

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

RIMVYDAS VENCKEVIČIUS

KOMPAKTIŠKO SPEKTROSKOPINIO
TERAHERCINIO VAIZDINIMO SPRENDIMAI,
NAUDOJANT GaAs/AlGaAs IR InGaAs
PUSLAIDININKINIUS NANODARINIUS

Daktaro disertacija
Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2016

Disertacija rengta 2011 - 2016 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro
Puslaidininkų fizikos institute.

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Gintaras Valušis (Fizinių ir technologijos mokslų centras,
fiziniai mokslai, fizika - 02 P).

Mokslinis konsultantas:

dr. Irmantas Kašalynas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai
mokslai, fizika - 02 P).

Padėka

Pirmiausiai norėčiau padėkoti savo mokslinio darbo vadovui Gintarui Valušiiui, be kurio šitas darbas tiesiog neegzistuotų, kadangi jis buvo būtent tas žmogus, kuris ne tik, kad sudomino mane terahercinės spinduliuotės tematika, bet ir suteikė pradžią mano mokslinei karjerai.

Taip pat norėčiau padėkoti savo disertacijos konsultantui Irmantui Kašalynui už neįkainojamas konsultacijas atliekant terahercinio vaizdinimo ir Furjė spektroskopijos eksperimentus, Liudvikui Subačiui už pagalbą atliekant mikrobangų ir nanosekundinių impulsų eksperimentus, Linui Minkevičiui už bandinių kontaktų paruošimą ir visam Fizinių ir technologijos mokslų centro Terahercų fotonikos laboratorijos kolektyvui už šaunų bendradarbiavimą kuriant ir įgyvendinant naujas mokslines idėjas.

Esu dėkingas Kirill Alekseev iš Loughborough universiteto Didžiojoje Britanijoje už pagalbą kuriant teorinius modelius, paaiškinančius eksperimentinius rezultatus.

Nuoširdžiai dėkoju Alvydui Lisauskui ir kitiems Hartmut Roskos grupės kolektyvo nariams už priėmimą labai vertingai vasaros praktikai Gothe universiteto Fizikos institute Vokietijoje.

Ir labiausiai norėčiau padėkoti savo žmonai Juditai ir mamai Elytei už begalinį visapusišką palaikymą ilgais studijų metais.

Turiny

Santrumpų sąrašas	6
Įvadinė dalis	7
1 Vaizdinimo principai terahercinių dažnių ruože	20
1.1 Terahercinė spinduliuotė	20
1.2 Terahercinio dažnio vaizdinimo sistema	21
1.2.1 Terahercinės spinduliuotės generavimo mechanizmai .	22
1.2.2 Terahercinės spinduliuotės detekcijos principai	24
2 Optoelektroniškai žadinami paviršiniai terahercinės spinduliuotės emiteriai	26
2.1 Teminė literatūros apžvalga	26
2.2 Koherentinė terahercinės spinduliuotės emisija iš fotosužadintos elektron-skylinės plazmos	30
2.2.1 GaAs/AlGaAs <i>p-i-n-i</i> emiterio aprašymas	31
2.2.2 Paviršinių emiterių tyrimo metodika	33
2.2.3 Paviršinių emiterių tyrimo rezultatai	35
3 Blocho stiprinimo apraiška mikrobangų ruože supergardeniniame diode su kontroliuojama injekcija	41
3.1 Teminė literatūros apžvalga	41
3.2 Kontroliuojamos injekcijos supergardeninio diodo idėja	46
3.2.1 Elektrinio stabilumo kriterijus	46
3.2.2 Stabilumo taškai ir Kroemer'io intervalo įvedimas . .	47
3.2.3 Elektrinio lauko erdvinis profilis mažų srovių atveju .	48
3.3 Bandiniai ir eksperimentinės metodikos	51
3.3.1 Supergardelės architektūra	51
3.3.2 Nanosekundinių impulsų ir mikrobangų metodikos . .	52

3.4	Stipraus elektrinio lauko sąlygotų mikrobangų pralaidumo pokyčio tyrimo rezultatai	55
4	Terahercinės spinduliuotės šaltinių spinduliuojamos modos bei jų įtaka vaizdinimui	64
4.1	Teminė literatūros apžvalga	64
4.2	Eksperimento aprašymas	66
4.3	Tyrimo rezultatai	68
5	Mažų matmenų terahercinės spinduliuotės nekoherentinių detektorių taikymas spektroskopinėse terahercinėse vaizdinimo sistemose	73
5.1	Teminė literatūros apžvalga	73
5.2	Ekperimentinės metodikos ir bandiniai	78
5.2.1	Furjė spektroskopija	78
5.2.2	Terahercinis vaizdinimas	79
5.2.3	Bandiniai	81
5.3	InGaAs peteliškės formos diodų taikymas spektroskopiniam vaizdinimui iki 2.52 THz	83
5.4	Spektroskopinis vaizdinimas su rezonansiniais CMOS FET detektoriais	91
5.5	Mikrobolometrinių detektorių taikymas terahercinių dažnių spektroskopinėse vaizdinimo sistemose su optoelektroniniais spinduliuotės šaltiniais.	95
	Pagrindiniai rezultatai ir išvados	103
	Literatūros šaltiniai	105

Santrumpų sąrašas

2DEG	dvimatės elektronų dujos, angl. <i>two dimensional electron gas</i>	NDM	neigiamas diferencialinis judris, angl. <i>negative differential mobility</i>
BO	Blocho osciliacijos, angl. <i>Bloch oscillations</i>	NDV	neigiamas diferencialinis greitis, angl. <i>negative differential velocity</i>
BT	peteliškės formos, angl. <i>bow-tie</i>	NT	nitrotoluenas, angl. <i>nitrotoluene</i>
DLW	tiesioginis lazerinis rašymas, angl. <i>direct laser writing</i>	OR	optinis lyginimas, angl. <i>optical rectification</i>
DNB	dinitrobenzenas, angl. <i>dinitrobenzene</i>	PETN	pentritas, pilnas pavadinimas pentaeritritoltetranitratas, angl. <i>penthrite, pentaerythritol tetranitrate</i>
DNT	dinitrotoluenas, angl. <i>dinitrotoluene</i>	PO	plazmos osciliacijos
EFIOR	elektriniu lauku indukuotas optinis lyginimas, angl. <i>electric field induced optical rectification</i>	PTFE	politetrafluoretilenas, angl. <i>Polytetrafluoroethylene</i>
HDPE	aukšto tankio polietilenas, angl. <i>High-density polyethylene</i>	QCL	kvantinis kaskadinis lazeris, angl. <i>quantum cascade laser</i>
HMX	oktagenas, angl. <i>octogen</i>	RDX	heksogenas, sprogstamoji medžiaga, angl. <i>hexogen</i>
IR	infraraudonoji spinduliuotė, angl. <i>infrared radiation</i>	SC	sacharozė, angl. <i>sucrose</i>
MPE	molekulinių pluoštelių epitaksija, angl. <i>molecular beam epitaxy</i>	SL	supergardelė, angl. <i>superlattice</i>
		TA	vyno rūgštis, angl. <i>tartaric acid</i>
		THz	terahercinis dažnis
		TNT	trinitrotoluenas, angl. <i>trinitrotoluene</i>
		VACh	voltamperinė charakteristika, angl. <i>I-V characteristic</i>

