, metalinių zonų žiedų skaičius, išorinio žiedo diametras r_n , atvirų zonos sričių plotas $S_{atviras}$ ir KZP apertūrų matmenys L , K , M .

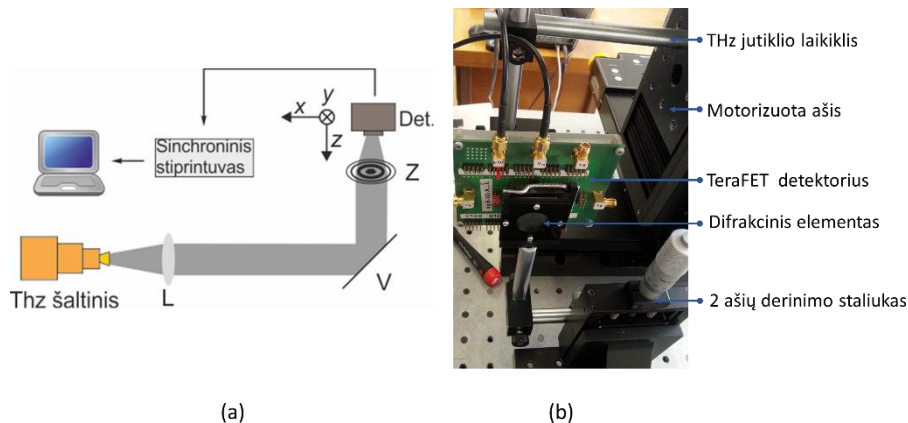


76 pav. Difraktinių komponentų SEM nuotraukos. Standartinės SZP (a) ir kombinuotos KZP (b) zoninės plokštelės, pagamintos lazerinės abliacijos metodu ant metalo folijos nuotraukos, išdidintos SZP (c) ir KZP (d) sritys pažymėtos oranžiniu stačiakampiu. [P 1]

6 lentelė. Pagrindiniai difrakcinių elementų parametrai. $S_{atviras}$ – atvirų zoninės plokštelės sričių plotas, r_n – išorinio (kur n – sveikas skaičius) žiedo spindulys.

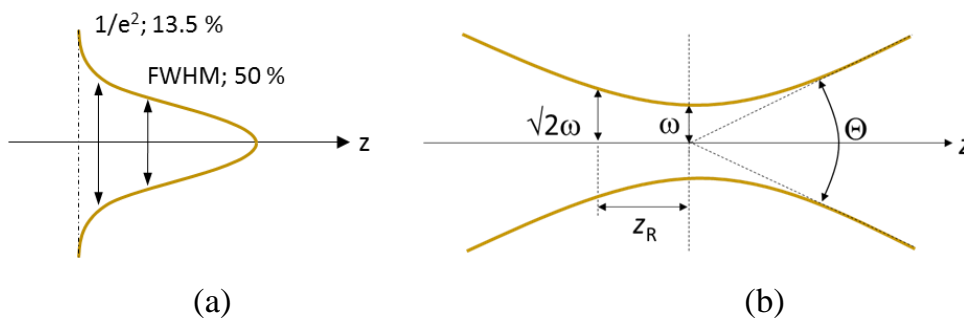
Židinio nuot.	Bandinio tipas	Zonų skaičius	Zonų spindulys r_n	$S_{atviras}$	Filtro matmenys periodas L , ilgis K , plotis M
(mm)			(mm)	(mm ²)	($\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
10	SZP	5	8.06	96.44	–
10	SZP invertuota	6	8.47	102.07	–
10	KZP	5	8.06	21.83	300x260x30
10	KZP invertuota	6	8.47	23.83	300x260x30
5	SZP	9	8.26	97.90	–
5	SZP invertuota	9	8.26	99.71	–
5	KZP	9	8.26	21.68	300x260x30
5	KZP invertuota	9	8.26	23.98	300x260x30
10	Fazinė zoninė pl.	5	8.06	102.07	–

Šių zoninių plokštelių fokusavimo savybės buvo palygintos atlikus pro zoninę plokštelę praėjusios spinduliuotės vaizdinimą. Eksperimento schema ir nuotrauka pateikta 77 pav. Naudojamas VDI šaltinis, spinduliuojantis 580 GHz – 620 GHz dažnio spinduliuotę, kuri moduluojama 2 kHz dažniu. Ši spinduliuotė kolimuojama su 12 cm židinio nuotolio ir 5 cm diametro teflono lęšiu L . Toliau su 5 cm diametro veidrodžiu V spinduliuotė yra pakreipiama 90° kampu, taip išskiriant tik centrinę spindulio dalį, į tiriamąją zoninę plokštelę. Už jos esantis mažo efektyvaus ploto CMOS FET detektorius – TeraFET [NP 10] motorizuotomis ašimis judinamas xy kryptimis zoninės plokštelės židinio plokštumoje ir xz kryptimis spinduliuotės skėsties įvertinimui. Norint patenkinti tolumo lauko sąlygą, atstumas tarp VDI šaltinio ir zoninės plokštelės buvo apie 1 metrą. 77 b pav. nuotraukoje pateiktas tiriamos zoninės plokštelės, kurios pozicija atžvilgiu kolimuoto Gausinio pluošto paderinama xy kryptimis, TeraFET detektoriaus su laikikliu ir motorizuotos ašies vaizdas.



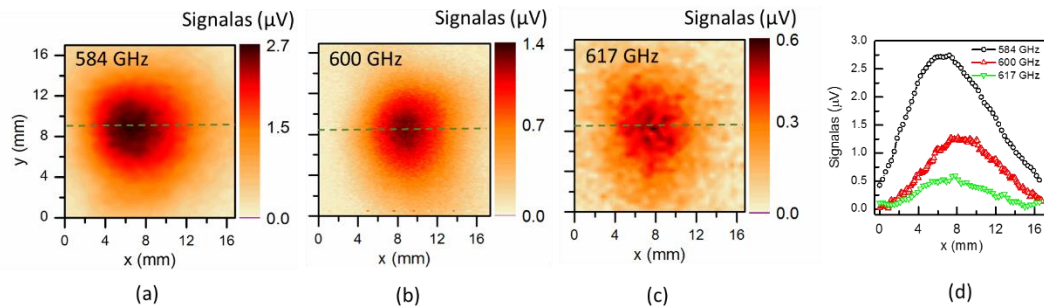
77 pav. Spindulio pluošto matavimo schema (a). Ją sudaro „Virginia Diodes“ (VDI) daugintuvų grandinė; 12 cm židinio nuotolio Teflono lęšis L; V – dviejų colių diametro veidrodis; Z – zoninės plokštelės bandinys; Det – detektorius. Stendo nuotrauka su pažymėtais komponentais (b).

Gausinis pluoštas yra aprašomas pluošto parametrais (78 pav.). Spindulio pluošto diametras (pluošto plotis) gali būti aprašomas kelias būdais. Pirmasis – diametras, kur spindulio intensyvumas sumažėja $1/e^2$ kartų (13.5 procentų) nuo amplitudės maksimalios vertės, kitas būdas – kai spindulio diametras vertinamas vietoje, kur jo intensyvumas sumažėja du kartus lyginant su maksimalia amplitudės vertės (78 a pav.). Spindulio pluošto sąsmauka ω – joje pluošto plotis įgyja mažiausią vertę. Relėjaus ilgis z_R – atstumas nuo sąsmaukos iki srities, kur pluošto spindulys padvigubėja, dar vadinamas difrakciniu ilgiu. Bendras erdvinis kampas Θ – nusako Gausinio pluošto skėstį toli nuo sąsmaukos (78 b pav.).



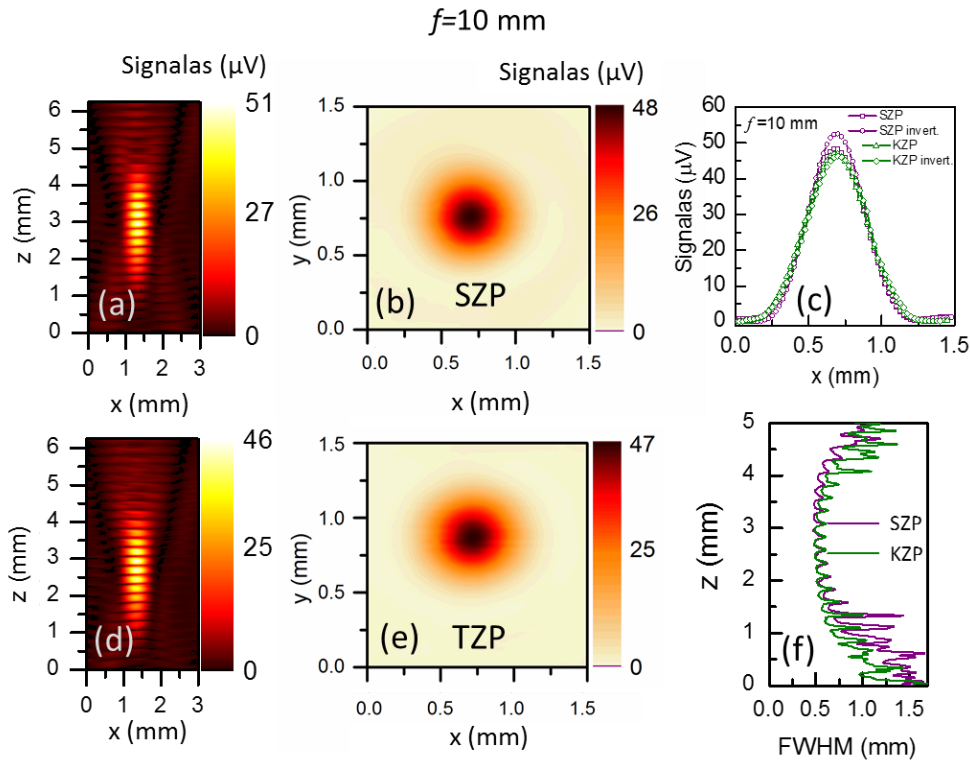
78 pav. Gauso pluošto amplitudės pasiskirstymas spindulio sklaidimo kryptimi (a). Gauso pluošto parametrai (b), kur ω – spindulio sąsmauka; z_R – Relėjaus ilgis; Θ – bendras erdvinis kampas; z – spindulio sklaidimo kryptis.

Kolimuoto Gausinio pluošto vaizdas ties 584 GHz; 600 GHz ir 617 GHz dažniais yra pateiktas 79 pav. Išmatuotas pluošto plotis ties pusės maksimalios amplitudės verte siekia 10.5 mm, 9.5 mm, 7.8 mm.



79 pav. VDI šaltinio skirtingų dažnių nefokusuotos spinduliuotės profiliai (a-c). Brūkšninės linijos žymi profilių pjūvių vietas. Profilių pjūviai (b).

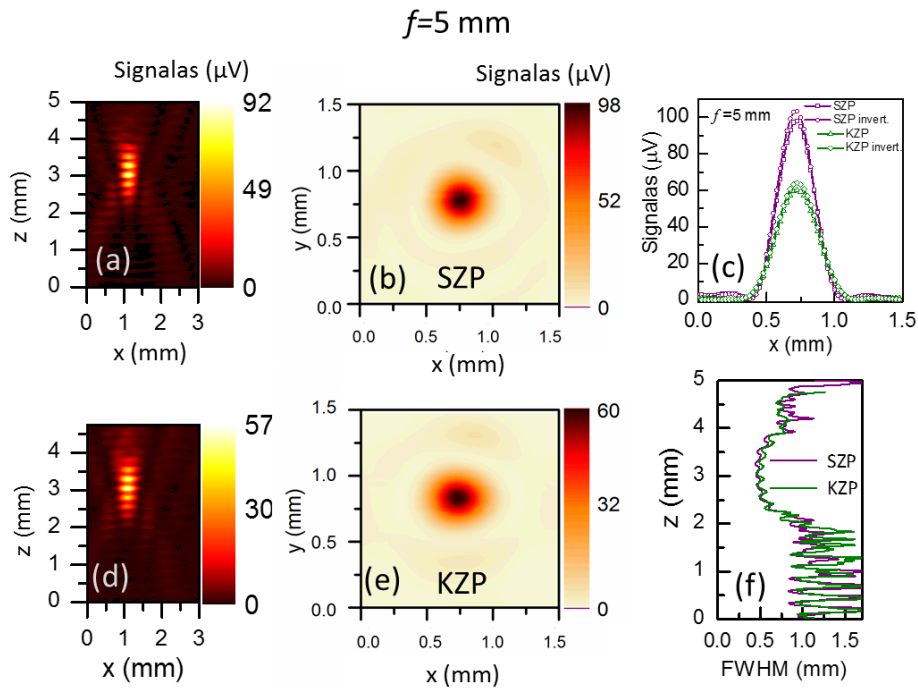
600 GHz spinduliuotė buvo fokusuojama su skirtingo židinio nuotolio ir dizaino zoninėmis plokštelėmis, kurių parametrai pateikti lentelėje 6. Gausinio pluošto skėsties pasiskirstymas xz plokštumoje išilgai spindulio sklidimo kryptčiai fokusuojant su $f=10$ mm ir $f=5$ mm židinio nuotolio SZP ir KZP pateikti 80 a, d pav. ir 81 a, d pav. Spinduliuotės pluošto pasiskirstymas xy kryptimis židinio plokštumose fokusuojant su $f=10$ mm ir $f=5$ mm židinio nuotolio SZP ir KZP pateikti 80 b, e pav. ir 81 b, e pav. Spinduliuotės profilio židinyje pjūviai x kryptimi fokusuojant su $f=10$ mm, $f=5$ mm židinio nuotolio difrakciniais elementais yra palyginami 80 c pav. ir 81 c pav. Fokusuotos spinduliuotės sąsmaukos pločio ties pusės maksimalios amplitudės verte pasiskirstymas išilgai bangos sklidimo kryptimi fokusuojant su $f=10$ mm, $f=5$ mm židinio nuotolio difrakciniais elementais palyginami 80 f pav. ir 81 f pav.



80 pav. 600 GHz spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymas fokusuojant su 10 cm židinio nuotolio SZP (a) ir KZP (d) išilgai bangos sklidimo kryptimi plokštumoje xz . Fokusuotos spinduliuotės profilis židinyje xy plokštumoje (b, e). Spinduliuotės profilio židinyje fokusuoto su skirtingais zoninės plokštelės dizainais pjūviai x kryptimi (c). Fokusuotos spinduliuotės sąsmaukos pločio pusės maksimalios amplitudės aukštyje pasiskirstymas išilgai bangos sklidimo kryptimi (f). [P 1]

Iš pateiktų palyginimų galima išžvelgti keletą ypatumų: Gausinio pluošto Relėjaus ilgis $f=5$ mm židinio nuotolio difrakciniams elementams yra kelis kartus trumpesnis, o sąsmaukos diametras pusės maksimalios amplitudės aukštyje yra 0.33 mm SZP atveju, o KZP atveju siekia 0.4 mm. Tuo tarpu $f=10$ mm židinio nuotolio SZP ir KZP siekia 0.45 mm. Šie skaičiai yra palyginami su krintančios spinduliuotės bangos ilgiu (0.5 mm). Ilgesnio židinio nuotolio difrakcinių elementų fokusavimo savybės visais atvejais mažai skiriasi. Iš to galima daryti išvadą, kad integruoti rezonansiniai filtrai KZP zoninės plokštelės atveju fokusavimo savybių nekeičia. Tačiau, nagrinėjant trumpesnio židinio nuotolio SZP ir KZP yra stebimas fokusuotos spinduliuotės amplitudės sumažėjimas. Tai lemia panašūs ir kryžiuokų matmenys. Kryžiuokų išdėstymas, sudarantis išorines zonas, gerokai skiriasi nuo apskritimo. Lyginant fokusuotos

spinduliuotės su skirtingo židinio nuotolio plokštelėmis amplitudę galima pastebėti, kad apie 40 % didesnė amplitudė gaunama su trumpesnio židinio nuotolio SZP. Su invertuotomis zoninėmis plokštelėmis fokusuotos spinduliuotės amplitudė yra iki 8 % didesnė lyginant su neinvertuotais dizainais. Visais atvejais su KZP dizaino zoninėmis plokštelėmis fokusuotos spinduliuotės antrinės difrakcinės smailės buvo šiek tiek mažesnės nei SZP atveju.