Įvadinė dalis

Įvadas

Terahercinė (THz) spinduliuotė, dar vadinama submilimetrinėmis bangomis arba tolimaisiais infraraudonaisiais spinduliais, atitinka elektromagnetinių bangų spektro dažnių ruožą tarp 0.1 ir 30 THz (1 THz yra 10^{12} Hz, arba 4 meV). Šis dažnių ruožas yra įsiterpęs tarp elektronikos, kur radijo ir mikrobangų spinduliuotė generuojama ar stiprinama elektroniniais prietaisais, ir fotonikos, kur optinės technologijos išnaudoja kvantinės mechanikos principus. Deja, didinant dažnį, elektroninių prietaisų efektyvumas greitai mažėja dėl relaksacijos ribojimo. Iš kitos pusės, naudojant optinius metodus prietaisų veikimas tampa neefektyvūs, nes energetinis atstumas THz ruože yra mažas, todėl tampa sunku pasiekti krūvininkų inversiją. Dar daugiau, dėl tarppaviršinio šiurkštumo (angl. *interface roughness*) spektrinių linijų išplitimas tampa didesnis nei energetinis atstumas tarp inversiją sudarančių lygmenų, tuo būdu atsiranda dar viena kliūtis prietaisų veikimui. Dėl minėtų priežasčių, prietaisų kūrimas buvo didelė problema, todėl kurį laiką šis ruožas buvo vadinamas „THz duobe“ (angl. *THz gap*). Tačiau THz spinduliuotės generavimo ir detekcijos metodų vystymasis pastaruju metu pakeitė situaciją iš esmės. Impulsinių THz laikinės skyros (angl. *time-domain*) ir pastovios veikos dažninės skyros (angl. *frequency-domain*) sistemų ištobulinimas iki komercinių produktų leidžia atlikti įvairius spektroskopinius tyrimus THz dažnių ruože. Šiose sistemose naudojami optiškai žadinami emiteriai ir detektoriai dėl koherentinių detekcijos principų leidžia pasiekti itin didelį sistemų dinaminį diapazoną, tačiau koherentinis matavimo būdas, kuomet užrašoma impulso laikinė forma, labai riboja veikimo spartą. Šis klausimas tampa ypač aktualus THz vaizdų užrašymo (angl. *terahertz imaging*) sistemoms. Kadangi THz bangos gali prasiskverbti pro eilę medžiagų blokuojančių regimąją šviesą ir duoda daug didesnę skiriamąją gebą nei mikrobangos, tai suteikia galimybę užrašyti objektų vaizdus

prasiskverbiant pro viršutinius pakavimo ar apsauginius sluoksnius. Galimybė užrašyti vaizdus išplečia THz spinduliuotės taikymo perspektyvas įvairiuose srityse, tokiose kaip: biologija, farmacija, medicina, pramoninė nedestruktyvioji kokybės kontrolė, medžiagų mokslas, aplinkos atmosferos stebėjimas, saugumas, astronomija, moksliniai tyrimai. DNA tyrimai, vėžinių susirgimų diagnostika, kokybės kontrolė, sprogstamų medžiagų detekcija ir kt. yra tik dalis THz vaizdinimo taikymo pavyzdžių [1]. Tačiau praktinėms reikmėms svarbu surasti sprendimus, kurie būtų kompaktiški, patogūs naudoti, nereikalaujantys papildomo optinio derinimo. Čia patogų būtų atsisakyti koherentinės detekcijos, bet tada reiktų ieškoti naujų sprendimų arba didesnės spinduliuojamos galios emiteriams kurti, arba jautresniems detektoriams taikyti, nes esamų optoelektroninių emiterių vidutinė galia labai maža, o optoelektroninių detektorių jautris tiesioginėje detekcijoje yra nedidelis. Taigi, aktuali tampa THz dažnių spinduliuotės generuojamos galios didinimo uždavinys ne tik THz šaltiniams, bet ir kompaktiškiems stiprintuvams. Tuo pačiu svarbiu THz vaizdinimo sistemų uždaviniu tampa ir supratimas apie emituojamos modos įtaką THz vaizdo kokybei, ypač tai pasidaro aktualu prietaisuose, kurių aktyviosios srities matmenys pasidaro mažesni nei emituojamas bangos ilgis. Praktikoje kovojant su netaisyklinomis šaltinių modomis taikomi papildomi optiniai komponentai pluošto korekcijai, kas įneša nepageidaujamų papildomų galios nuostolių.

Iš šiuolaikinių puslaidininkinių THz šaltinių kol kas daugiausia vilčių teikia kambario temperatūroje veikiantys skirtuminio dažnio kvantiniai kaskadiniai lazeriai [2]. Deja, jie veikia ties 3 THz, o THz vaizdinimui dėl didelio įsiskverbimo gylio itin svarbus dažnių ruožas žemiau 1 THz, nepaisant didelio medžiagų inžinerijos progreso, kol kas neturi kvantinio kaskadinio šaltinio [3,4]. Nuo pat molekulių pluoštelių epitakcijos technologijų atsiradimo didelės mokslininkų pastangos buvo sutelktos dar 1971 m. pasiūlytos Esaki-Tsu idėjos panaudoti dirbtines medžiagas, puslaidininkines supergardeles, kaip terpę naujiems prietaisams kurti ir fizikiniams reiškiniams tirti [5]. Vienas iš tokių reiškinių yra Blocho osciliacijos (BO). Nors optiškai žadinamos BO ir buvo pastebėtos kvantinių mušimų tarp Wannier-Starko būsenų puslaidininkinėje supergardelėje [6], tačiau iki pat šiol tyrimų, atskleidžiančių elektriniu lauku kaupiamų BO ypatybes, nebuvo atlikta.

Ypatingą vietą praktiniuose taikymuose užima spektroskopinio vaizdinimo technologiniai sprendimai, leidžiantys nustatyti medžiagų sudėtį, tie-

siogiai nematuojuant jų spektro. Tam reikalingi detektoriai galintys veikti plačiame dažnių intervale arba rezonansiniai kelių spalvų jutiklių masyvai. Šiandien egzistuoja komerciniai pakankamai jautrių kompaktiškų jutiklių sprendimai, netgi realaus laiko kameros. Tačiau tokių komponentų per didelė kaina ir ribotas patikimumas neleidžia jų pritaikyti tiesioginiams praktiniams taikymams. Reikalingi jautrūs, kompaktiški, greiti ir elektriškai atsparūs jutikliai, tinkami jutiklių masyvų formavimui, be to pageidautina, kad būtų gaminami įsisavintomis pramoninės gamybos technologijomis arba jų gamybos technologija būtų pakankamai paprasta ir nebrangi.

Šis darbas skirtas naujų sprendimų paieškai kompaktiškoms terahercinių dažnių ruožo vaizdinimo sistemoms. Jis apima visus jos komponentus - emiterius ir stiprintuvus, modų kokybės problemą bei kompaktiškų kambario temperatūros jutiklių spektroskopiniam vaizdinimui tyrimus. Šaltinių problematikoje ištirtas pirmą kartą pagamintas paviršinis emiteris pagal A. Reklaičio *p-i-n-i*-tipo AlGaAs/GaAs heterostruktūros idėją [7]. Didelis dėmesys skirtas nuosekliam diodų su AlGaAs/GaAs supergardele tyrimui, kurie skirti sukurti aplinką, tinkančią BO pasireiškimui. Taipogi atlikti tyrimai aiškinantis daugiamodžio šaltinio įtaką THz vaizdų užrašymui, pasiūlytas optinis sprendimas leidžiantis pagerinti tokių sistemų vaizdinimo skiriamąją gebą. Ieškant naujų sprendimų spektroskopiniam vaizdinimui, buvo pasiūlyti inovatyvūs kompaktiški nekoherentinių detektorių sprendimai. Darbe pirmą kartą pademonstruotas spektroskopinis vaizdinimas ir atpažinimas su plačiajuosčiais asimetriškai susiaurintais InGaAs jutikliais ir specialiai sukurtais THz jutikliais pagamintais, rezonansinių lauko tranzistorių pagrindais. Optoelektroninių emiterių pagrindu veikiančioms sistemoms buvo pritaikyti titano mikrobolometrų detektoriai, kaip alternatyva koherentinės detekcijos principais veikiančioms detektoriams. Pasiūlyti THz vaizdinimo sistemų sprendimai atsispindi pateiktuose eksperimentiniuose rezultatuose.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Pagrindinis šio **darbo tikslas** yra surasti, ištirti ir pritaikyti naujus technologinius sprendimus kompaktiškomis kietojo kūno komponentų pagrindu kuriamoms terahercinių dažnių ruožo vaizdinimo sistemoms, veikiančiomis kambario temperatūroje.

Darbo tikslui pasiekti buvo keliami tokie **uždaviniai**:

1. Eksperimentiškai ištirti paviršinį terahercinės spinduliuotės emiterį - delta-profilu legiruotą *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterostruktūrą – žadinant ją femtosekundinės trukmės optiniais impulsais ir palyginti jos veikimo charakteristikas su InGaAs ir InAs paviršiniais emiteriais.
2. Sukurti elektriškai kaupinamą aplinką Blocho stiprinimo apraiškai stebėti:
 - a) pritaikyti sub-kritinių Gunn'o stiprintuvų kontroliuojamos injekcijos teorinius principus diodui su supergardele;
 - b) teoriškai nustatyti reikalingas sąlygas vienalyčiam elektriniui laukui puslaidininkinėje supergardenėje sudaryti;
 - c) pritaikyti nanosekundinės trukmės nuostovios srovės impulsų bei mikrobangų metodikas stiprių elektrinių laukų sąlygotiems reiškiniams puslaidininkinėse supergardenėse tirti, sukurti automatinio duomenų surinkimo kompiuterines programas;
 - d) ištirti stipraus elektrinio lauko sąlygotus ypatumus mikrobangų ruože puslaidininkinėse GaAs/AlGaAs supergardenėse.
3. Ištirti vaizdinimo sistemų su aukštesnės eilės modos terahercinės spinduliuotės šaltiniu skiriamąją gebą ir panaudojimo galimybes.
4. Ištirti inovatyvių kompaktiškų terahercinės spinduliuotės detektorių pritaikymo galimybes spektroskopiniam vaizdinimui tiesioginėje detekcijoje.

Mokslinis naujumas

Darbo mokslinis naujumas remiasi šiais pagrindiniais rezultatais.

1. Eksperimentiškai ištirta pirmą kartą pagaminta A. Reklaičio (Phys. Rev. B 77, 153309, 2008) pasiūlyta delta-profilu legiruota *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterostruktūra, skirta efektyviam terahercinės spinduliuotės generavimui žadinant ją femtosekundinės trukmės optiniais

- impulsais. Nustatyta, kad tokie dariniai yra efektyvūs terahercinės spinduliuotės emiteriai, kurių našumas prie tam tikrų sąlygų geresnis nei InGaAs ir InAs paviršinių emiterių.
2. Teoriškai ir eksperimentiškai ištirti diodai su stipriai susietomis siliciu legiruotomis GaAs/AlGaAs supergardelėmis su injektuojančiais/ blokuojančiais kontaktais, skirti Blocho stiprinimui tinkančios aplinkos sudarymui:
 - a) pasinaudojant kontroliuojamos injekcijos teoriniais principais subkritiniams Gunn stiprintuvams, sukurtas analitinis teorinis modelis diodui su supergardele, leidžiantis surasti sąlygas, kada tokioje struktūroje galima sukurti vienalytį elektrinį lauką, reikalingą Blocho stiprinimui pasireikšti;
 - b) eksperimentiškai parodyta, jog kontroliuojamos injekcijos GaAs/AlGaAs supergardių diode kambario temperatūroje mikrobangų ruože gali būti stebimas Blocho stiprinimas.
 3. TEM₀₁ lazerio moda buvo pritaikyta silicio saulės elementų vaizdinimui. Pademonstruota, jog atitinkamos fokusuojančios optikos parinkimas leidžia užrašyti aukštos kokybės vaizdus esant daugiamodžiam lazerio veikimui.
 4. Inovatyvūs kompaktiški THz spinduliuotės detektoriai buvo pritaikyti tiesioginės detekcijos spektroskopiniam vaizdinimui :
 - a) panaudojant spektroskopinį vaizdinimą dažnių ruože 0.5-2.52 THz su asimetriškai susiaurintais InGaAs diodais ir komponentinės analizės metodus pademonstruotas sprogmenų imitatorių – sacharozės ir vyno rūgšties – komponentų nustatymas;
 - b) nustatyta, kad terahercinių dažnių ruožas spektroskopiniam vaizdinimui, lyginant su InGaAs „peteliškės“ tipo diodais, gali būti išplėstas iki 4.25 THz panaudojant plazmoninio maišymo reiškinius lauko tranzistoriuose, naudojant 90 nm CMOS technologiją ir integruojant plokštelės tipo antenas;
 - c) nekoherentiniai kambario temperatūros detektoriai – titano mikrobolometrai – pritaikyti spektroskopinio vaizdinimo sistemoje su optoelektroniniu terahercinės spinduliuotės emiteriu.

Ginamieji teiginiai

1. Femtosekundinio lazerio impulsais žadinami delta-legiruoti *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterodariniai yra efektyvūs terahercinės spinduliuotės emiteriai, kurių galia viršija InGaAs ir InAs paviršinių emiterių emisiją, jei optinio žadinimo srautai neviršija $0.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir $7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, esant atitinkamiems 82 MHz ir 1 kHz žadinančio lazerio pasikartojimo dažniams.
2. Asimetriniai injektuojantys/blokuojantys kontaktai – Schottky kontaktas ir heterosandūra – leidžia sukurti vienalytį elektrinį lauką GaAs/AlGaAs supergardelėje esant atitinkamam pridėtos išorinės įtampos intervalui. Esant šioms sąlygoms stipriai susietos GaAs/AlGaAs supergardelės diode kambario temperatūroje mikrobangų ruože gali būti stebimas Blocho stiprinimas.
3. Trumpo židinio nuotolio fokusuojančio optikos elemento panaudojimas vaizdinimo sistemoje su šaltiniu spinduliuojančiu TEM_{01} modos terahercinės spinduliuotės pluoštą leidžia užrašyti kokybiškus terahercinius vaizdus su rezoliucija artima difrakcijos ribai.
4. InGaAs „peteliškės“ formos diodai yra tinkami kambario temperatūros aktyviam spektroskopiniui vaizdinimui teraherciniame dažnių ruože, jei yra naudojami milivatų eilės galios emiteriai. Vaizdinimo dažnių ruožo viršutinę ribą apibrėžia elektronų impulso relaksacijos laikas. Dažnių ruožas spektroskopiniam vaizdinimui gali būti išplėstas panaudojant plazmoninio maišymo reiškinius nanometriniuose lauko tranzistoriuose.
5. Nekoherentiniai kambario temperatūros detektoriai yra tinkami naudoti spektroskopinio vaizdinimo sistemose su optoelektroniniais terahercinės spinduliuotės emiteriais jei jų triukšmų ekvivalentinė galia yra $10 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ eilės.