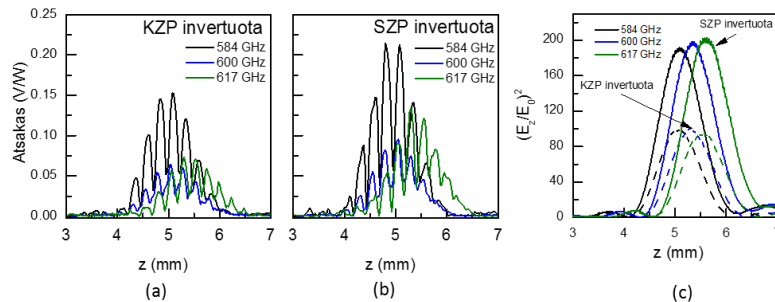
81 pav. 600 GHz spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymas fokusuojant su 5 cm židinio nuotolio SZP (a) ir KZP (d) išilgai bangos sklidimo kryptimi plokštumoje xz . Fokusuotos spinduliuotės profilis židinyje xy plokštumoje (b, e). Spinduliuotės profilio židinyje fokusuoto su skirtingais zoninės plokštelės dizainais pjūviai x kryptimi (c). Fokusuotos spinduliuotės sąsmaukos pločio pusės maksimalios amplitudės aukštyje pasiskirstymas išilgai bangos sklidimo kryptimi (f). [P 1]

Šių zoninių plokštelių eksperimentiniai ir teorinių skaičiavimų fokusavimo savybių rezultatai yra apibendrinti lentelėje 7.

7 lentelė. Gausinio pluošto parametrų suvestinė fokusuojant su skirtingais difrakciniais elementais.

Židinio nuotolis	Bandinio tipas	$\left(\frac{E_f}{E_0}\right)$	Signalas U (μ V)	Skaičius FWHM	Matuotas FWHM	Spindulio sąsmauka	Relėjaus ilgis	Bendras erdvinis kampas	Skaitinė apertūra
(mm)			(μ V)	(mm)	(mm)	ω (mm)	z_R	Θ (rad)	NA
10	SZP	10.1	48	0.40	0.47	0.40	1.31	0.83	0.40
10	SZP invertuota	10.1	53	0.42	0.45	0.38	1.47	0.87	0.42
10	KZP	8.2	47	0.42	0.49	0.42	1.45	0.79	0.38
10	KZP invertuota	8.8	46	0.42	0.33	0.28	1.40	1.19	0.56
5	SZP	14.2	98	0.30	0.45	0.38	0.73	0.87	0.42
5	SZP invertuota	13.1	103	0.30	0.44	0.38	0.70	0.88	0.42
5	KZP	9.5	60	0.32	0.47	0.39	0.70	0.83	0.40
5	KZP invertuota	10.0	64	0.30	0.46	0.39	0.75	0.85	0.41

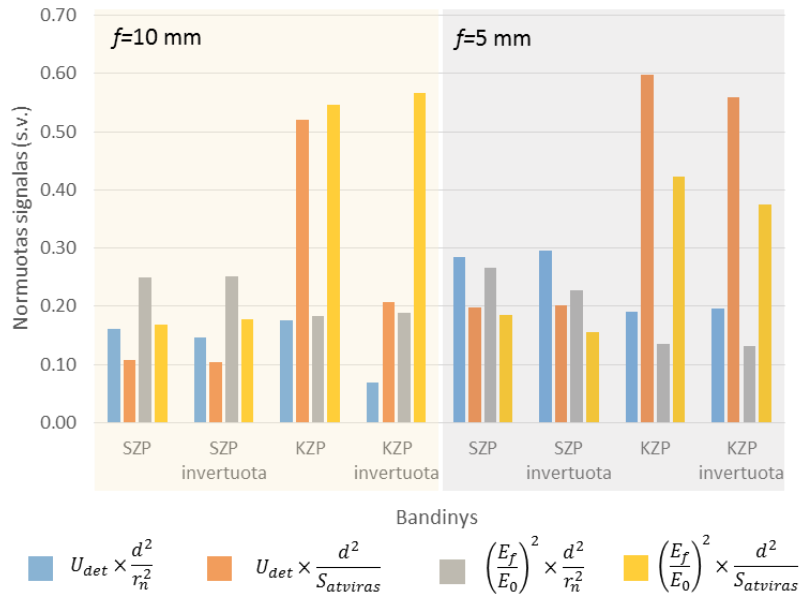
Skirtingo dažnio Gausinio pluošto pasiskirstymas išilgai optinės ašies už 5 mm židinio nuotolio standartinės zoninės plokštelės ir kombinuotos zoninės plokštelės yra pateiktas 82 a ir b pav. Iš šių grafikų matome, kad Gauso pluošto kolimavimo atstumas mažai priklauso nuo dažnio, daugiau keičiasi tik jo pozicija z kryptimi atžvilgiu zoninės plokštelės. Susidariusių stovinčių bangų interferencija matoma ties visais matuojamais dažniais. Ji susidaro dėl atspindžio nuo detektoriaus, kuris sumontuotas ant auksu padengto laikiklio, ir zonos. Atliekant modeliavimą nuėmus detektoriaus metalinę plokštumą šio efekto nepastebėta (82 c pav.). Modeliavimo rezultatuose taip pat matoma smailių pozicijos priklausomybė nuo dažnio.



82 pav. Eksperimentiškai išmatuotas skirtingo dažnio Gausinio pluošto pasiskirstymas išilgai optinės ašies už 5 mm židinio nuotolio standartinės zoninės plokštelės (a) ir kombinuotos zoninės plokštelės (b). Atsakas registruotas su TeraFET jutikliu ir normuotas į absoliučią galią ties 584 GHz, 600 GHz ir 617 GHz dažniais. Sumodeluotas elektrinių laukų pasiskirstymas išilgai optinės ašies esant skirtingiems dažniams (c).

Norint detaliau atvaizduoti ir palyginti ankščiau aprašytų zoninių plokštelių fokusavimo galimybes, 83 pav. buvo atidėta histograma. Joje pateikti eksperimentiniai rezultatai normuoti pagal registruojamo signalo amplitudę

padaugintą iš santykio tarp sąsmaukos pločio ir išorinio atviros zono spindulio (mėlyni stulpeliai) ir iš santykio tarp sąsmaukos pločio ir atvirų sričių ploto (oranžiniai stulpeliai). Modeliavimo rezultatai pateikiami elektrinių laukų santykio kvadratą dauginant iš santykio tarp sąsmaukos pločio ir išorinės zonos spindulio (pilki stulpeliai) ir santykio tarp sąsmaukos pločio su atvirų zonų sričių plotu (geltoni stulpeliai).



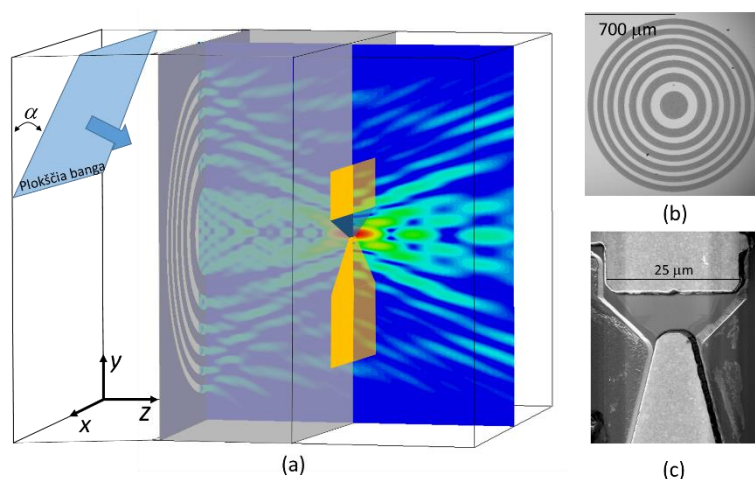
83 pav. Zoninių plokštelių teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimo histograma. U_{det} – židinyje eksperimentiškai registruojamo signalo amplitudė; d – sąsmaukos plotis pusės maksimalios amplitudės aukštyje (FWHM); r_n – išorinės atviros zonos spindulys; $S_{atviras}$ – lazeriu atvertas plotas plokštelėje.

Lyginant geltonus stulpelius galima daryti prielaidą, kad atsirandantis efektyvumo mažėjimas trumpesnio židinio nuotolio kombinuotoje zoninėje plokštelėje, yra sietinas su mažėjančiu kryžiukų bendru atviru plotu (kryžiukas zonoje nebetelpa, todėl sritis yra neatidarojama). Lyginant skirtingo židinio nuotolio SZP ir SZP invertuotą, matome, kad efektyviau šios plokštelės veikia esant trumpesniam židinio nuotoliui.

5.2 Integruotos zoninės plokštelės į detektorių

Siekiant dar labiau sumažinti vaizdinimo sistemos matmenis ir komponentų skaičių joje, buvo sugalvotas sprendimas zoninę plokštelę sujungti kartu su THz jutikliu. Taip būtų palengvinamas sistemos justiravimas ir tuo

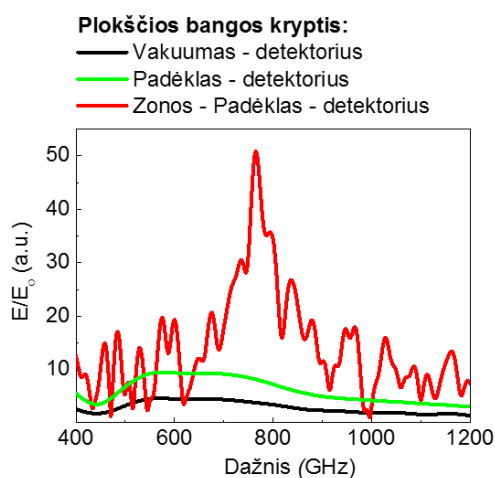
pačiu padidinama jutiklio atsako amplitudė. Zoninė plokštelė lazerinės abliacijos metodika buvo suformuota tiesiai ant detektoriaus puslaidininkinio padėklo paviršiaus, padengto 200 nm storio aukso sluoksniu. Jos centras parinktas taip, kad sutaptų su kitoje pusėje esančio jutiklio aktyviosios srities pozicija. Židinio nuotolis buvo parinktas pagal InP padėklo storį ir siekė 0.5 mm. Jutiklis ant kitos InP padėklo pusės buvo suformuotas jau ankščiau, o procedūra aprašyta 3.1.4 skyriuje. Struktūrinė jutiklio su fokusuojančiu elementu schema, tipinis elektrinių laukų pasiskirstymas padėkle ir skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) padarytos abiejų padėklo pusių nuotraukos yra pateiktos 84 pav. Kolimuota spinduliuotė praėjusi zoninę plokštelę ir 0.5 mm storio InP padėklą yra fokusuojama ties detektoriaus aktyviają sritimi.



84 pav. Integruoto jutiklio su zonine plokštele veikimo principo vaizdas (a). Pilkas stačiakampis žymi padėklą, kur vienoje pusėje išpjaustyta zoninė plokštelė, o kitoje pusėje detektorius. Zoninės plokštelės (b) ir detektoriaus aktyviosios srities (c) SEM nuotraukos. Šviesiai pilka spalva žymi metalizuotas sritis. [IP 1]

Tikėtinos fokusavimo savybės ir šių dviejų elementų sąveika buvo teoriškai suskaičiuota naudojantis FDTD metodiką. Apibrėžta modeliavimo sritis $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ xyz su $5 \mu\text{m}$ erdvine skyra. Šioje erdvėje buvo patalpintas detektorius ir zoninė plokštelė kitoje padėklo pusėje bei paleidžiama skirtingais α kritimo kampais z kryptimi plokščia banga. Skaičiavimo rezultatai, kuriuose pavaizduota elektrinių laukų santykio priklausomybė nuo dažnio ties jutiklio aktyviają sritimi, yra pateikti 85 pav. Paleidus plokščią bangą kryptimi vakuumas – detektorius (85 pav. juoda linija) stebimas 3 kartų E/E_0 laukų

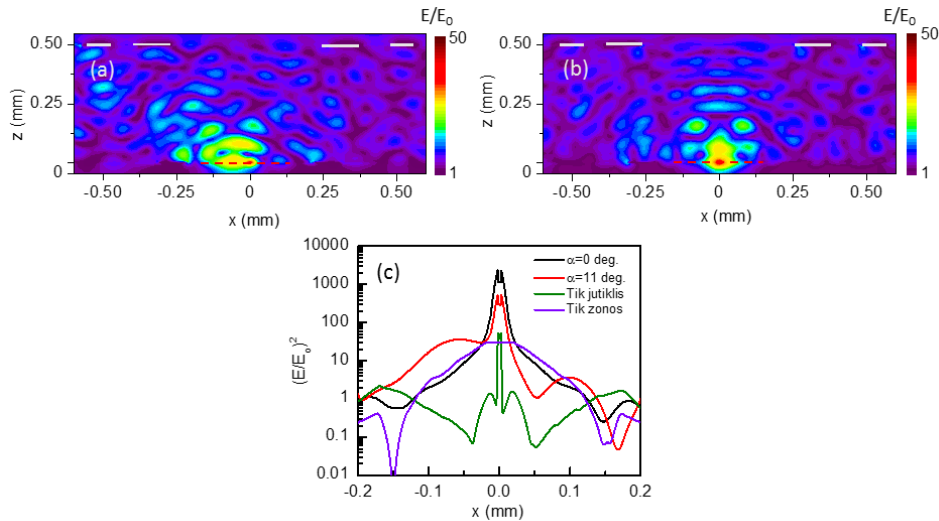
padidėjimas ties jutiklio anteninės dalies rezonansiniu dažniu. Paleidus bangą iš padėklo pusės kai nėra jokio fokusuojančio elemento, elektrinio lauko amplitudė dėl InP padėklo lūžio rodiklio ir jutiklio antenos išauga iki 10 kartų lyginant su krintančios bangos amplitudė. Integravus zoninę plokštelę į jutiklio padėklą ir paleidus plokščią bangą iš padėklo pusės, praėjusi spinduliuotė per zoninę plokštelę ir padėklą yra koncentruojama ties jutiklio aktyviaja sritimi, kur registruojamas elektrinių laukų santykio padidėjimas ties 0.76 THz siekia 50 kartų, o fokusuojamų dažnių juostos plotis – 42 GHz.



85 pav. Elektrinių laukų santykio priklausomybė nuo dažnio esant skirtingai bangos sklaidimo kryptčiai.