Autoriaus indėlis

Didžioji dalis eksperimentinių matavimų buvo atlikta paties disertacijos autoriaus Fizinių ir technologijos mokslų centro (FTMC) Optoelektronikos skyriuje. Paviršiniai THz emiteriai – delta-legiruoti *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterodariniai buvo tiriami stažuotės metu Fizikos institute J.W. Goethe universitete (grupės vadovas, prof. H.G. Roskos). Stažuotės metu disertacijos autorius prisidėjo ruošiant eksperimentines metodikas, atliekant matavimus bei ruošiant rezultatus publikacijai su aukšto pasikartojimo dažnio femtosekundinių impulsų lazerine sistema. Su Blocho stiprinimu susijusiose tyrimuose autorius ruošė matavimo metodikas, kūrė duomenų nuskaitymo kompiuterines programas, atliko dalį eksperimentinių matavimų ir teorinių skaičiavimų stažuotės Loughborough universitete metu bei prisidėjo ruošiant rankraštį publikacijai. Atliekant terahercinio vaizdinimo tyrimus autorius atliko didžiąją dalį eksperimentinių matavimų, įskaitant eksperimentinės metodikos tobulinimą ir greito veikimo vaizdų užrašymo sistemos kūrimą, analizavo ir apdoravo eksperimentinius duomenis, prisidėjo prie publikacijų ruošimo. Doktorantūros studijų metu disertacijos autorius vadovavo L. Tumonio mokslinei praktikai, susijusiai su disertacijos tema, pagal projektą „Studentų mokslinės veiklos skatinimas“.

Dalis rezultatų yra gauti bendradarbiaujant su kitomis laboratorijomis. AlGaAs/GaAs ir InGaAs heterostruktūros buvo užaugintos molekulių pluoštelių epitaksijos būdu Taikomosios kietojo kūno fizikos Fraunhofer institute (grupės vadovas dr. K. Köhler). Paviršinių emiterių tyrimas buvo atliekamas Fizikos institute Gothe universitete (grupės vadovas prof. H.G. Roskos). Šioje grupėje taip pat buvo pagaminti nanometrinių matmenų lauko tranzistoriai, skirti terahercinei spinduliutei detektuoti. K. Alekseev iš Loughborough universiteto parengė analitinį teorinį modelį diodui su supergardele, reikalingą surasti sąlygas vienalyčiam elektriniam laukui struktūroje suformuoti. Mikrobolometrų jutikliai buvo pagaminti Liublianos universitete (grupės vadovas prof. J. Trontelj). Bendradarbiaujant su Lazerinio mikroapdirbimo technologijų laboratorija (grupės vadovas dr. G. Račiukaitis) FTMC buvo pagaminti taikiniai vaizdinimo skyros įvertinimui. Kartu su prof. A. Krotkaus vadovaujama grupe (FTMC) buvo sukurta spektroskopinio vaizdinimo sistema, kurioje optoelektroninių šaltinių spinduliutei detektuoti buvo pritaikyti mikrobolometrų jutikliai.

Publikacijų sąrašas

Disertacijos rezultatai buvo publikuoti šiuose ISI publikacijose:

- A1 M. Bauer, R. Venckevičius, I. Kašalynas, S. Boppel, M. Mundt, L. Minkevičius, A. Lisauskas, G. Valušis, V. Krozer, H. Roskos, Antenna-coupled field-effect transistors for multi-spectral terahertz imaging up to 4.25 THz, *Optics express* **22**(16), 19235–19241 (2014).
- A2 I. Kašalynas, R. Venckevičius, G. Valušis, Continuous wave spectroscopic terahertz imaging with ingaas bow-tie diodes at room temperature, *Sensors Journal, IEEE* **13**(1), 50–54 (2013).
- A3 I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Tumonis, B. Voisiat, D. Seliuta, G. Valušis, G. Račiukaitis, Reflective terahertz imaging with the TEM₀₁ mode laser beam, *Appl. Opt.* **52**(23), 5640–5644 (2013).
- A4 I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, I. Grigelionis, G. Valušis, InGaAs-based bow-tie diode for spectroscopic terahertz imaging, *Journal of Applied Physics* **110**(11), 114505 (2011).
- A5 A. Lisauskas, A. Reklaitis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, G. Grigaliūnaite Vonseviciene, H. Maestre, J. Schmidt, V. Blank, M. Thomson, et al., Experimental demonstration of efficient pulsed terahertz emission from a stacked GaAs/AlGaAs *p-i-n-i* heterostructure, *Applied Physics Letters* **98**(9), 091103 (2011).
- A6 L. Subačius, R. Venckevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, J. Schmidt, A. Lisauskas, H. Roskos, K. Alekseev, K. Köhler, Strong electric field driven carrier transport non-linearities in *n*-type GaAs/AlGaAs superlattices, *Acta Physica Polonica A* **119**(2), 167–169 (2011).

Patentai ir kitos publikacijos (ne ISI):

- B1 R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, Bow-tie diodes for terahertz imaging: Comparative study, *Photonics Letters of Poland* **4**(3), pp–103 (2012).
- B2 I. Kašalynas, R. Venckevičius, R. Adomavičius, G. Valušis, A. Krotkus, Terahercinių dažnių juostos vaizdinimo sistema, Lietuvos patentas Nr. 6219, paraiškos padavimo data 2013-11-15, patento paskelbimo data 2015-09-25.
- B3 R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, Color photography at terahertz frequencies, *SPIE Newsroom*, 2016.

Konferencijų pranešimai disertacijos tema:

- C1 G. Valušis, L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, R. Venckevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, D. Seliuta and G. Račiukaitis, Compact optics and detectors for room temperature terahertz imaging systems, 51th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and The Workshop on Terahertz and Microwave Systems, Bled, Slovenia, 2015.
- C2 G. Valušis, I. Kašalynas, D. Seliuta, R. Venckevičius, L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, B. Voisiat and G. Račiukaitis, Compact Spectroscopic Terahertz Imaging Systems: Sensors and Optics Design, Extended abstracts of 3th international symposium on Microwave/THz science and applications and 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience, Okinawa, Japan, 2015.
- C3 I. Kašalynas, R. Venckevičius, R. Adomavičius, G. Valušis, A. Krotkus, A. Švigelj, A. Sešek, L. Pavlovic, J. Trontelj, M. Vinciūnas, Antenna-coupled microbolometer-based THz detectors for room temperature beam profile imaging of the photoconductive THz pulse emitters, 39th international conference on infrared, millimeter, and terahertz waves, Tuscon, AZ, 2014.
- C4 J. Trontelj, G. Valušis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, A. Sešek, A. Švigelj, A high performance room temperature THz sensor, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IV, San Diego Convention Center, San Diego, United States; Proc. SPIE 91990K, 2014.
- C5 I. Kašalynas, L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, G. Valušis, Multispectral THz imaging with antenna-coupled microbolometers, transistors, and bow-tied diodes, 2nd annual conference of COST action MP1204 and international conference on semiconductor Mid-IR materials and optics : Marburg, Germany, 2014.
- C6 I. Kašalynas, A. Švigelj, R. Venckevičius, R. Adomavičius, A. Sešek, L. Pavlovic, G. Valušis, J. Trontelj, Antenna-coupled micro-bolometers for sensitive real-time THz measurements at room temperature, 20 years of quantum cascade laser anniversary workshop : Zurich, Switzerland, 2014.
- C7 I. Kašalynas, L. Minkevičius, R. Venckevičius, D. Seliuta, G. Valušis, Multispectral terahertz imaging using compact room temperature ope-

- rating sensors, GDR-I and GDR workshop on "Semiconductor sources and detectors of THz radiation" : Montpellier, France, 2013.
- C8 I. Kašalynas, R. Venckevičius, L. Minkevičius, G. Valušis, Multispectral terahertz imaging with the compact THz detectors designed for room temperature operation / International conference on THz and mid infrared radiation and applications to cancer detection using laser imaging : workgroup meetings of COST actions MP1204 and BM1205 : Sheffield, United Kingdom, 2013.
- C9 I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta and G. Valušis, Imaging and Spectroscopy of Explosives in THz Range, NATO Science and Technology Board Symposium "Innovation for C-IED" (Counter-Improvised Explosive Devices), Military Academy, Vilnius, Lithuania, 2013.
- C10 I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, L. Tumonis, and G. Valušis, Spectroscopic terahertz imaging with a compact room temperature THz detectors, Proceedings International THz conference 2013, Villach, Austria, 2013.
- C11 S. Boppel, A. Lisauskas, M. Bauer, M. Mundt, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, B. Khamaisi, E. Socher, G. Valušis, V. Krozer, H.G. Roskos, Optimized Tera-FET Detector Performance Based On an Analytical Device Model Verified Up To 9 THz, (invited), Programme and Proceedings of the 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz on the Rhine, Germany, 2013.
- C12 B. Voisiat, L. Tumonis, D. Seliuta, G. Valušis, G. Račiukaitis, I. Kašalynas, R. Venckevičius, High Resolution Reflective Terahertz Imaging With the TEM01 Mode Laser Beam and Large Area Detector, Programme and Proceedings of the 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz on the Rhine, Germany, 2013.
- C13 L. Minkevičius, K. Madeikis, I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, and G. Valušis, Discrete spectrum terahertz imaging using bow-tie diodes: optimized antenna designs and arrays, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IV, San Diego Convention Center, San Diego, California, United States; SPIE Proc. Vol. 8846, 2013.
- C14 R. Venckevičius, L. Tumonis, I. Kašalynas, G. Valušis, Vaistų ir Sprogmenų Simuliatorių Atpažinimas Teraherciniame Dažnių Ruože, 40-oji Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija, Vilnius, Lietuva, 2013.

- C15 R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, Greitaveikių BT-diodų pritaikymas vaizdinimui teraherciniame dažnių ruože, FTMC doktorantų konferencija “FizTech 2012”, Vilnius, Lietuva, 2012.
- C16 L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, G. Molis, A. Krotkus, S. Balakauskas, R. Venckevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis and V. Tamošiūnas, Solar cell imaging and characterization by terahertz techniques, SPIE 2012 Optics+Photonics, San Diego, California, USA, rugpjūčio 12-16, 2012.
- C17 L. Minkevičius, R. Suzanovičienė, G. Molis, A. Krotkus, S. Balakauskas, R. Venckevičius, I. Kašalynas, I. Šimkiene, G. Valušis, and V. Tamošiūnas, Terahertz Techniques for Solar Cell Imaging, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, 2012.
- C18 G. Valušis, L. Minkevičius, I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, V. Tamošiūnas, A. Lisauskas, S. Boppel, H.G. Roskos, K. Köhler, Heterodyne and spectroscopic room temperature terahertz imaging using InGaAs bow-tie diodes, 2012 19th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications, Warsaw, Poland, 2012.
- C19 L. Tumonis, R. Venckevičius, Terahertz imaging in the reflection Geometry, Open readings, Vilnius, Lietuva, 2012.
- C20 I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, G. Valušis, Spectroscopic terahertz imaging with the InGaAs-based bow-tie diode, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Houston, Texas, USA, 2011.
- C21 R. Venckevičius, I. Kašalynas, Terahertz imaging of the objects containing sucrose and tartaric acid, Open readings 2011 : 54th scientific conference for young students of physics and natural sciences : Vilnius, Lithuania, 2011.
- C22 R. Venckevičius, I. Kašalynas, Furje spektroskopija ir vaizdų užrašymas teraherciniame dažnių ruože, Studentų moksliniai darbai, Vilnius, Lietuva, 2011.
- C23 L. Subačius, R. Venckevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, J. Schmidt, A. Lisauskas, H.G. Roskos, K. Alekseev, K. Köhler, Strong electric field driven carrier transport non-linearities in *n*-type GaAs/AlGaAs superlattices, 14th International symposium on ultrafast phenomena in semiconductors : Vilnius, Lietuva 2010.

C24 G. Valušis, R. Venckevičius, I. Kašalynas, A. Reklaitis, H. Maestre, et.al, Efficient $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructure-based emitter for pulsed terahertz radiation, communication at NATO Research and Technology Organization, SET-159 Specialists Meeting on Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defence and Security, Vilnius, Lithuania, 2010.

Su disertacija nesusijusios publikacijos:

D1 F. Wahaiia, I. Kašalynas, R. Venckevičius, D. Seliuta, G. Valušis, A. Urbanowicz, G. Molis, F. Carneiro, C. D. C. Silva, P. L. Granja, Terahertz absorption and reflection imaging of carcinoma-affected colon tissues embedded in paraffin, *Journal of Molecular Structure* **1107**, 214–219 (2016).

D2 A. Abina, U. Puc, A. Jeglič, J. Prah, R. Venckevičius, I. Kašalynas, G. Valušis, A. Zidanšek, Qualitative and quantitative analysis of calcium-based microfillers using terahertz spectroscopy and imaging, *Talanta* **143**, 169–177 (2015).

D3 J. Požela, K. Požela, A. Šilėnas, E. Širmulis, I. Kašalynas, V. Jucienė, R. Venckevičius, Thermally stimulated 3–15 thz emission at plasmon-phonon frequencies in polar semiconductors, *Semiconductors* **48**(12), 1557–1561 (2014).

D4 L. Minkevičius, K. Madeikis, B. Voisiat, I. Kašalynas, R. Venckevičius, G. Račiukaitis, V. Tamošiūnas, G. Valušis, Focusing performance of terahertz zone plates with integrated cross-shape apertures, *J Infrared Milli Terahz Waves* **35**(9), 699–702 (2014).