Elektrinių laukų pasiskirstymas integruotos zoninės plokštelės ir detektoriaus padėkle, pjūvyje ties jutiklio aktyvios srities centru esant kampui $\alpha=11^\circ$ ir $\alpha=0^\circ$ pateiktas 86 a ir b pav. Kampu $\alpha=11^\circ$ jau užtenka, kad išryškėtų du lokalūs E/E_0 maksimumai ties detektoriaus plokštuma. Vienas maksimumas pasislinkęs dėl zoninės plokštelės fokusavimo, kitas dėl jutiklio antenos. Esant $\alpha=0^\circ$ stebimas tik vienas lokalus maksimumas. Kadangi jutiklio atsakas yra proporcingas elektrinių laukų santykio kvadratui, tikėtinas jutiklio atsako padidėjimas yra pateiktas 86 c pav., kur lyginamas elektrinių laukų santykio pasiskirstymas ties jutiklio aktyviosios srities centru x kryptimi po 0.2 mm į abi puses. Matome, kad vien tik dėl zonos elektrinių laukų amplitudė padidėja 5 kartus (86 c violetinė linija), tiek pat amplitudę veikia ir jutiklio antena (86 c pav. žalia linija). Sujungus šiuos abu veiksnius matome, kad amplitudė išauga daugiau nei eile. 86 a ir b pav. pjūviai, pažymėti raudona brūkšnine linija

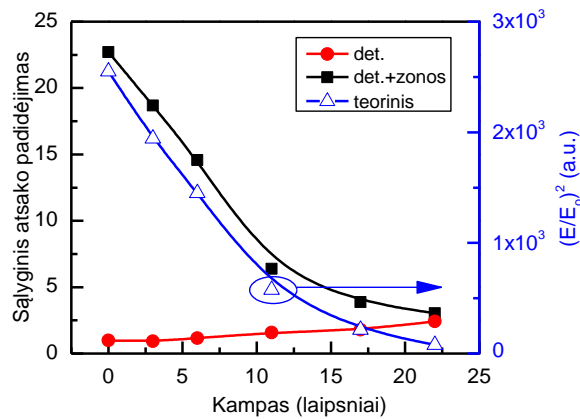
aiškesniam palyginimui atidėti 86 c pav. (juoda ir raudona linijos). Ties jutiklio aktyviaja sritimi išryškėja dvi smailės ties koordinate $x=0$ dėl antenos kampų. Svarbu paminėti, kad absoliučią vertę labai sunku vertinti, nes ji priklauso nuo zonos ir jutiklio pozicijos tikslumo bei nuo modeliavimo rezoliucijos.



86 pav. Elektrinių laukų santykio pasiskirstymas InP padėkle esant bangos kritimo kampui $\alpha=11^\circ$ (a) ir $\alpha=0^\circ$ (b). Grafiko pjūvio vietos pažymėtos raudona brūkšnine linija. Pilki stačiakampiai viršuje žymi zoninės plokštelės pirmąsias centrines zonas. $(E/E_0)^2$ pasiskirstymas pjūvyje ties jutiklio aktyviaja sritimi (c). [IP 1]

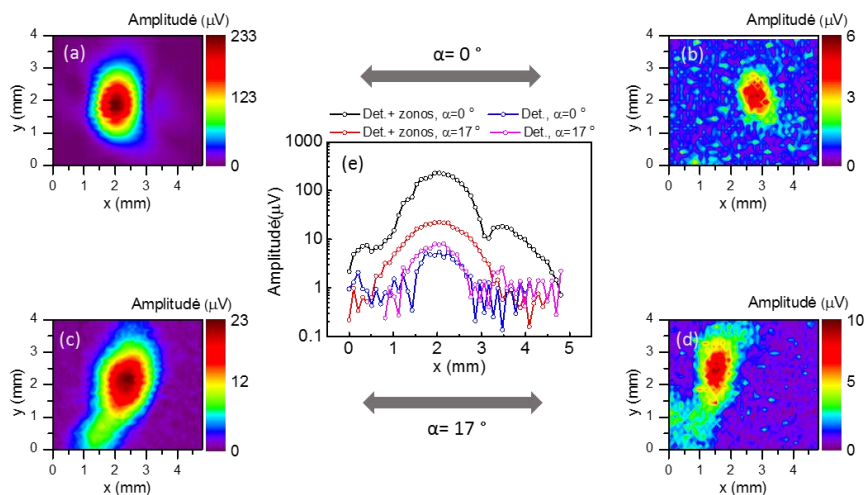
Norint eksperimentiškai patikrinti zoninės plokštelės įtaką registruojamo signalo amplitudei buvo atlikti matavimai su to paties dizaino jutikliais keičiant krintančios spinduliuotės kritimo kampą. Vienas iš jų buvo be fokusuojančio elemento. Matavimo eksperimentinė schema labai panašį į pateikta 74 a pav. Ji skiriasi tik tuo, kad atsirado trečias 10 cm židinio nuotolio parabolinis veidrodis P3, kuris fokusavo spinduliuotę į jutiklį su zonine plokštele ant padėklo. Moduliacijos dažnis 410 Hz, skenavimo žingsnis xy kryptimis 0.1 mm. Eksperimentiniai rezultatai ir jų palyginimas su teoriniais rezultatai pateikti 87 pav. Jutiklio registruojamas signalas yra sunormuotas į jutiklio signalą be zoninės plokštelės kai spinduliuotės kritimo kampas $\alpha=0^\circ$. Matome, kad jutiklis su zonine plokštele turi gana ryškią signalo priklausomybę nuo kritimo kampo, tai patvirtina ir teoriškai suskaičiuota mėlyna kreivė su tuščiais trikampiais. Iš šių rezultatų matome, kad sąlyginis signalo padidėjimas jutikliui su zonine plokštele padėkle gali siekti daugiau nei 20 kartų lyginant su jutikliu be zoninės

plokštelės. Esant daugiau nei $\alpha=17^\circ$ kampui zoninės plokštelės įtaka nestebima. Tai leidžia daryti išvadą, kad keičiant kritimo kampą zoninė plokštelė veikia prasčiau ir mažiau spinduliuotės yra koncentruojama detektoriaus aktyviojoje srityje. Šis efektas nepasireiškia detektoriaus be zoninės plokštelės atveju (raudona linija su apskritimais).



87 pav. Registruojamo signalo, sunormuoto pagal detektoriaus be zoninės plokštelės atsaką ties 0 laipsnių kampu, priklausomybė nuo bangos kritimo kampo. Raudona linija žymi detektoriaus atsaką be zoninės plokštelės, juoda linija – kombinuoto detektoriaus atsaką. Teoriškai suskaičiuotų elektrinių laukų amplitudžių santykio pasiskirstymas esant skirtingam bangos kritimo kampui pavaizduotas mėlyna spalva. [IP 1]

0.76 THz spinduliuotės profiliai esant skirtingam kritimo kampui $\alpha=0^\circ$ ir $\alpha=17^\circ$ registruoti su to paties dizaino jutikliais, iš kurių vienas su integruota zonine plokštele, yra pateikti 88 pav. Čia reikėtų paminėti keletą aspektų: fokusuotas spinduliuotės pluoštas panašus į Gausinį nepaisant to, kad nefokusuotą pluoštą sudaro kelios modos. Pakeitus spinduliuotės kritimo kampą α matomas pluošto išplitimas y kryptimi ir stipriai sumažėjusi zoninės plokštelės įtaka.



88 pav. 0.76 THz spinduliuotės pluošto vaizdai esant skirtingiems kritimo kampams. Pluoštai užregistruoti su jutikliu integravus zonas (a, c) ir su to paties dizaino jutikliu be zonų (b,d). Palyginami spindulio profilio pjūviai ties maksimalia amplitudės verte (e). Vaizdo taško dydis 0.1 mm ir 0.1 mm.

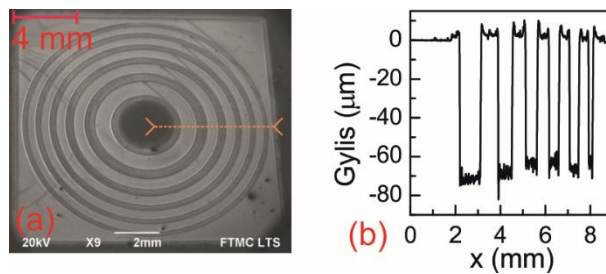
Aukščiau aprašyti eksperimentiniai ir teoriškai suskaičiuoti rezultatai patvirtina, kad zoninė plokštelė gali būti sėkmingai integruota į InGaAs peteliškės tipo detektorių lustus. Taip yra padidinama jų atsako amplitudė daugiau nei 20 kartų ir tuo pačiu metu sumažinamas vaizdinimo sistemos optinių komponentų skaičius ir jų justiravimo laipsniai. Šie tyrimų rezultatai „Electronics Letters“ redakcijai pasirodė nauji ir aktualūs todėl kartų su atspausdintu straipsniu [IP 1] „Electronics Letters“ žurnale buvo išspausdintas reikšmingų einamo mėnesio pasiekimų skiltyje atskiras redakcijos komentaras [P 5].

5.3 Fazinės zoninės plokštelės

Fokusuotos spinduliuotės intensyvumą galima dar labiau padidinti jei zonas praeinančios spinduliuotės fazė pakistų per pusę periodo. Tokiu atveju už zonos visų bangų fazės būtų vienodos ir amplitudė dėl bangų interferencijos padidėtų [99].

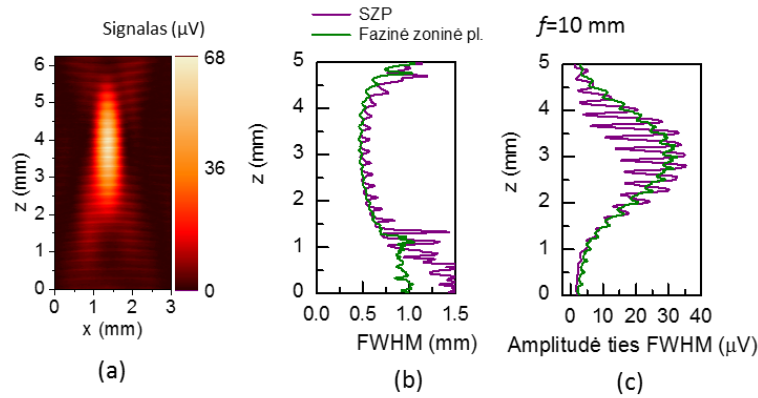
Šiems tyrimams buvo pagamintos fazinės zoninės plokštelės (FZP), kurių dizainas yra panašus į invertuotos standartinės zoninės plokštelės. Zonos suformuojamos pakeičiant uždengtas metalines sritis į skaidrius THz

spinduliuotei žiedus, kurių aukštis yra lygus praėjusios spinduliuotės fazės pokyčiui per 2π . Gamybai buvo naudojama lazerinės abliacijos metodika, kuri gerokai pranašesnė savo apdirbimo greičiu už litografijos ir aktyvaus jonų ėsdinimo technologiją [100]. Buvo pagaminta 10 mm židinio nuotolio fazinė zoninė plokštelė ant 500 μm storio aukštaomio silicio padėklo, kurios SEM nuotrauka pateikta 89 a pav. Zonų griovelių gylio profilis pavaizduotas 89 b pav. Suskaičiuota fazinės zoninės plokštelės geometrija ir griovelių plotis nuo pagamintos skyrėsi apie 3 %. Išmatuotas griovelio gylis nuo suskaičiuoto skyrėsi ne daugiau nei 10 μm .



89 pav. Fazinės zoninės plokštelės nuotrauka (a) Fazinės plokštelės griovelių gylio profilis išilgai brūkšninės oranžinės linijos.

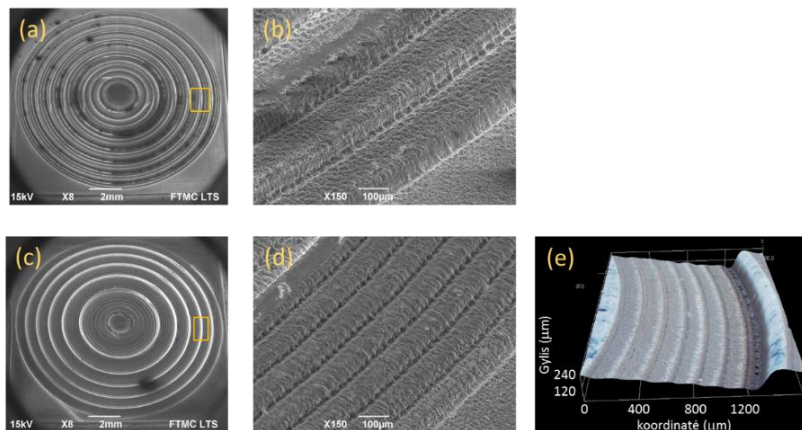
Atliktas praėjusios pro fazinę zoninę plokštelę fokusuotos spinduliuotės vaizdinimas xz kryptimis. Gausinio pluošto sąsmaukos pločio ir amplitudės pokytis išilgai bangos sklidimo krypties yra palygintas 90 pav. su tokio pat dizaino ir židinio nuotolio SZP. Čia turėtų būti įvertinta keletas aspektų: pirma, amplitudė šiek tiek mažesnė dėl Si sugerties ir nehomogeniško griovelio gylio pasiskirstymo žieduose. Antra, susidariusių stovinčių bangų interferencija yra mažesnė dėl mažesnio atrojo atspindžio nuo iš dalies THz ruože skaidraus silicio paviršiaus.



90 pav. Su fazine zotine plokštele sufokusuotas 600 GHz Gausinis pluoštas išilgai židinio plokštumai xz kryptimi (a). Spindulio sąsmaukos pločio (b) ir amplitudės (c) pasiskirstymas z kryptimi pusės maksimalios amplitudės aukštyje.

5.3.1 Daugialaiptės fazinės zoninės plokštelės

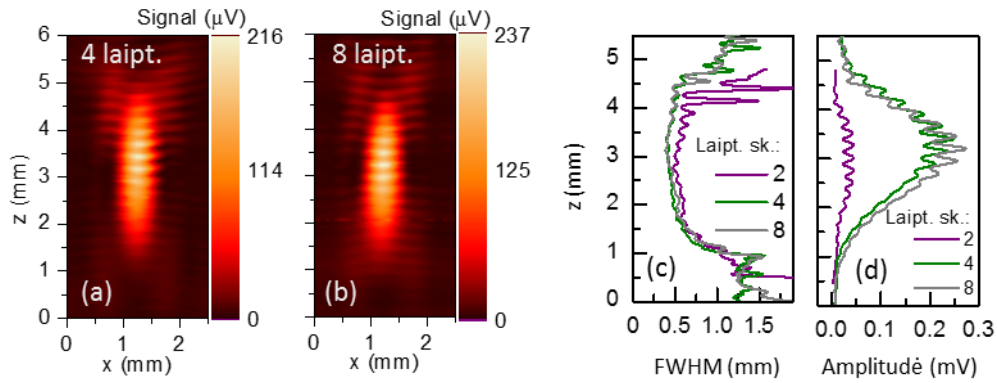
Galimybė dar labiau padidinti sufokusuotos spinduliuotės amplitudę židinio taške buvo įvertinta tiriant daugialaiptes zonines plokšteles. Jos buvo pagamintos naudojant tą pačią lazerinės abliacijos metodiką, kuri buvo aprašyta anksčiau. Šiuo atveju silicyje buvo išpjaustyti skirtingo aukščio laipteliai, kurie suformuoja zonas, artimas Frenelio lęšio profiliui. Fazinės zoninės plokštelės, kurios zonos sudarytos iš 4-ių ir 8-ių laiptelių SEM nuotraukos yra pateiktos 91 pav. Jų išoriniai matmenys ir židinio nuotolis buvo tokie patys kaip ir FZP.