D5 A. Lisauskas, M. Bauer, S. Boppel, M. Mundt, B. Khamaisi, E. Socher, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, V. Krozer, H. G. Roskos, Exploration of Terahertz Imaging with Silicon MOSFETs, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**(1), 63–80 (2014).

D6 L. Minkevičius, B. Voisiat, A. Mekys, R. Venckevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, G. Račiukaitis, V. Tamošiūnas, Terahertz zone plates with integrated laser-ablated bandpass filters, *Electronics Letters* **49**(1), 1 (2013).

Disertacijos išdėstymas

Disertacija susideda iš įvadinės dalies, penkių skyrių ir rezultatų apibendrinimo. Įvadinėje dalyje aprašyta temos aktualumas, motyvacija tyrimams, pagrindinis tikslas ir uždaviniai, mokslinis naujumas, ginamieji teiginiai ir autoriaus indėlis. Pirmas disertacijos skyrius skirtas pagrindiniams vaizdinimo terahercinių dažnių ruože principams aptarti. Tuo tarpu pagrindiniai disertacijos rezultatai išdėstyti 2-5 skyriuose. Rezultatai suskirstyti į atskirus skyrius pagal tiriamus vaizdinimo sistemos komponentus. 2-ame ir 3-iaame skyriuose nagrinėjami nauji sprendimai terahercinei spinduliuotei generuoti ir stiprinti. 4-ą skyrių sudaro tyrimas apie optinių komponentų parinkimą efektyviam spinduliuotės valdymui. 5-tame skyriuje pateikti naujų inovatyvių detektorių taikymo spektroskopiniam vaizdinimui rezultatai. Paskutinėje disertacijos dalyje pateikti pagrindiniai rezultatai ir išvados.

1 Vaizdinimo principai terahercinių dažnių ruože

1.1 Terahercinė spinduliuotė

Terahercinė spinduliuotė (THz) atitinka elektromagnetinių bangų dažnių ruožą tarp mikrobangų ir infraraudonųjų spindulių. Literatūroje THz ruožas dažnai apibūdinamas dažnių sritimi nuo 0.1 iki 10 THz, kai kuriais atvejais, kaip pvz. ultraplaciajuosčiai THz impulsai, sritis išsiplečia iki 30 THz.

Terahercinių dažnių ruože gausu spektrinių ypatumų, susijusių su fundamentiniais fizikiniais procesais, tokiais kaip rotaciniai molekulių virpesiai, organinių junginių vibraciniai virpesiai, gardelės virpesiai kietuosiuose kūnuose, tarppajuostiniai šuoliai puslaidininkuose, draustinių juostų tarpas superlaidininkuose. Tokias unikalias medžiagų savybes stengiamasi išnaudoti kuriant THz prietaisus ir jų taikymus.

Visų tipų molekulės turi charakteringas spektrines sugerties linijas THz dažnių ruože, kurios gali būti panaudojamos jų identifikavimui nežinomos sudėties mėginyje. Be to, spektrinės linijos forma gali suteikti vertingos informacijos apie mikroskopinius molekulių judėjimo mechanizmus. Pavyzdžiui, aukštos rezoliucijos THz spektroskopija yra naudojama Žemės atmosferos stebėjimui.

Organinės ir biologinės molekulės taip pat pažymi spektriniais ypatumais THz ruože siejamais su didelės amplitudės vibraciniais virpesiais ir tarpmolekuline sąveika. Tokią dinamiką galima tirti THz spektroskopijos metodais. Tai suteikia galimybę pritaikyti THz spinduliuotę narkotinių ir sprogstamų medžiagų aptikimui, vaistų testavimui farmacijoje, baltymų formavimuisi ir kitiems pritaikymams.

Pagal optines savybes THz dažnių ruože medžiagas būtų galima suskirstyti į tris tipus: vandenį, metalą ir dielektriką. Vanduo - stipriai polinis skystis pasižymintis stipria THz sugertimi. Dėl didelio elektrinio laidumo

metalams būdingas didelis atspindys THz dažniuose. Tuo tarpu nepolinės ir nemetalinės medžiagos, pavyzdžiui dielektrikai, tokie kaip popierius, plastikas, tekstilė, medis, keramika, būdami neskaidrūs matomai šviesai dažnai yra pralaidūs THz spinduliutei. Optinės savybės apibendrintos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Medžiagų optinės savybės THz dažnių ruože.

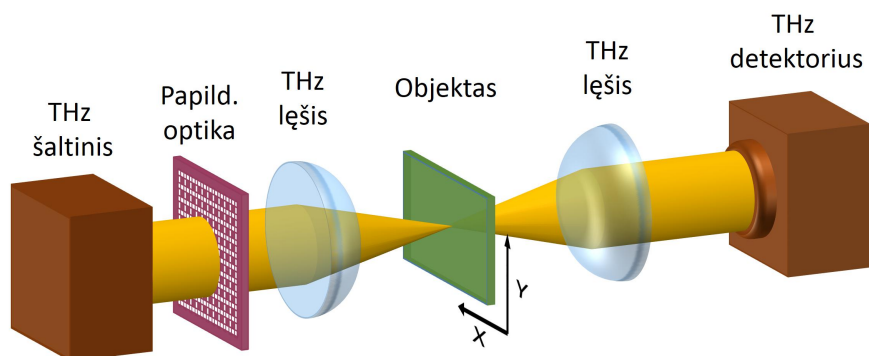
<i>Medžiagos tipas</i>	Optinės savybės prie 1 THz
skystas vanduo	didelė sugertis ($\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$)
metalas	didelis atspindys ($> 99.5\%$)
plastikas	maža sugertis ($\alpha < 0.5 \text{ cm}^{-1}$)
	mažas lūžio rodiklis ($n \approx 1.5$)
puslaidininkis	maža sugertis ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$)
	didelis lūžio rodiklis ($n \sim 3-4$)

Toks ryškus kontrastas tarp medžiagų savybių THz ruože plačiai taikomas THz vaizdinime. Kadangi dažniausiai naudojamos pakavimo medžiagos yra dielektrikai, THz vaizdinimas suteikia galimybę peršviesti uždaras pakuotes jų nepažeidžiant. THz spinduliuotės skvarbumas pro pakavimo medžiagas ir rūbus bei nejonizuojantis pobūdis leidžia ją pritaikyti saugumo sistemoms. THz saugumo sistemos suteiktų galimybę aptikti paslėptus ginklus, sprogmenis ar nelegalias narkotines medžiagas.

1.2 Terahercinio dažnio vaizdinimo sistema

Terahercinis vaizdinimas gali būti pasyvus ir aktyvus. Pasyvus vaizdinimas - tai tiriamo objekto vaizdo užrašymas matuojant jo emituojamą spinduliuotę. Aktyvus terahercinis vaizdinimas - tai yra procesas, kai apšvietus objektą THz spinduliuote, suformuojamas jo erdvinis vaizdas. Kontrasto susidarymo mechanizmai tokiu atveju gali būti įvairūs: sugerties, atspindžio ar net fazės pokytis. THz vaizdinimo principinės veikimo schemas pavyzdys pateiktas 1.1 pav.