91 pav. Fazinė zoninė plokštelė, kurios zonas sudaro 4 laipteliai (a) ir 8 laipteliai (c). Išdidintos 4-ių laiptelių sritis (b) ir 8-ių laiptelių sritis (d). Laiptelių gylis vaizdas (e).

Šių zonų fokusavimo savybės buvo palygintos atliekant fokusuotos spinduliuotės vaizdinimą xz ir xy kryptimis. Gausinio pluošto sąsmaukos pločio ir amplitudės pokytis išilgai bangos sklidimo krypties yra palygintas 92 pav.

Pateikti fokusuotos spinduliuotės vaizdai xz plokštumoje (92 a, b pav.) yra labai panašūs, šiek tiek skiriasi tik amplitudė. Lyginant šias daugialaibes fazines zonines plokšteles su dviejų laiptelių FZP, matome, kad sąsmaukos plotis mažai priklauso nuo laiptelių skaičiaus (92 c pav.), tačiau yra matomas iki 6 kartų amplitudės padidėjimas (92 d pav.).



92 pav. Su 4-ių ir 8-ių laiptelių FZP sufokusuotas 600 GHz Gausinis pluoštas išilgai židinio plokštumai xz kryptimi (a, b). Spindulio sąsmaukos pločio (c) ir amplitudės (d) pasiskirstymas z kryptimi pusės maksimalios amplitudės aukštyje.

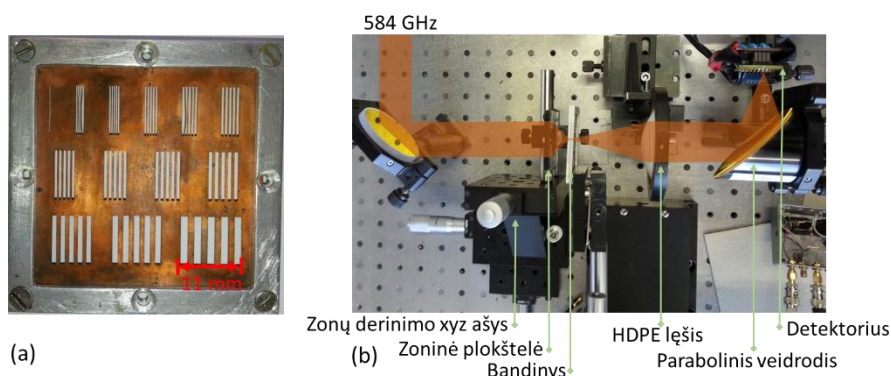
Kiti Gausinio pluošto parametrai kaip matome iš 8 lentelės skiriasi mažai. 8 lentelė. Gausinio pluošto parametrų suvestinė sufokusavus su skirtingų laiptelių skaičiaus fazinėmis zoninėmis plokštelėmis.

Židinio nuotolis	Laiptelių skaičius	Bandinio tipas	$\frac{E_f}{E_0}$	Signalas U	FWHM aproksimavus	Spindulio sąsmauka	Relėjaus ilgis z_R	Bendras erdvinis kampas Θ	Skaitinė apertūra NA
(mm)	(vnt.)			(μ V)	(mm)	ω (mm)		(rad)	
10	2	FZP	12	43	0.44	0.37	0.87	0.85	0.41
10	4	FZP	20	246	0.37	0.31	1	1.01	0.49
10	8	FZP	21	282	0.37	0.31	0.89	1.01	0.49

Vertinant teoriškai skaičiuoto E_f/E_0 ir išmatuoto signalo amplitudės padidėjimą židinio taške galima daryti išvadą, kad 4-ių laiptelių fazinė zoninė plokštelė iki 6 kartų efektyviau koncentruoja spinduliuotę nei 2-jų laiptelių FZP. Taip pat šie rezultatai patvirtina, kad daugiau nei 4 laiptelių FZP gamyba yra ekonomiškai neprasminga dėl mažai besikeičiančių fokusavimo savybių ir žymiai sudėtingesnio ir ilgesnio lazerinės abliacijos proceso.

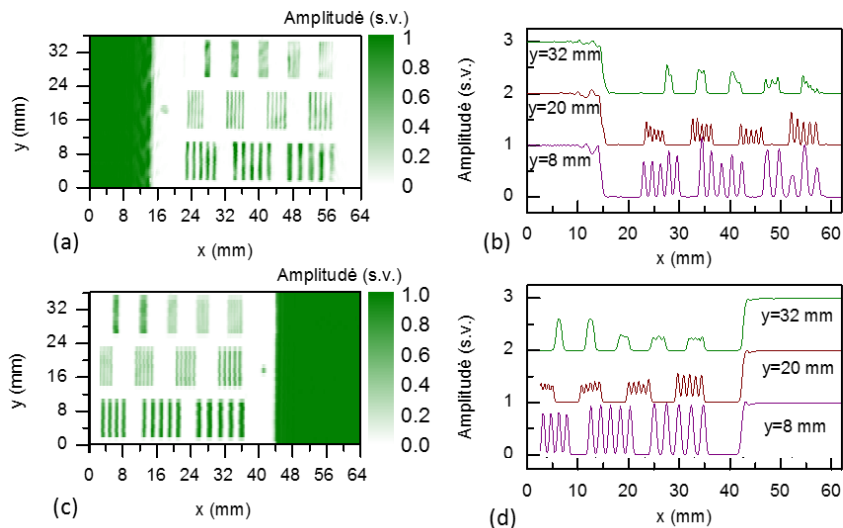
5.4 Objektų vaizdinimas naudojant difrakcinę optiką

Vienas iš ištirtos difrakcinės optikos komponentų buvo panaudotas objekto THz vaizdinimo eksperimente. Šiuo atveju parabolinis veidrodis buvo pakeistas kombinuota zonine plokštele, kuri fokusavo spinduliuotę į tiriamą objektą (93 a pav.). Vaizdinimo stendo principinė schema labai panaši į pateiktą 77 a pav. Komponentų išdėstymo nuotrauka pavaizduota 93 b pav. KZP (židinio nuotolis – 1 cm) sufokusuoja spinduliuotę į taikinį, praėjusi spinduliuotė pro taikinį yra surenkama 6 cm židinio nuotolio HDPE lęšiu. Tada kolimuota spinduliuotė sufokusuojama su 5 cm židinio nuotolio paraboliniu veidrodžiu į TeraFET detektorių [NP 10].



93 pav. Taikinio su skirtingo pločio plyšiais nuotrauka. Eksperimento schemos vaizdas iš viršaus. THz spinduliuotės kelias pažymėtas raudona spalva.

Vaizdinimo sistemos rezoliucijos įvertinimas pateiktas 94 pav. Pavaizduotos skirtingo pločio apertūros fokusuojant su KZP ir paraboliniu veidrodžiu. Pjūviai ties kiekviena apertūrų eile pateikti 94 b, d pav. Iš jų galima matyti, kad THz spinduliuotę fokusuojant su KZP vidurinės apertūrų juostelės pralaidumo vaizdas yra aiškus ir tarpuose tarp jų signalas visai nepraeina. Apertūrose, kurių plotis siekia 0.8 mm, (94 b pav. raudona linija 5 pikai kairėje) moduliacijos gylis siekia 80 %, tuo tarpu fokusuojant su paraboliniu veidrodžiu – apie 10 %.



94 pav. Taikinio vaizdas pralaidume ties 584 GHz fokusuojant su zonine plokštele (a) ir su 5 cm židinio nuotolio paraboliniu veidrodžiu (c). Pjūviai ties skirtingomis y padėtimis (b ir d). Pjūviai pavaizduoti pakėlus linijas viena kitos atžvilgiu per 1 s.v.

Apibendrinant galima teigti, kad panaudojus sukurtus difrakcinius elementus THz vaizdinimo sistemoje galima išskirti 0.6 mm periodo strypelius taip pasiekiant iki 25 % geresnę rezoliuciją lyginant su tos pačios skaitinės apertūros komerciniais paraboliniais veidrodžiais.

5.5 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pristatyti standartinių ir kombinuotų savybių zoninių plokštelių dizainai, teoriniai jų modeliavimo rezultatai ir eksperimentiniai tyrimai bei jų taikymai vaizdinimo sistemose. Integravus zoninę plokštelę į InGaAs BT jutiklio padėklą ir tiriant jo atsako signalo priklausomybę nuo spinduliuotės kritimo kampo, buvo patvirtinta svarbi zoninės plokštelės įtaka jutiklio signalui.

Šiame skyriuje aprašyti difrakcinės optikos tyrimų ir taikymų rezultatai leidžia suformuoti *penktąjį ginamąjį teiginį*.

Pritaikytos THz ruožui standartinės ir sukurtos kombinuotų savybių zoninės plokštelės yra tinkamos aštriam terahercinės spinduliuotės fokusavimui. Jas integravus į „peteliškės“ tipo jutiklio padėklą, padidinama jo atsako amplitudė daugiau nei 20 kartų ir tuo pačiu metu sumažinamas atskirų vaizdinimo sistemos optinių komponentų skaičius.

6 THZ VAIZDINIMO SISTEMOS TAIKYMAI

Šiame skyriuje bus aptariami THz spinduliuotės taikymai silicio saulės elementų diagnostikoje tiriant kontaktinių linijų litavimo kokybę, kontroliuojant atspindį sumažinančio sluoksnio ėsdinimo procesą bei matuojant saulės elementų modulių apsauginio sluoksnio vientisumą. Taip pat bus vertinamos perspektyvos kontroliuoti plonasluoksnių saulės elementų auginimo kokybę ir apatinio kontaktinio sluoksnio tolygumą naudojant THz spinduliuotę.

6.1 THz spinduliuotės taikymai saulės elementų diagnostikoje

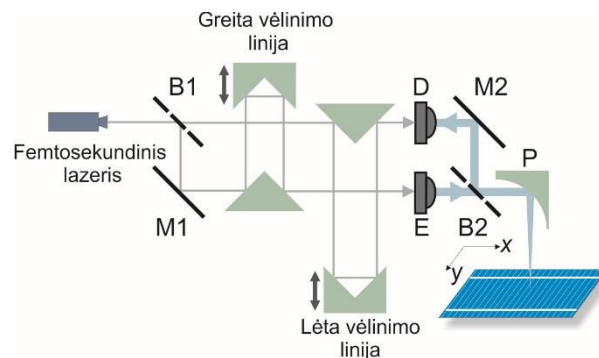
Automatizuotas saulės elementų (SE) jungimas į modulius lituojant metalines jungiamąsias juosteles ant saulės elemento yra nusistovėjusi technologija šiuolaikinėse gamybos linijose [101]. Šios didelio našumo gamybinės linijos taip pat reikalauja tikrinimo sistemų, galinčių greitai ir tiksliai analizuoti kontaktų litavimo kokybę. Šiuo metu gamyboje dažniausia naudojamos vaizdo kamerų sistemos, tikrinančios jungiamosios juostelės poziciją. Jau užbaigto modulio tikrinimui naudojami elektroliuminescenciniai metodai, galintys aptikti iš dalies sulituotas vietas, naudojant infraraudonosios (IR) srities vaizdinimo metodiką. Tačiau, visiškai automatinė matomų gedimų analizė ir interpretacija dar nėra įmanoma, nes vien teisinga jungiamosios juostelės pozicija negarantuoja litavimo kokybės, be to, elektroliuminescencijos vaizdams gali turėti įtakos ir kiti veiksniai.

Prilituotos jungiamosios laidininko juostelės aukščio profilio rekonstrukcija naudojant Terahercinės laiko skyros spektroskopiją (THz – TDS) galėtų būti vienas iš sprendimų SE jungimo moduluose kokybės užtikrinimui. Lituojant jungiamąją juostelę ant SE paviršiaus, vietose, kur lydmetalio išsilydo, aukščio skirtumas tarp laidininko juostelės ir SE sumažėja. Šio aukščio matavimas galėtų būti tiesioginis metodas kontakto kokybės vertinimui.

THz – TDS metodas jau anksčiau buvo taikytas tiriant plonasluoksnių SE emisiją [102], taip pat jau aptartas terahercinis vaizdinimas heterodininėje schemeje atkuriant monetos paviršių (skyrius 4.1.5) [IP 6], o [103] straipsnyje

aprašomi mažų įtrūkimų medžiagoje tyrimai rodo, kad THz spinduliuotė gali būti taikoma paviršinių nelygumų vertinimui.

Jungiant THz – TDS metodiką [104] ir matematinius fazės atstatymo algoritmus buvo siekiama nustatyti defektuotas jungiamųjų juostelių litavimo vietas. Šiems tyrimams buvo naudotas komercinis spektrometras (Teravil-Ekspla T-Spec [105]). Jo principinė schema pateikta 95 pav. THz spinduliuotės emisijai ir detekcijai yra naudojama fotolaidi antena. Šie sistemos komponentai dirba kaupinami femtosekundinio lazerio (bangos ilgis 760 – 840 nm, impulso trukmė 50 – 150 fs). Jo impulsas optiniu dalikliu B1 padalinamas į dvi dalis; pirmoji dalis praėjusi veidrodį M1 ir greita vėlinimo linija (judėjimo sparta 10 Hz) sužadina emiterį E, kuris sugeneruoja THz impulsą. Antroji lazerio impulso dalis, praėjusi lėta vėlinimo linija, patenka į detektorių D. Kiekvienas lazerio impulsas THz emiteryje inicijuoja po vieną terahercinį impulsą. Tada THz spinduliuotė yra nukreipiama į bandinį su paraboliniu veidrodžiu P. Detektoriuje lazerio impulsu sužadintus krūvininkus judėti verčia THz impulso elektrinis laukas. Sąveikaujant terahercinei ir lazerio spinduliuotei, detektoriuje D generuojama elektrinių impulsų seka.

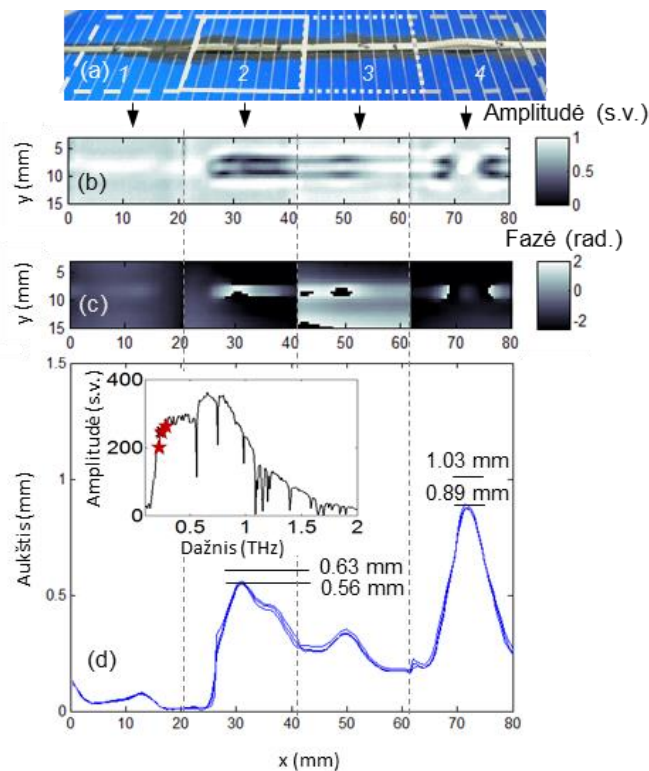


95 pav. T-Spec spektrometro principinė schema. Femtosekundinio lazerio impulso sklaidimo trajektorija pažymėta pilka linija, storos žydros linijos žymi THz impulsų trajektoriją. M – veidrodis, B – spindulio daliklis, P – parabolinis veidrodis, D – detektorius, E – emiteris. [IP 5]

Šių impulsų pasikartojimo dažnis lygus lazerio impulsų pasikartojimo dažniui; jais pernešamas elektrinis krūvis yra tiesiogiai proporcingas THz impulso momentinei elektrinio lauko vertei. Judinant greitą vėlinimo liniją 10 Hz dažniu, gauname THz elektrinio lauko impulso skleistinę laikę. Atlikus

sparčiąją Furjė transformaciją gauname šio impulso spektrą su informacija apie THz impulso, atsispindėjusio nuo bandinio, amplitudę ir fazę. Atraminiai matavimai atliekami bandinį pakeitus veidrodžiu.

Litavimo kokybės vertinimui prie komercinio silicio saulės elemento paviršiaus buvo prilituota jungiamoji laidininko juostelė su tyčiniais defektais. Šio bandinio nuotrauka pateikta 96 a pav. Bandinio pirmojoje dalyje visai nebuvo jungiamosios juostelės, tačiau dalis jos padengta tik lydmetaliu. Suformuotos juostelės kilpos 2-oje ir 4-oje dalyse. Jų aukštis siekia 0.63 mm ir 1.03 mm. Netolygi juostelės litavimo sritis suformuota 3-ioje bandinio dalyje. Kiekvieno segmento 0.24 THz vaizdai, sudaryti iš 41×31 vaizdo elementų su 0.5 mm erdvine skyra yra pateikti 96 b, c pav.



96 pav. Silicio saulės elemento THz vaizdai. Bandinio nuotrauka (a), segmentai, kurie buvo vaizdinami, pažymėti linijomis. Bandinio segmentų amplitudiniai (b) ir faziniai (c) vaizdai ties 0.243 THz. Laidininko juostelės aukščio rekonstrukcija iš fazinio vaizdo ties 0.225 THz; 0.234 THz; 0.243 THz (d). THz spektras ir dažniai, ties kurias vertintas aukštis, pateikti intarpe. Trumpos linijos žymi tikrąjį ir išmatuotą juostelės aukštį. [IP 5]

Visuose vaizdo taškuose amplitudės signalas vidurkintas 16 kartų. Vaizdai šiek tiek persikloja, kadangi bandinį judinančios ašies eigos x kryptimi

nepakako. Ties kiekvienu segmentu, bandinys buvo perstumtas ranka. Kaip matome iš 96 b pav. vietoje, kur juostelė prilituota netolygiai, amplitudės vaizdai yra iškraipyti. Maži iškilimai 3-iaame segmente THz vaizde pasireiškia amplitudės padidėjimu. Suformuota didesnė kilpa matoma kaip trūki linija su dviem amplitudės minimumais. Tačiau mažesnę kilpą antrame segmente sunkiau išskirti dėl destruktivios bangų interferencijos joms atsispindėjus nuo juostelės paviršiaus ir SE paviršiaus. Dėl to, šie amplitudiniai vaizdai yra ne itin patikimi norint įvertinti tikslią laidininko juostelės defekto vietą. Šiuo atveju, fazinis vaizdas ties 0.243 THz, pateiktas 96 c pav., yra informatyvesnis. Kaip matome, visi juostelės nelygumai pasižymi fazės pokyčiu. Foninis vaizdas atrodo iškreiptas dėl 2π fazės šuolių. Iš fazinio vaizdo paėmus tris vaizdo taškų linijas: vieną liniją ten, kur juostelės centras, kitas dvi linijas nutolusias per 2.5 mm nuo juostelės šie artefaktai yra įskaitomi tolimesniame duomenų apdorojime. Duomenų apdorojimas atliekamas šia seka:

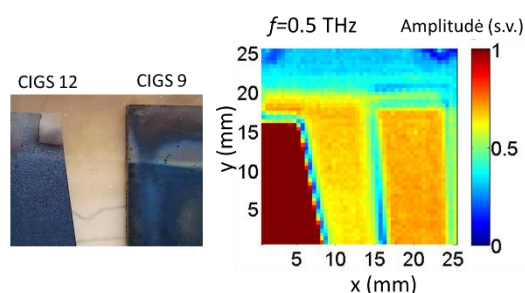
1. Vietose, kur fazės pokytis tarp gretimų vaizdo taškų yra didesnis nei π , vaizduojamo taško elemento fazė pakeičiama $\pm 2\pi$.
2. Juostelei gretimų linijų fazės vertės vidurkinamos taip kompensuojant bandinio polinkį.
3. Nustatomas vidurinės vaizdo taškų linijos fazės verčių pokytis $\Delta\varphi$ tarp bangų, atsispindėjusių nuo SE paviršiaus ir lituotos juostelės.
4. Vertinamas juostelės aukštis h kiekviename vaizdo taške darant prielaidą:

$$h = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi f'} \quad (6.1)$$

kur c – šviesos greitis vakuume, f' – dažnis. Matematiškai apdoroto fazinio vaizdo pjūvio rezultatai ties trimis dažniais, pažymėtais 96 d pav. intarpe, yra pavaizduoti 96 d pav. Dažniai parinkti taip, kad fokusuotos bangos ilgis būtų mažesnis nei juostelės plotis, ir pakankamas fazės atstatymo procedūrai. Pateiktas juostelės aukščio profilis gerai atitinka nuotraukoje matomų nelygumų vietas. Su slankmačiu išmatuotas kilpų aukštis yra 0.63 mm ir 1.03 mm, o apskaičiuotas ties 0.243 THz siekia 0.56 mm ir 0.89 mm. Iš THz matavimų įvertintas aukštis virš 86 % tikslumu sutapo su tikrąja aukščio verte.

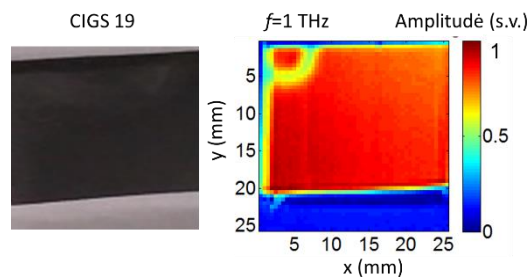
6.2 Plonasluoksnių saulės elementų diagnostika

Pasaulyje sparčiai besivystant fotoelektros sektoriui bei tobulėjant plonasluoksnių saulės elementų technologijoms, vario indžio galio selenido (CIGS) pagrindu suformuoti lankstūs saulės elementai tampa vis patrauklesni masinei gamybai, o rekordinis tokių saulės elementų efektyvumas jau viršija 20 % [106]. Šis skaičius rodo, kad CIGS technologijos tampa perspektyvi alternatyva silicio saulės elementams. Pramonės ekspertai tikisi, kad šie elementai bus viena iš perspektyvių technologijų mažinant fotovoltinių saulės elementų kainą [107]. Tačiau, didelio masto CIGS saulės elementų gamyboje valdant auginimo procesus realiu laiku dar nėra tinkamų diagnostikos priemonių, užtikrinančių grįžtamąjį ryšį gamybos procese [108]. Bandytas taikyti THz-TDS sistemą CIGS sluoksnių auginimo kontrolei pavaizduotas 97 pav. CIGS bandiniai gaminti naudojant magnetroninio dulkinimo technologiją. Bandinio CIGS9 aktyvus sluoksnis ruoštas ant stiklo padėklo, o CIGS12 bandinys augintas ant molibdeno padengto stiklo padėklo. Platesnis šių bandinių tyrimas ir gamybos technologija aprašyta [IP 3]. Vaizde ties 0.5 THz matyti, kad CIGS12 bandinys yra visiškai atspindintis dėl laidaus molibdeno sluoksnio ir mažo CIGS sluoksnio storio. CIGS9 atspindžio koeficientas yra tik šiek tiek didesnis nei stiklo, kuris matosi THz vaizde, tarpe tarp bandinių.



97 pav. Bandinių CIGS12 ir CIGS9 nuotrauka (kairėje) ir jų vaizdas ties 0.5 THz (dešinėje). [IP 3]

CIGS19 bandinio vaizdas ties 1 THz (98 pav.) yra labai panašus į CIGS 12 vaizdą, tik šiuo atveju išryškėjusi kilpa kairiajame viršutiniame kampe rodo vietą, kuri nepadengta molibdeno. Ši sritis nuotraukoje visiškai neišsiskiria.

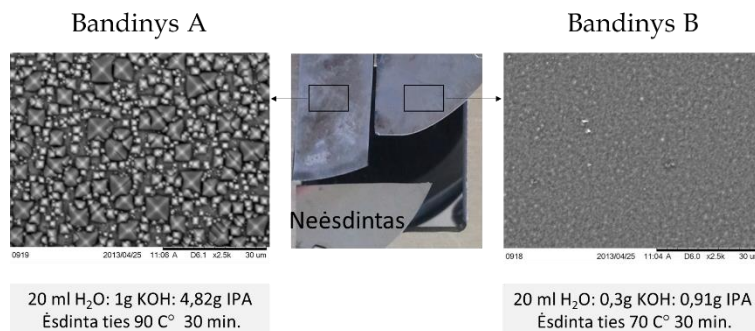


98 pav. Bandinio CIGS-19 nuotrauka (kairėje) ir jo vaizdas ties 1 THz (dešinėje). [IP 3]

Šie vaizdai rodo, kad THz vaizdinimas gali būti naudojamas apatinio CIGS kontakto defektams aptikti, net ir tuo atveju kai CIGS sluoksnis jau užgarintas.

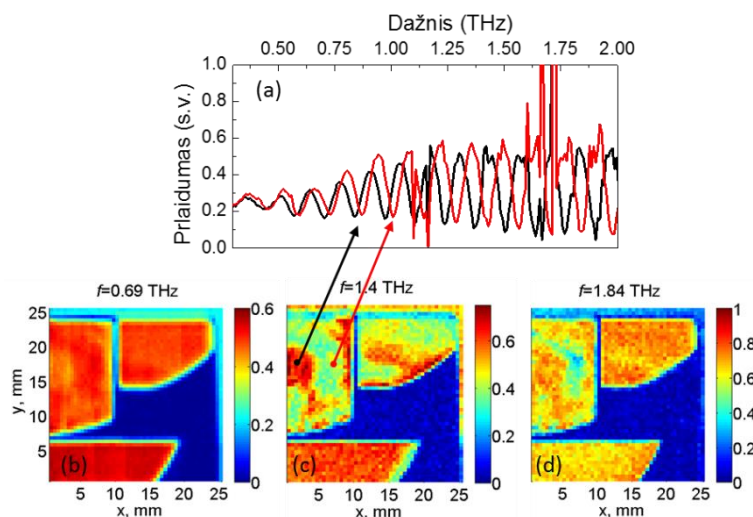
6.3 Saulės elementų paviršiaus ir jų modulių diagnostika

Siekiant tiksliau atskirti silicio saulės elementų paviršiaus tekstūravimo įtaką THz atspindžio vaizdams, buvo pagaminti keli bandomieji kristalinio silicio su tekstūruotais paviršiais ruošiniai. $\langle 100 \rangle$ orientacijos kristalinio silicio plokštelės buvo ėsdinamos KOH, izopropanolio ir dejonizuoto vandens selektyviame ėsdiklyje. Komponentų koncentracijos parenkamos taip, kad vienu atveju paviršius būtų padengtas tankiai išdėstytomis piramidėmis su $\langle 111 \rangle$ orientacijos sienelėmis (bandinys A), kitu atveju – paviršius minimaliai paėsdinamas, imituojant pradinę ėsdinimo fazę (bandinys B), trečiu – paviršius tiesiog nuėsdinamas, imituojant pažeidimų pašalinimą (atraminis). Šių bandinių SEM nuotraukos pateiktos 99 pav. Bandinio A paviršiuje matomas aiškiai suformuotos kelių mikrometrų diametro piramidės, tuo tarpu bandinio B paviršiuje matomi nelygumai siekia šimtus nanometrų. Šie bandiniai buvo ištirti tiek Furjė tolimosios IR srities (FTIR) spektrometru Nicolet 8700, tiek Teravil-Ekspla „T-spec“ THz-TDS sistemoje.



99 pav. Ėsdinto kristalinio silicio SEM nuotraukos (kairėje ir dešinėje). Bandinių išdėstymo nuotrauka ant „T-Spec” sistemos laikiklio (viduryje). [P 3]

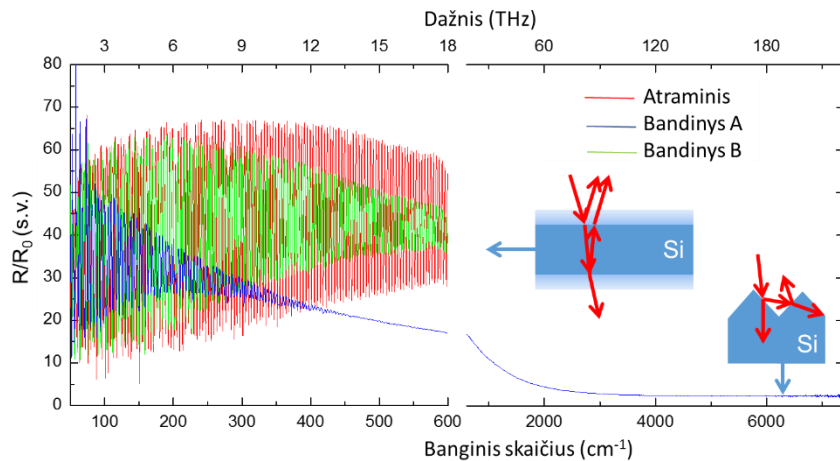
Su „T-spec“ sistema atliktų matavimų rezultatai pateikti 100 pav. Matome, kad jau ties 0.69 THz atspindžio skirtumai tarp bandinių A ir B pradeda ryškėti. Tiksliesni skirtumai matomi ties aukštesniais dažniais. Atspindys nuo atraminės plokštelės visais atvejais išlieka pastovus. Dėl interferencijos tarp atspindžių nuo plokštelės apatinio ir viršutinio paviršiaus stebimi pasikartojantys atspindžio amplitudės virpesiai (100 a pav.). Jau ties 1.5 THz dažniu bangos ilgis siekia 200 μm ir yra palyginamas su plokštelės storiu. Įskaičius Si lūžio rodiklį ir kelią, kurį nueina THz spindulys, nuėsdinus bent 30 μm Si sluoksnį dėl fazės pokyčio tarp interferuojančių bangų jau matomas ryškus atspindžio pokytis.