Ją sudaro THz šaltinis, generuojantis tam tikro arba plataus spektro THz spinduliuotę, optiniai komponentai, skirti spinduliuotės fokusavimui, ir detektorius spinduliuotės intensyvumui matuoti. Dažnai vaizdinimo sistemose naudojama papildoma optika šaltinio spinduliuotės profilio korekcijai, dažniniai bei poliarizaciniai filtrai.



1.1 pav. Principinė terahercinio vaizdinimo schema

1.2.1 Terahercinės spinduliuotės generavimo mechanizmai

Terahercinę spinduliuotę galima generuoti panaudojant įvairius fizikinius mechanizmus: dažnio mažinimas optiniu lyginimu, skirtuminio dažnio generavimas, mikrobangų dažnio dauginimas panaudojant netiesinę terpę; fotosrovės generavimas puslaidininkų paviršiuje arba fotolaidžiose antenose; generacija laisvaisiais elektronais; šuoliai tarp energijos lygmenų lazerinėse terpėse.

Vienas iš būdų THz spinduliuotei generuoti yra panaudoti dažnio konversiją netiesinėje terpėje. Optinis lyginimas ir skirtuminio dažnio generavimas yra antros eilės netiesiniai optiniai procesai, kuriuose THz dažnio fotonas ω_T yra sukuriamas sąveikaujant dviem optiniams fotonams su dažniu ω_1 ir ω_2 netiesiniame kristale taip, kad $\omega_T = \omega_1 - \omega_2$. Plačiajuosčiai (dažnių juosta apie 10 THz) femtosekundiniai lazerio impulsai generuoja plačiajuosčius THz impulsus, kurių formą optinio lyginimo metu atspindi optinio impulso gaubtinė. Kietojo kūno emiteriai pagaminti pagal mikrobangų dažnio ruožui būdingas technologijas konvertuoja krintančią mikrobangų spinduliuotę į aukštesnes harmonikas panaudojant diodus su stipriai netiesinėmis voltamperinėmis charakteristikomis.

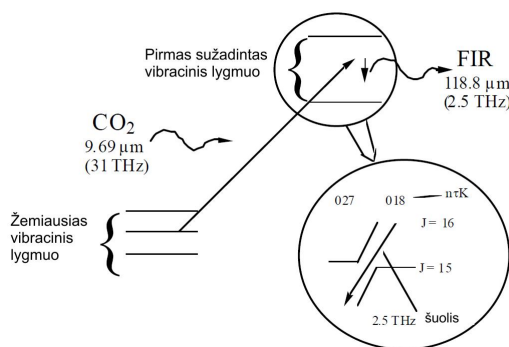
THz spinduliuotė taip pat gali būti generuojama lazerio pluoštu žadinant elektriniu lauku veikiamas fotolaidžias antenas. Optinis žadinimas sugeneruoja fotokrūvininkus, kurie sukelia fotosrovę. Maišant dviejų lazerių pluoštus su skirtingais dažniais sukuriami optiniai mušimai, kurie sugeneruoja CW THz spinduliuotę, kurios dažnis sutampa su mušimų dažniu. Šis

metodas vadinamas fotomaišymu.

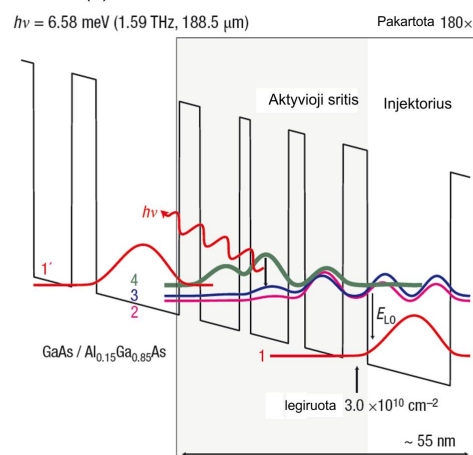
Terahercinė spinduliuotė taip pat gali būti generuojama greitinant laisvuosius elektronus vakuume, kaip pavyzdžiui atgalinės bangos osciliatorius (*angl. backward wave oscillator*) ar laisvų elektronų lazeris. Tokie šaltiniai nors ir pasižymi didele generuojama galia, tačiau reikalauja ypač didelės infrastruktūros ir yra netinkami kompaktiškomis vaizdinimo sistemoms.

Kitas būdas THz spinduliuotei generuoti yra emisija iš šuolių tarp energijos lygmenų kelių lygmenų kvantinėje sistemoje su lygmenų užpildos apgrąža. Tolimosios IR srities lazeriai naudoja molekulių rotacinių virpesių energijos lygmenis, kurių šuolių kvantai yra THz srityje [8]. Kaip pavyzdį galima pateikti dažnai naudojamą 2.5 THz dažnio liniją, kuri generuojama CO₂ lazeriu optiškai žadinant metanolio dujas (1.2a pav.). Kompaktinėms sistemoms pageidaujami kietakūniai lazeriai. Iš elektriškai kaupinamų kietojo kūno lazerių yra žinomi P-tipo germanio lazeriai [1]. Juose lazerinis efektas sukuriamas sukeliant užpildos apgrąžą tarp dviejų Landau lygmenų sukryžiuotuose elektriniame ir magnetiniame laukuose. Labiausiai išdirbti yra kvantiniai kaskadiniai lazeriai (*angl. quantum cascade laser, QCL*). Jie yra pagaminti iš puslaidininkinių heterostrukturų sudarytų iš periodiškai kintamų puslaidininkinių su skirtingomis savybėmis (1.2b pav.). Šuoliai tarp pajuosčių atitinka THz dažnio fotonus. QCL'e elektronai patiria eilę tarppajuostinių šuolių taip generuodami koherentinę THz spinduliuotę.

(a) Optiškai žadinamas THz lazeris



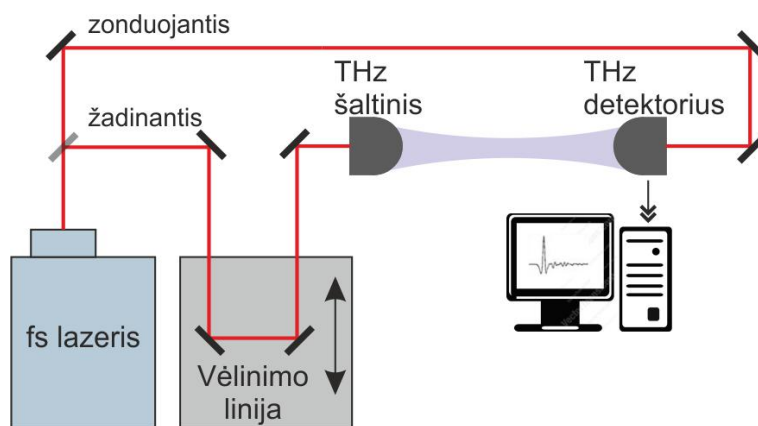
(b) Kvantinis kaskadinis THz lazeris



1.2 pav. Metanolio molekulių vibracinių lygmenų diagrama optiškai žadinamai 2.5 THz dažnio spinduliuotei generuoti (a) [9]. Laidumo juostos profilis GaAs/AlGaAs kvantiniame kaskadiniame lazeryje (b) [1].