100 pav. Skirtingose sąlygose ėsdinto kristalinio silicio atspindžio spektras dviejuose taškuose (a). Šių bandinių THz vaizdai ties 0.69 THz, 1.4 THz ir 1.84 THz (b – d). [P 3]

Šių bandinių atspindžio spektrai taip pat buvo išmatuoti ir tolimojoje IR srityje. Rezultatai pateikti 101 pav. Išryškėja keletas dėsningumų: pirma,

aukštuose dažniuose labiau ęsdinto bandinio atspindys sumažėja iki kelių procentų. To ir buvo tikimasi, nes Si paviršiuje išęsdintos piramidės yra gerokai didesnės nei spinduliuotės bangos ilgis, todėl yra gerai sklaidomos. Kai bangos ilgis pasiekia piramidžių matmenis, atspindys padidėja, susidaro „stovinčių“ bangų interferencija. Šių osciliacijų amplitudės bandiniuose A ir B yra mažesnės nei neęsdintame silicyje ties dažniais virš 3 THz.

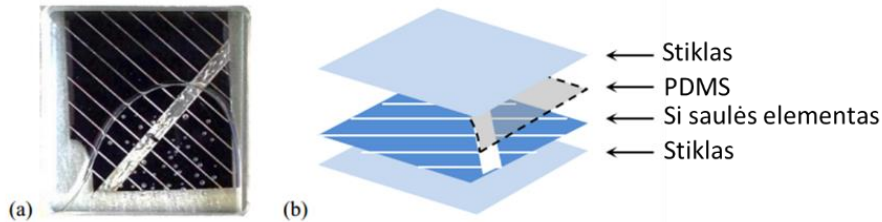


101 pav. Skirtingose sąlygose ęsdinto Si atspindžio spektrai tolimojoje IR srityje. Skirtinga paviršiaus sąveika su THz spinduliuote yra pateikta intarpe. [P 3]

Pademonstruoti charakteringi atspindžio rezultatai rodo, kad šios sistemos gali būti tinkamos stebėti anizotropinio ęsdinimo kokybę silicio saulės elementų gamybos linijoje. Spektuose matomi atspindžio maksimumo ir minimo virpesiai esant poreikiui galėtų būti registruojami siauresniame dažnių ruože su greitesnėmis fazė jautriomis THz vaizdinimo sistemomis [IP 6] naudojančiomis jutiklių masyvus [P 6].

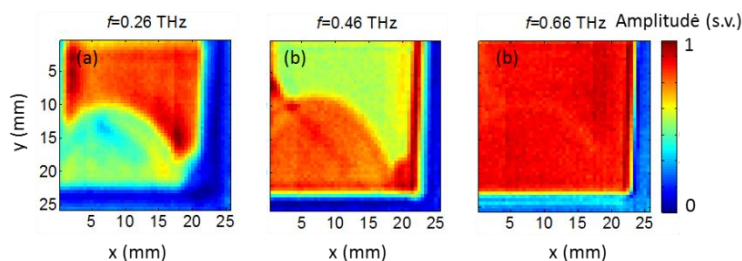
Atliktas saulės elementų charakterizavimas gamybos proceso eigoje, neužtikrina galutinio produkto – saulės elementų modulio kokybės. Todėl verta vertinti saulės elementų plokštelės ir kontaktų būklę jau po modulio surinkimo. Stiklas – stiklas saulės elementų moduliai vis dažniau pasirodo rinkoje. Jie pasižymi ilgesniu tarnavimo laiku, yra atsparesni aplinkos ir mechaniniam poveikiui nei standartiniai moduliai [109]. Tokio tipo modulio tyrimui buvo paruoštas nedidelis modulio imitatorius, pavaizduotas 102 pav. Apsauginės dangos formavimui buvo panaudotas Qsil 216 (iš Quantum Silicones) dviejų

dalių mišinys PDMS (polidimetilsiliksanas) pagrindu. Jis yra analogiškas dauguma savo savybių plačiai naudojamai Sylgard 184 dangai. Modulis buvo netolygiai padengtas šia danga ir patalpintas tarp dviejų mikroskopo stikliukų.



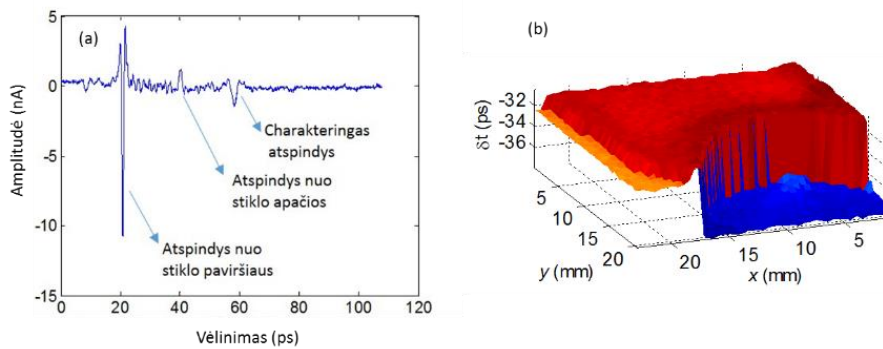
102 pav. Modulio imitatoriaus nuotrauka (a) ir jo sluoksnių iliustracija (b). [P 3]

Iš 103 pav. matome, kad pro stiklą praeina tik spinduliuotė, kurios dažnis neviršija 0.5 THz. Iš to galima daryti išvadą, kad prasminga atlikti THz vaizdinimą tik žemesniuose dažniuose. Šiuose dažniuose (0.26 THz) stiklas tampa pakankamai skaidrus THz spinduliuotei, kad po juo būtų galima išskirti dvi sritis – kokybiško apsauginio sluoksnio (raudonos spalvos sritis – didesnės amplitudės) bei oro „burbulo“ (žaliaimelsva sritis, mažesnės amplitudės). Tai reiškia, kad mažinant spinduliuotės dažnį galima tikėtis zonuoti ir storesnio stiklo sluoksnius, būdingus komercinių Si saulės elementų moduliams.



103 pav. Tarp dviejų mikroskopo stikliukų tyčia nekokybiškai apsauginiu sluoksniu padengtų bandiniu vaizdai ties skirtingais dažniais. [P 3]

Norint giliau paanalizuoti taip į apsauginį sluoksnį sumontuoto saulės elemento modulį, buvo tiriamas impulso sklidimas laike ir jo atspindys nuo skirtingų lūžio rodiklių paviršių. Iš 104 a pav. pateikto impulso vėlinimo vaizdo bandinio taške $x=7.5$ mm, $y=7.5$ mm matome, kad stebimos trys smailės. Pirmą smailę atsiranda dėl atspindžio nuo stiklo paviršiaus, antroji – dėl atspindžio nuo stiklo apatinio sluoksnio, o trečioji smailė atsiranda dėl atspindžio nuo bandinio (saulės elemento ar apsauginės dangos).



104 pav. Impulso vėlinimas bandinio (103 pav.) taške kai $x=7.5$ mm, $y=7.5$ mm (a). Po stiklu esančio bandinio profilio žemėlapis (b). [P 3]

Pirmų dviejų pikų vėlinimas išlieka gana pastovus visuose bandinio taškuose, kadangi stiklas yra tolygus ir vienodo storio. Norint sudaryti bandinio, esančio po stiklu, profilio žemėlapi reikia įvertinti trečio piko padėties atžvilgiu antrojo piko pozicijos laike skirtumą. 104 b pav. yra pateiktas bandinio profilis, iš jo matome, kad vietose, kur yra PDMS, impulsas yra vėlinimas 4 ps ilgiau nei vietose, kur Si bandinys yra nepadengtas PDMS sluoksniu. Vieta, pažymėta oranžine spalva, žymi sritis, kur nėra saulės elemento. Raudona spalva žymi saulės elemento plokštumą. Žinant vėlinimo laiką nesunkiai galima įsivertinti silicio saulės elemento ar PDMS storį. Impulso vėlinimas ties antru stiklo paviršiumi ir saulės elementu yra 1.6 ps, tai atitiktų 0.48 mm saulės elemento storį. Naudojamo PDMS lūžio rodiklis $n=1.41$, o vėlinimas 6.2 ps, iš to galima spręsti, kad PDMS storis tarp stiklo ir saulės elemento yra apie 1.3 mm.

Šie rezultatai rodo, kad taikant THz spinduliuotę ir matuojant jos fazę galima bekontakčiu būdu vertinti saulės elementų modulio užpildo sluoksnio kokybę ir storį.

6.4 Fazei jautrių sistemų perspektyvos

Šiame skyriuje aptartų THz spinduliuotės taikymų saulės elementų diagnostikoje perspektyvos gana plačiai buvo aptartos ir eksperimentiškai patikrintos. Aiškiai parodytos kontaktinių takelių defektų aptikimo galimybės ar jau sumontuotų celių kokybės vertinimas neardant apsauginės dangos sluoksnio.

Visi šie rezultatai yra svarus argumentas pradėti plačiau taikyti terahercinę spinduliuotę pramoninėse saulės elementų gamybos linijose. Šiuolaikinės fotovoltinių celių ir modulių gamybos linijos yra itin sparčios, viena gamybos linija gali gaminti iki 300 MW eilės celių galios [110, 111]. Tai reiškia dešimtis mln. celių per metus, arba nuo kelių iki 3400 celių per valandą [112]. Iš tiesų, šie skaičiai yra milžiniški ir reiškia sekundės trukmės inspektavimo laikus vienai celei. Tyrimams naudota Teravil-Ekspla T-Spec sistema viename taške išmatuoti spektrą užtrunka iki sekundės. Praktiškai tyrimų metu buvo naudojamas 16-os kartų vidurkinimas. Esant objekto dydžiui $25 \times 25 \text{ mm}^2$ ir skenavimo žingsniui $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$, išmatuoti visų taškų spektrus užtrukdavo iki 3 h. Tai reiškia, kad spektras bent viename taške išmatuojamas per 3 – 4 s, tada objektas paslenkamas ir vėl matuojamas. Ši sistemos ir pačio matavimo metodo sparta yra gerokai per lėta praktiniam panaudojimui šiuolaikinėse sparčiose gamybos linijose.

Todėl ateityje gali labai pasitarnauti šiame darbe tirti heterodininio vaizdinimo schemoje veikiančys BT detektoriai. Sukurtos jutiklių liniuotės gali gerokai paspartinti objekto vaizdinimo trukmę. 32-jų jutiklių liniuotės ilgis siekia 12.5 mm. Skyriuose 4.2.2 ir 4.2.3 aptartos vaizdinimo sistemų su jutiklių liniuotėmis skenavimo greitis viena kryptimi gali siekti iki 256 mm/s kai žingsnis 1 mm. Tai reikštų, kad per vieną sekundę būtų gaunama THz spinduliuotės amplitudės ir fazės informacija iš 3200 mm^2 tiriamo objekto ploto arba 8192 vaizdo taškų. Svarbu paminėti, kad šiais skaičiais sistemos sparta nesiriboja, galima ilginti liniuotę didinant jutiklių skaičių (praktinio ribojimo nėra) ar keisti nuskaitymo elektroniką į spartesnę. Taip pat, 5 skyriuje analizuoti kompaktinės difrakcinės optikos komponentai gali būti integruojami jutiklių liniuotėse taip padidinant jų atsaką ir vaizdinimo sistemos rezoliuciją bei supaprastinat šios sistemos justiravimo subtilybes. Kitas svarbus aspektas – derinant zonines plokšteles su dažniui selektyviais paviršiais galima valdyti fokusuotos spinduliuotės profilį ar fokusuojamą dažnį. Tokiu būdu galima pritaikyti THz vaizdinimo sistemą įvairiems fotovoltinių celių kokybės kontrolės poreikiams.

Pritaikius heterodininę detekcijos schemą, BT jutiklių liniuotes ir difrakcinės optikos pranašumus lyginant su lęšiais, galima tenkinti šiai dienai saulės celių gamybinių linijų keliamus reikalavimus.

6.5 Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo pademonstruoti sėkmingi THz spinduliuotės taikymai vertinant saulės elementų kontaktinių juostelių litavimo kokybę. Su mažesne nei 14 % paklaida nuo tikrosios vertės nustatytas aukščių skirtumas tarp silicio saulės elemento paviršiaus ir juostelės įrodo, kad šie bekontakčiai matavimai gali būti sėkmingai taikomi siekiant nustatyti tikslią litavimo defektų buvimo vietą. Taip pat parodyta, kad THz vaizdinimas gali būti naudojamas ir plonasluoksnių CIGS saulės elementų apatinių kontaktų metalizacijos defektų aptikimui ar anizotropinio ėsdinimo kokybės silicio saulės elementų gamybos linijoje stebėjimui. Aptartos modulio užpildo sluoksnio storio ir vientisumo vertinimo galimybės išmatavus THz impulso vėlinimo trukmę.

REZULTATAI IR IŠVADOS

Per doktorantūros studijų metus buvo sukurti ir pagaminti optimizuoti > 0.3 THz dažniams, veikiantys kambario temperatūroje InGaAs „peteliškės“ formos jutikliai ir jų matricos. Pritaikyti difrakcinės optikos komponentai terahercinių dažnių ruožui bei sukurti kombinuoti fokusuojantys ir dažniui selektyvūs elementai. Pasiūlytas būdas šiuos elementus integruoti į jutiklių matricas taip padidinant jų atsako amplitudę. Galiausiai, šie sprendimai buvo pritaikyti atliekant terahercinį vaizdinimą.

Darbo metu buvo prieita prie šių išvadų:

- 1) Atsižvelgiant į atskirų metalizuotų sričių anteninius efektus sukurti optimalūs „peteliškės“ tipo InGaAs jutiklių dizainai teraherciniam dažnių ruožui. Iš FDTD metodu suskaičiuotų rezultatų padarytos šios išvados:
 - a) Metalizuotos sritys veikia kaip dvi atskiros antenos su aiškiai išreikštomis rezonansinėmis savybėmis, o didėjant dažniui jų lokalių maksimumų amplitudė mažėja.
 - b) Dėl masyvių kontaktinių takelių įtakos išplinta anteninės jutiklio dalies $\lambda/4$ rezonansai, tačiau net tokiu atveju „peteliškės“ dizaino metalinio kontakto smailėje elektrinio lauko stiprio amplitudė yra eile didesnė už krintančio elektrinio lauko stiprio amplitudę ties 0.7 THz.
 - c) Tiriant jutiklių tarpusavio įtaką masyvuose, nustatyta, jog atskiruose stulpeliuose esantys jutikliai praktiškai nesąveikauja, jei atstumas tarp stulpelių siekia bent $80 \mu\text{m}$, o viename stulpelyje esančių jutiklių elektrinių laukų santykio ties smaile skirtumai neviršija 20% nuo vidutinės vertės, kai jutiklių periodas yra bent $120 \mu\text{m}$.
 - d) Papildytas fenomenologinis modelis įskaičius jutiklio metalizuotų sričių anteninius efektus virš 1 THz geriau sutapo su eksperimentiniais duomenimis.
- 2) Kokybiški InAs/InGaAs heterodariniai auga $500 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, esant In ir Ga ekvivalentinių srautų santykiui artimam 2.08. Šiose sąlygose tolygiai

padengtas ištisas ir vienodo storio InAs buferinis sluoksnis sudaro sąlygas epitaksiniam aktyviojo InGaAs sluoksnio augimui.

- 3) Esant optimaliam In ($x=0.53$) kiekiui, InGaAs sluoksnyje, kai ekvivalentinis In/Ga srautų santykis auginimo metu siekia 2.08, dislokacijos nesiformuoja ir gaunamas minimalus defektų kiekis.
- 4) Papildytas „peteliškės“ tipo jutiklio veikimo principą aiškinantis karštųjų krūvininkų modelis įvertinus paviršinių būsenų ir krūvių nulemto lauko efekto įtaką. Buvo nustatyta, kad:
 - a) Naujo dizaino „peteliškės“ tipo InGaAs jutiklių triukšmų mechanizmus lemia krūvininkų pagavos ir išlaisvinimo vyksmai daugelyje pagavimo centrų, kuriuos kuria defektai. Jų kilmė yra krūvininkų generacijos-rekombinacijos superpozicija defektuose, lokalizuotuose InGaAs ir InP sluoksnių sandūroje.
 - b) Jutikliams, pagamintiems iš $55 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ varžos InGaAs ruošinio, būdingas aiškiai išreikštas lauko efektas dėl paviršinių krūvių. Jis koreliuoja tiek su suformuotų jutiklių voltamperinių charakteristikų forma, tiek su jutiklio signalo pokyčiais kintant juo tekančiai nuolatinei srovei.
 - c) Tekant bent $-4 \mu\text{A}$ srovei per BT jutiklio aktyviają sritį ties platesniu jutiklio kontaktu esantis lauko efektas kompensuoja geresnį elektrinio lauko koncentravimo efektą ties siauresniu kontaktu.
- 5) Atlikus THz vaizdinimą kambario temperatūroje parodyta, kad optimizuoto dizaino „peteliškės“ tipo jutikliai yra tinkami THz pralaidumo ir atspindžio vaizdų užrašymui tiesioginės ir heterodininės detekcijos schemose. Nustatyta, kad:
 - a) Jutiklio sparta yra pakankama heterodininei detekcijai esant moduliacijos dažniui iki 100 kHz, o aukštesniems dažniams signalas jau gali būti ribojamas dėl sistemoje naudoto sinchroninio stiprintuvo savybių.
 - b) Jutiklių jautris ties 0.59 THz siekia 6 V/W ir apie 10 V/W ties 0.76 THz, o triukšmo ekvivalenti galia tiesioginės detekcijos atveju yra $4 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$.

- c) Heterodininės detekcijos atveju pasiekama 230 fW/Hz triukšmo ekvivalenčios galios vertė, kai minimali jutiklio registruojama galia yra 11 μ W.
 - d) InGaAs detektoriumi veikiant heterodininės detekcijos schemoje pasiekiamas virš 40 dB platesnis sistemos dinaminis diapazonas taip gaunant geresnės kokybės THz vaizdus.
- 6) InGaAs „peteliškės“ tipo jutiklių matricos sutrumpina vaizdinimo laiką iki 32 kartų lyginant su vieno jutiklio sistema.
- a) Detektorių atsako pasiskirstymas matricoje skiriasi iki 6 kartų ir mažai priklauso nuo ruošinio auginimo sąlygų.
 - b) Jutikliai veikia nepriklausomai vienas nuo kito dėl pakankamo 400 μ m atstumo tarp gretimų jutiklių, mažų antenos matmenų ir optimalios signalinių takelių topologijos plokštėje.
- 7) Suprojektuotos, pagamintos ir iširtos terahercinės zoninės plokštelės; jas kombinuojant su THz dažnių ruožo rezonansiniais filtrais sukurti fokusuojantys ir dažniui selektyvūs elementai. Juos ištyrus nustatyta, kad:
- a) Sukurtos 5 mm ir 10 mm židinio nuotolio zoninės plokštelės, kurių skaitinė apertūra siekia 0.5 ties 0.6 THz, yra tinkamos aštriam terahercinės spinduliuotės fokusavimui vaizdinimo sistemose.
 - b) Gausinio pluošto Relėjaus ilgis fokusuojant su $f = 5$ mm židinio nuotolio difrakciniais elementais siekia apie 0.7 ir yra kelis kartus trumpesnis nei fokusuojant su $f = 10$ mm židinio nuotolio difrakciniais elementais, o spindulio sąsmaukos plotis abiem atvejais yra panašus ir siekia apie 0.4 mm.
 - c) Integruvus rezonansinius THz filtrus į zoninę plokštelę atsisakoma erdvėje uždengtas zonas laikančiųjų konstrukcijų, tačiau tuo pačiu nepabloginant fokusavimo savybių pasireiškia papildomas selektyvumas dažniui, kurio juostos plotis siekia 0.16 THz.
 - d) Efektyvumo mažėjimas trumpesnio židinio nuotolio kombinuotoje zoninėje plokštėje yra sietinas su mažėjančiu išorinių zonų kryžiuokų bendru atviru plotu.

- e) 4-ių laiptelių fazinė zoninė plokštelė iki 6 kartų efektyviau koncentruoja spinduliuotę nei 2-jų laiptelių FZP. Gaminti daugiau nei 4-ių laiptelių FZP yra neprasminga dėl mažai besikeičiančių fokusavimo savybių ir žymiai sudėtingesnio ir ilgesnio lazerinės abliacijos proceso.
 - f) Panaudojus sukurtus difrakcinius elementus THz vaizdinimo sistemoje galima išskirti 0.6 mm periodo strypelius taip pasiekiant iki 25 % geresnę rezoliuciją lyginant su tos pačios skaitinės apertūros komerciniais paraboliniais veidrodžiais.
 - g) Terahercinė zoninė plokštelė, integruota į sukurtą jutiklių padėklą, padidina jų atsako amplitudę daugiau nei 20 kartų. Tuo pačiu yra sumažinamas vaizdinimo sistemos optinių komponentų skaičius ir palengvinamas jos justiravimas.
- 8) Parodytos plačios terahercinės spinduliuotės koherentinio vaizdinimo taikymo galimybės įvairių saulės elementų gamybos etapų ar jau užbaigtų modulių diagnostikoje.
- a) 86 % tikslumu ties 0.24 THz nustatytas silicio saulės elemente nekokybiškai prijungto kontaktinio takelio profilis bei pozicija.
 - b) Pademonstruota galimybė bekontaktiu būdu kontroliuoti silicio anizotropinio ėsdinimo procesą gaminant atspindžius mažinančią saulės elemento dangą.
 - c) Koherentinis vaizdinimas gali būti naudojamas plonasluoksnių saulės elementų apatinių kontaktų defektų aptikimui aptikti, net ir tuo atveju kai saulės elementų sluoksnis jau užgarintas.
 - d) Pristatytas metodas taikant THz spinduliuotę įvertinti saulės elementų modulio užpildo sluoksnio, esančio už stiklo rėmo, vientisumą.

Naudotos literatūros sąrašas

- [1] Y. S. Lee, *Principles of terahertz science and technology*, Princ. Terahertz Sci. Technol. (Springer Science & Business Media, 2009).
- [2] C. M. Armstrong, 1.1: The truth about terahertz, 2010 IEEE Int. Vac. Electron. Conf., (IEEE, 2010).
- [3] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebei, ir T. Kurner, Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Communications: Concepts and Perspectives, IEEE Antennas Propag. Mag. **49**(6), 24–39 (2007).
- [4] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, ir C. Han, Terahertz band: Next frontier for wireless communications, Phys. Commun. **12**, 16–32 (Elsevier B.V., 2014).
- [5] X.-C. Zhang ir J. Xu, *Introduction to THz Wave Photonics* (Springer US, Boston, MA, 2010).
- [6] T. G. Phillips ir J. Keene, Submillimeter astronomy (heterodyne spectroscopy), Proc. IEEE **80**(11), 1662–1678 (1992).
- [7] A. W. M. Lee, B. S. Wil, S. Kumar, ir J. L. Reno, Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320 /spl times/ 240 microbolometer focal-plane array, IEEE Photonics Technol. Lett. **18**(13), 1415–1417 (2006).
- [8] A. W. M. Lee, Q. Qin, S. Kumar, B. S. Williams, Q. Hu, ir J. L. Reno, Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters), Appl. Phys. Lett. **89**(14), 141125 (AIP Publishing, 2006).
- [9] N. Oda, Uncooled bolometer-type Terahertz focal plane array and camera for real-time imaging, Comptes Rendus Phys. **11**(7-8), 496–509 (2010).
- [10] M. Bolduc, M. Terroux, B. Tremblay, L. Marchese, E. Savard, M. Doucet, H. Oulachgar, C. Alain, H. Jerominek, et al., Noise-equivalent power characterization of an uncooled microbolometer-based THz imaging camera, SPIE Defense, Secur. Sens., M. Anwar, N. K. Dhar, ir T. W. Crowe, Sud., (International Society for Optics and Photonics, 2011).
- [11] J. Meilhan, B. Dupont, V. Goudon, G. Lasfargues, J. Lalanne Dera, D. T. Nguyen, J. L. Ouvrier-Bufferet, S. Pocas, T. Maillou, et al., <title>Active THz imaging and explosive detection with uncooled antenna-coupled microbolometer arrays</title>, SPIE Defense, Secur. Sens., M. Anwar, N. K. Dhar, ir T. W. Crowe, Sud., (International Society for Optics and Photonics, 2011).
- [12] H. L. Mosbacker, J. Alverbros, Z. Zhang, P. Fay, Y. Ni, P. Potet, K. Sertel, G. Trichopoulos, K. Topalli, et al., Initial test results for a real-time, 80 × 64 pixel, 600 GHz–1.2 THz imager, 2011 Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, (IEEE, 2011).
- [13] H. Sherry, J. Grzyb, Y. Zhao, R. Al Hadi, A. Cathelin, A. Kaiser, ir U. Pfeiffer, A 1kpixel CMOS camera chip for 25fps real-time terahertz imaging applications, 2012 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., (IEEE,

- 2012).
- [14] J. Zdanevičius, M. Bauer, S. Boppel, V. Palenskis, A. Lisauskas, V. Krozer, ir H. G. Roskos, Camera for High-Speed THz Imaging, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **36**(10), 986–997 (2015).
 - [15] LUVITERA, <<http://luvitera.com/>> (9 sausio 2016).
 - [16] J. Trontelj, G. Valušis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, A. Sešek, ir A. Švigelj, A high performance room temperature THz sensor, *SPIE Opt. Eng. + Appl.*, (International Society for Optics and Photonics, 2014).
 - [17] A. Sužiedelis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, G. Valušis, ir H. G. Roskos, Giga- and terahertz frequency band detector based on an asymmetrically necked n-n⁺-GaAs planar structure, *J. Appl. Phys.* **93**(5), 3034 (AIP Publishing, 2003).
 - [18] I. Kašalynas, D. Seliuta, R. Simniškis, V. Tamošiūnas, K. Kohler, ir G. Valušis, Terahertz imaging with bow-tie InGaAs-based diode with broken symmetry, *Electron. Lett.* **45**(16), 833 (2009).
 - [19] D. Seliuta, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, S. Balakauskas, Z. Martūnas, S. Ašmontas, G. Valušis, A. Lisauskas, H. G. Roskos, et al., Silicon lens-coupled bow-tie InGaAs-based broadband terahertz sensor operating at room temperature, *Electron. Lett.* **42**(14), 825 (IET Digital Library, 2006).
 - [20] D. Zimdars, J. S. White, G. Stuk, A. Chernovsky, G. Fichter, ir S. Williamson, Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation applications, *Insight - Non-Destructive Test. Cond. Monit.* **48**(9), 537–539 (The British Institute of Non-Destructive Testing, 2006).
 - [21] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, ir D. Zimdars, THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs, *Semicond. Sci. Technol.* **20**(7), S266–S280 (IOP Publishing, 2005).
 - [22] H. Hoshina, Noninvasive mail inspection using terahertz radiation, *SPIE Newsroom*, 3–5 (2009).
 - [23] X.-C. Zhang ir J. Xu, *Introduction to THz Wave Photonics* (Springer US, Boston, MA, 2010).
 - [24] F. Wahaia, G. Valusis, L. M. Bernardo, A. Almeida, J. A. Moreira, P. C. Lopes, J. Macutkevicius, I. Kasalynas, D. Seliuta, et al., Detection of colon cancer by terahertz techniques, *J. Mol. Struct.* **1006**(1-3), 77–82 (2011).
 - [25] Y. C. Sim, I. Maeng, ir J.-H. Son, Frequency-dependent characteristics of terahertz radiation on the enamel and dentin of human tooth, *Curr. Appl. Phys.* **9**(5), 946–949 (2009).
 - [26] M. Tonouchi, Cutting-edge terahertz technology, *Nat. Photonics* **1**(2), 97–105 (2007).
 - [27] C. am Weg, W. von Spiegel, R. Henneberger, R. Zimmermann, T. Loeffler, ir H. G. Roskos, Fast Active THz Cameras with Ranging Capabilities, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* (2009).
 - [28] P. H. Siegel ir R. J. Dengler, Terahertz heterodyne imaging part I: Introduction and Techniques, *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **27**(4), 465–480 (2007).

- [29] V. Pačebutas, A. Bičiūnas, S. Balakauskas, A. Krotkus, G. Andriukaitis, D. Lorenc, A. Pugžlys, ir A. Baltuška, Terahertz time-domain-spectroscopy system based on femtosecond Yb: fiber laser and GaBiAs photoconducting components, *Appl. Phys. Lett.* **97**(3), 031111 (AIP Publishing, 2010).
- [30] TeraSense, <<http://terasense.com/terahertz-technology/basics/>> (9 sausio 2016).
- [31] S. Hargreaves ir R. A. Lewis, Terahertz imaging: materials and methods, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **18**(S1), 299–303 (2007).
- [32] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, ir K. Kawase, Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator, *Appl. Opt.* **43**(30), 5637 (Optical Society of America, 2004).
- [33] P. H. Siegel, Terahertz technology, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50**(3), 910–928 (2002).
- [34] H. Ito, Broadband terahertz-wave detector implementing zero-biased InGaAsP Schottky-barrier diode, *SPIE Sens. Technol. + Appl.*, M. F. Anwar, T. W. Crowe, ir T. Manzur, Sud., (International Society for Optics and Photonics, 2015).
- [35] J. Gou, J. Wang, X. Zheng, D. Gu, H. Yu, ir Y. Jiang, Detection of terahertz radiation from 2.52 THz CO₂ laser using a 320 × 240 vanadium oxide microbolometer focal plane array, *RSC Adv.* **5**(102), 84252–84256 (The Royal Society of Chemistry, 2015).
- [36] I. Kasalynas, A. Svirgelj, J. Adamonis, V. Kornijcuk, R. Adomavicius, A. Krotkus, G. Valusis, A. Seseck, L. Pavlovic, et al., Performance of the antenna coupled microbolometers characterized by the quasi-optical measurements at frequencies 0.1–1.0 THz, 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, (IEEE, 2013).
- [37] A. W. Lee ir Q. Hu, Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array, *Opt. Lett.* **30**(19), 2563 (Optical Society of America, 2005).
- [38] A. Lisauskas, U. Pfeiffer, E. Öjefors, P. H. Bolivar, D. Glaab, ir H. G. Roskos, Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors, *J. Appl. Phys.* **105**(11), 114511 (AIP Publishing, 2009).
- [39] A. Lisauskas, W. von Spiegel, S. Boubanga-Tombet, A. El Fatimy, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, ir H. G. Roskos, Terahertz imaging with GaAs field-effect transistors, *Electron. Lett.* **44**(6), 408 (IET Digital Library, 2008).
- [40] W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, J.-Q. Lü, M. S. Shur, C. A. Saylor, ir L. C. Brunel, Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor, *Appl. Phys. Lett.* **80**(18), 3433 (AIP Publishing, 2002).
- [41] M. Dyakonov ir M. Shur, Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid, *IEEE Trans. Electron Devices* **43**(3), 380–387 (1996).
- [42] D. Glaab, S. Boppel, A. Lisauskas, U. Pfeiffer, E. Öjefors, ir H. G.

- Roskos, Terahertz heterodyne detection with silicon field-effect transistors, *Appl. Phys. Lett.* **96**(4), 4–7 (2010).
- [43] S. Nadar, H. Videlier, D. Coquillat, F. Teppe, M. Sakowicz, N. Dyakonova, W. Knap, D. Seliuta, I. Kašalynas, et al., Room temperature imaging at 1.63 and 2.54 THz with field effect transistor detectors, *J. Appl. Phys.* **108**(5), 054508 (AIP Publishing, 2010).
- [44] F. Schuster, D. Coquillat, H. Videlier, M. Sakowicz, F. Teppe, L. Dussopt, B. Giffard, T. Skotnicki, ir W. Knap, Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors., *Opt. Express* **19**(8), 7827–7832 (Optical Society of America, 2011).
- [45] A. Juozapavičius, L. Ardaravičius, A. Sužiedelis, A. Kozi, J. Gradauskas, J. Kundrotas, D. Seliuta, E. Širmulis, S. Ašmontas, et al., Microwave sensor based on modulation-doped GaAs/AlGaAs structure, *Semicond. Sci. Technol.* **19**(4), S436–S439 (2004).
- [46] D. Seliuta, E. Širmulis, V. Tamošiūnas, S. Balakauskas, S. Ašmontas, A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, G. Valušis, A. Lisauskas, et al., Detection of terahertz/sub-terahertz radiation by asymmetrically-shaped 2DEG layers, *Electron. Lett.* **40**(10), 631 (IET Digital Library, 2004).
- [47] M. J. Malachowski ir J. Zmija, Organic field-effect transistors, *Opto-Electronics Rev.* **18**(2), 121–136 (2010).
- [48] I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Grigelionis, ir G. Valušis, InGaAs-based bow-tie diode for spectroscopic terahertz imaging, *J. Appl. Phys.* **110**(11), 114505 (AIP Publishing, 2011).
- [49] W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday, ir M. C. Kemp, Hidden object detection: security applications of terahertz technology, *Proc. SPIE* **5354**, (2004).
- [50] I. Kasalynas, R. Venckevičius, ir G. Valušis, Continuous Wave Spectroscopic Terahertz Imaging With InGaAs Bow-Tie Diodes at Room Temperature, *IEEE Sens. J.* **13**(1), 50–54 (2013).
- [51] Y. Jiang, K. Vijayraghavan, S. Jung, A. Jiang, J. H. Kim, F. Demmerle, G. Boehm, M. C. Amann, ir M. A. Belkin, Spectroscopic Study of Terahertz Generation in Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers, *Sci. Rep.* **6**, 21169 (Nature Publishing Group, 2016).
- [52] J. Marczewski, W. Knap, D. Tomaszewski, M. Zaborowski, ir P. Zagrajek, Silicon junctionless field effect transistors as room temperature terahertz detectors, *J. Appl. Phys.* **118**(10) (2015).
- [53] S. Wang, T. Yuan, E. D. Walsby, R. J. Blaikie, S. M. Durbin, D. R. S. Cumming, J. Xu, ir X.-C. Zhang, Characterization of T-ray binary lenses, *Opt. Lett.* **27**(13), 1183 (Optical Society of America, 2002).
- [54] B. Voisiat, A. Bičiūnas, I. Kašalynas, ir G. Račiukaitis, Band-pass filters for THz spectral range fabricated by laser ablation, *Appl. Phys. A* **104**(3), 953–958 (2011).
- [55] W. J. Padilla, M. T. Aronsson, C. Highstrete, M. Lee, a. J. Taylor, ir R. D. Averitt, Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* **75**(4), 1–4 (2007).

- [56] Q. Y. Wen, H. W. Zhang, Y. S. Xie, Q. H. Yang, ir Y. L. Liu, Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization, *Appl. Phys. Lett.* **95**(24), 2007–2010 (2009).
- [57] H. Tao, C. M. Bingham, D. Pilon, K. Fan, a C. Strikwerda, D. Shrekenhamer, W. J. Padilla, X. Zhang, ir R. D. Averitt, A dual band terahertz metamaterial absorber, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **43**(22), 225102 (2010).
- [58] M. Lu, W. Li, ir E. R. Brown, High-order THz bandpass filters achieved by multilayer complementary metamaterial structures, *IRMMW-THz 2010 - 35th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, Conf. Guid.* **36**(7), 1071–1073 (2010).
- [59] X. Shen, Y. Yang, Y. Zang, J. Gu, J. Han, W. Zhang, ir T. Jun Cui, Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation, *Appl. Phys. Lett.* **101**(15), 154102 (2012).
- [60] L. Qi ir C. Li, Multi-Band Terahertz Filter with Independence to Polarization and Insensitivity to Incidence Angles, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **36**(11), 1137–1144 (2015).
- [61] D. Hu, X. Wang, S. Feng, J. Ye, W. Sun, Q. Kan, P. J. Klar, ir Y. Zhang, Ultrathin Terahertz Planar Elements, *Adv. Opt. Mater.* **1**(2), 186–191 (2013).
- [62] H. D. Hristov, J. M. Rodriguez, ir W. Grote, The grooved-dielectric Fresnel zone plate: An effective terahertz lens and antenna, *Microw. Opt. Technol. Lett.* **54**(6), 1343–1348 (2012).
- [63] D. R. Reid ir G. S. Smith, A Full Electromagnetic Analysis of Grooved-Dielectric Fresnel Zone Plate Antennas for Microwave and Millimeter-Wave Applications, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55**(8), 2138–2146 (IEEE, 2007).
- [64] D. Kim, Planar Magneto-Dielectric Metasubstrate for Miniaturization of a Microstrip Patch Antenna, *Microw. Opt. Technol. Lett.* **54**(12), 2781–2784 (2012).
- [65] E. D. Walsby, S. Wang, J. Xu, T. Yuan, R. Blaikie, S. M. Durbin, X.-C. Zhang, ir D. R. S. Cumming, Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves, *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **20**(6), 2780 (AVS: Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing, 2002).
- [66] D. N. Black ir J. C. Wiltse, Millimeter-Wave Characteristics of Phase-Correcting Fresnel Zone Plates, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **35**(12), 1122–1129 (1987).
- [67] H. D. Hristov ir M. H. A. J. Herben, Millimeter-wave Fresnel-zone plate lens and antenna, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **43**(12), 2779–2785 (1995).
- [68] H. D. Hristov, *Fresnel Zones in Wireless Links, Zone Plate Lenses and Antennas* (Artech House, Inc., 2000).
- [69] H. C. Kim, H. Ko, ir M. Cheng, High efficient optical focusing of a zone plate composed of metal/dielectric multilayer., *Opt. Express* **17**(5), 3078–3083 (2009).

- [70] W. Withayachumnankul ir D. Abbott, Metamaterials in the terahertz regime, *IEEE Photonics J.* **1**(2), 99–118 (2009).
- [71] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2000).
- [72] G. Račiukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, ir T. Rakickas, Patterning of indium-tin oxide on glass with picosecond lasers, *Appl. Surf. Sci.* **253**, 6570–6574 (2007).
- [73] S. A. Mathews, M. Mirotznik, ir A. Piqué, Development of Novel RF and Millimeter Wave Structures by Laser Direct-write, *J. Laser Micro/Nanoengineering* **4**(3), 177–181 (2009).
- [74] J. A. Fan, C. Wu, K. Bao, J. Bao, R. Bardhan, N. J. Halas, V. N. Manoharan, P. Nordlander, G. Shvets, et al., Self-assembled plasmonic nanoparticle clusters., *Science* **328**(5982), 1135–1138 (2010).
- [75] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, ir Z. Gaburro, Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction., *Science* **334**(6054), 333–337 (2011).
- [76] L. Novotny ir N. van Hulst, Antennas for light, *Nat. Photonics* **5**(2), 83–90 (Nature Publishing Group, 2011).
- [77] A. Taflove ir M. E. Brodwin, Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **23**(8), 623–630 (1975).
- [78] A. Taflove ir S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3-asis leid. (Artech house, 2005).
- [79] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14**, 302–307 (1996).
- [80] J. B. Schneider, Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method, 1–403 (2015).
- [81] J. Marczewski, W. Knap, D. Tomaszewski, M. Zaborowski, ir P. Zagrajek, Silicon junctionless field effect transistors as room temperature terahertz detectors, *J. Appl. Phys.* **118**(10) (2015).
- [82] J. Yamauchi, M. Mita, S. Aoki, ir H. Nakano, Analysis of antireflection coatings using the FD-TD method with the PML absorbing boundary condition, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **8**(2), 239–241 (1996).
- [83] A. Wolkenberg ir T. Przesławski, Charge transport diagnosis by: I–V (resistivity), screening and Debye length, mean free path, Mott effect and Bohr radius in InAs, In_{0.53}Ga_{0.47}As and GaAs MBE epitaxial layers, *Appl. Surf. Sci.* **254**(21), 6736–6741 (2008).
- [84] Z. Dziuba, T. Przesławski, K. Dybko, M. Górska, J. Marczewski, ir K. Regiński, Negative magnetoresistance and impurity band conduction in an In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP heterostructure, *J. Appl. Phys.* **85**(9), 6619 (AIP Publishing, 1999).
- [85] T. Przesławski, A. Wolkenberg, K. Regiński, ir J. Kaniewski, Sensitive In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP (SI) magnetic field sensors, *Phys. status solidi* **1**(2), 242–246 (2004).

- [86] P. E. Smith, S. H. Goss, S. T. Bradley, M. K. Hudait, Y. Lin, S. A. Ringel, ir L. J. Brillson, Atomic layer diffusion and electronic structure at InGaAs/InP interfaces, *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **22**(2), 554 (AVS: Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing, 2004).
- [87] I. Kim, Pd / Ge / Pd / Ti / Au ohmic contact to n-type InGaAs, *Mater. Lett.* **54**(June), 323–327 (2002).
- [88] L. K. J. Vandamme, Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices, *IEEE Trans. Electron Devices* **41**(11), 2176–2187 (1994).
- [89] B. K. Jones, Electrical noise as a reliability indicator in electronic devices and components, *IEE Proc. - Circuits, Devices Syst.* **149**(1), 13–22 (2002).
- [90] W. Melitz, J. Shen, A. C. Kummel, ir S. Lee, Kelvin probe force microscopy and its application, *Surf. Sci. Rep.* **66**(1), 1–27 (2011).
- [91] J. D. Chisum, E. N. Grossman, ir Z. Popović, A general approach to low noise readout of terahertz imaging arrays., *Rev. Sci. Instrum.* **82**(6), 065106 (AIP Publishing, 2011).
- [92] J. W. Wu, C. Y. Chang, K. C. Lin, E. Y. Chang, J. S. Chen, ir C. T. Lee, The thermal stability of ohmic contact to n-type InGaAs layer, *J. Electron. Mater.* **24**(2), 79–82 (1995).
- [93] V. Balynas, A. Krotkus, A. Stalnionis, A. T. Gorelionok, N. M. Shmidt, ir J. A. Tellefsen, Time-resolved, hot-electron conductivity measurement using an electro-optic sampling technique, *Appl. Phys. A Solids Surfaces* **51**(4), 357–360 (1990).
- [94] S. Paul, J. B. Roy, ir P. K. Basu, Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $GaxIn_{1-x}As$, *J. Appl. Phys.* **69**(2), 827 (AIP Publishing, 1991).
- [95] Synopsys TCAD, <<http://www.synopsys.com/tools/tcad/Pages/default.aspx>> (7 balandžio 2016).
- [96] C. Canali, G. Majni, R. Minder, ir G. Ottaviani, Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature, *IEEE Trans. Electron Devices* **22**(11), 1045–1047 (1975).
- [97] M. A. Tarasov, V. D. Gromov, G. D. Bogomolov, E. A. Otto, ir L. S. Kuzmin, Fabrication and characteristics of mesh band-pass filters, *Instruments Exp. Tech.* **52**(1), 74–78 (2009).
- [98] I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Tumonis, B. Voisiat, D. Seliuta, G. Valušis, ir G. Račiukaitis, Reflective terahertz imaging with the TEM01 mode laser beam., *Appl. Opt.* **52**(23), 5640–5644 (Optical Society of America, 2013).
- [99] V. A. Šalna, *Optika*, 2003, <http://www.olimpas.lt/konspekta/i/optika_5sk.pdf> (14 spalio 2015).
- [100] B. Morgan, C. M. Waits, J. Krizmanic, ir R. Ghodssi, Development of a Deep Silicon Phase Fresnel Lens Using Gray-Scale Lithography and

- Deep Reactive Ion Etching, *J. Microelectromechanical Syst.* **13**(1), 113–120 (2004).
- [101] Reinventing stringers : pv-magazine, <http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/reinventing-stringers-_100003049/329/> (2 gruodžio 2015).
- [102] R. Adomavičius, A. Krotkus, R. Šustavičiūtė, G. Molis, J. Kois, S. Bereznev, E. Mellikov, ir P. Gashin, Optoelectronic surface emitters of terahertz radiation from copper chalcogenides, *Electron. Lett.* **43**(25), 1458 (IET Digital Library, 2007).
- [103] N. Hasegawa, T. Loffler, M. Thomson, ir H. G. Roskos, Remote identification of protrusions and dents on surfaces by terahertz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection, *Appl. Phys. Lett.* **83**(19), 3996 (AIP Publishing, 2003).
- [104] W. Withayachumnankul ir M. Naftaly, Fundamentals of Measurement in Terahertz Time-Domain Spectroscopy, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **35**(8), 610–637 (2013).
- [105] T-SPEC series real-time terahertz spectrometer | Ekspla, <<http://www.ekspla.com/product/t-spec-series-real-time-terahertz-spectrometer>> (2 gruodžio 2015).
- [106] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann, ir M. Powalla, New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **19**(7), 894–897 (2011).
- [107] U.S. CIGS PV Roadmap, <<http://www.uspvmc.org/roadmap/index.html>> (3 gruodžio 2015).
- [108] R. Noufi ir K. Zweibel, High-Efficiency CdTe and CIGS Thin-Film Solar Cells: Highlights and Challenges, 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conf. **1**, (IEEE, 2006).
- [109] BYD to bet on dual-glass modules: pv-magazine, <http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/byd-to-bet-on-dual-glass-modules_100018110/> (5 gruodžio 2015).
- [110] Turnkey PV Cell Lines, <<http://www.spirecorp.com/products/pv-cell-lines.cfm>> (3 vasario 2016).
- [111] Jinchen Machinery Company Profile | Production Equipment | China, <http://www.enfsolar.com/directory/equipment/2941/jinchen-machinery?utm_source=Sponsor&utm_medium=crystalline_turn-key_system&utm_content=2941&utm_campaign=profiles_equipment> (3 vasario 2016).
- [112] PV Lines | Meyer Burger Technology AG, <<http://www.meyerburger.com/en/products-systems/industries/photovoltaics/pv-lines/>> (3 vasario 2016).