1.2.2 Terahercinės spinduliuotės detekcijos principai

Terahercų fizikoje skiriami du detekcijos principai: nekoherentinis ir koherentinis. Fundamentinis skirtumas yra tai, kad nekoherentinė detekcija matuoja tik spinduliuotės intensyvumą. Kai tuo tarpu koherentinė detekcija matuoja ir elektrinio lauko amplitudę, ir fazę.



1.3 pav. Tipinė THz spinduliuotės generavimo ir detektavimo schema su koherentine detekcija.

Koherentinė detekcija yra plačiai naudojama impulsinėse terahercinės spinduliuotės schemose. Tokios schemos pavyzdys yra pateiktas 1.3 pav. Femtosekundinės trukmės impulsų optinio lazerio spinduliuotė dalijama į du pluoštelius: žadinantį ir zonduojantį. Žadinantis pluoštelis yra naudojamas THz impulsų generavimui, o zonduojantis pluoštelis nuskenuoti THz impulsą. THz elektrinis laukas detektuojamas moduluojant zonduojantį impulsą THz elektriniu lauku arba THz elektriniu lauku greitinant zonduojančio pluoštelio sugeneruotus krūvininkus. Mechaninės vėlinimo linijos yra naudojamos keisti laiko tarpą tarp žadinančio ir zonduojančio pluoštelio ir taip užrašyti THz impulso laikinę priklausomybę. Panaudojant Furjė transformaciją laikinės skyros THz informacija gali būti transformuojama į dažninę informaciją, reikalingą spektriniam matavimams. Toks detektavimo būdas pasižymi itin dideliu jautriu, tačiau dėl reikiamybės impulsą skenuoti laike yra sąlyginai lėtas. Daug sparčiau gali vykti nekoherentinė detekcija, kuri nereikalauja laikinės skyros matavimų.

Nekoherentinėje, dar vadinamoje, tiesioginėje detekcijoje matuojamas tik spinduliuotės intensyvumas, todėl toks principas dažnai naudojamas pastovios veikos (angl. *continuous wave*, CW) schemose (pvz. 1.1 pav.). Dažnai naudojami nekoherentiniai detektoriai yra plačiajuosčiai terminiai jutikliai,

tokie kaip skystu heliu šaldomi bolometrai, opto-akustinės celės ir pyroelektriniai detektoriai. Juose spinduliuotės energija yra matuojama registruojant temperatūros pokytį sugeriklyje. Tokio tipo terminiai detektoriai reaguoja į labai plataus spektro spinduliuotę, tačiau turi bendrą trūkumą - lėtą veikimą, nes temperatūros matavimui jie turi pasiekti temperatūrinę pusiausvyrą. Todėl nemaža dalis terahercinių dažnių srities mokslinių tyrimų yra sukoncentruoti naujų detektorių kūrimui, tinkamų sparčioms kompaktiškomis THz vaizdinimo sistemoms, kurias būtų galima pritaikyti praktikoje.

2 Optoelektroniškai žadinami paviršiniai terahercinės spinduliuotės emiteriai

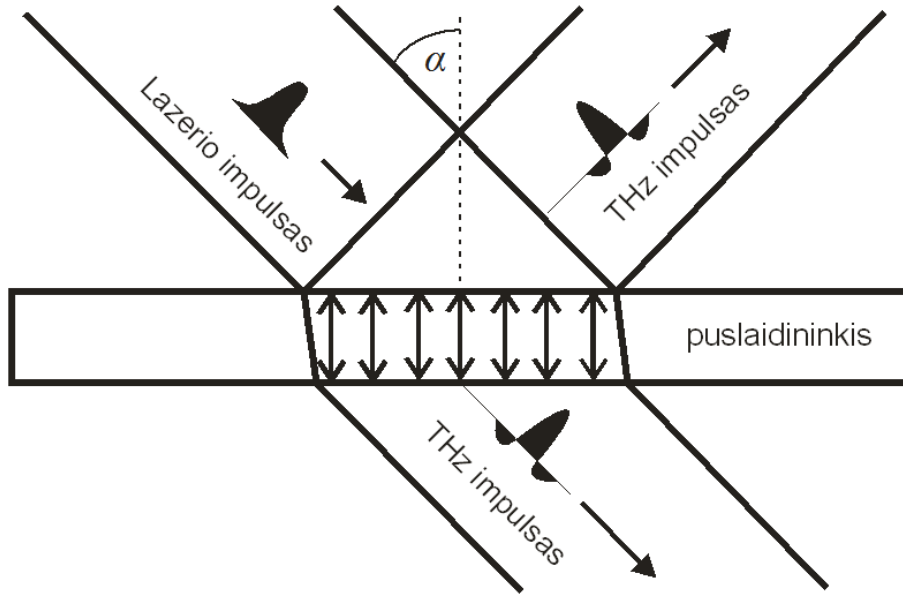
2.1 Teminė literatūros apžvalga

Paviršinės THz emisijos mechanizmai

Optiškai žadinant puslaidininkius ir jų darinius femtosekundinės trukmės (10^{-15} s) impulsais galima generuoti terahercinę spinduliuotę. Tai gali būti THz impulsų generavimas apšviečiant puslaidininkio paviršių [10] arba, taip pat emisija iš fotolaidžių puslaidininkinių antenų [11]. Patobulėjusios molekulių pluoštelių epitaksijos (MPE) puslaidininkių auginimo technologijos įgalino užauginti atominių matmenų heterodarinius, kuriose vyksta THz emisija iš koherentinių elektronų bangų paketų [12]. THz emisija stebima ir optiškai sužadinant plazmonus [13] ir fononus [14] bei dažnių maišymu netiesinėje terpėje. Šiame darbe apsiribosime THz spinduliuotės generavimu žadinant puslaidininkio paviršių femtosekundinės trukmės optiniais impulsais (2.1 pav.).

Apšvietus puslaidininkį lazerio impulsais kritimo kampų α , atspindžio ir praėjusio spindulių pluoštelių kryptimis spinduliuojami THz impulsai. Praktikoje dažniausiai naudojama emisija atspindžio kryptimi, nes pralaidumo kryptimi galimi nepageidaujami nuostoliai dėl THz sugerties puslaidininkyje.

Žadinant femtosekundiniais lazerio impulsais puslaidininkio paviršiuje vyksta daugybė fizikinių mechanizmų, kurie nulemia THz impulsų emisiją. Todėl labai sudėtinga atskirti ir įvertinti atskirų mechanizmų įtaką. Nepaisant to, laikoma, kad THz spinduliuotę emituoja dipolis, indukuotas puslaidininkio paviršiuje dėl spartaus fotosrovės kitimo ar netiesinės poliarizacijos



2.1 pav. Terahercinės spinduliuotės generacija iš puslaidininkio paviršiaus.

optinio lyginimo. Tolimojo lauko artinyje THz elektrinis laukas gali būti išreikštas taip [15]:

$$E_{THz} = -\frac{S}{c^2 R} \int_0^\infty \left(\frac{\partial j}{\partial t} + \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) dz, \quad (2.1)$$

čia: S – sužadintos srities plotas, d - bandinio storis, c – šviesos greitis vakuume, R – atstumas nuo emituojančio paviršiaus iki detektavimo taško, j ir P yra fotosrovės ir netiesinės poliarizacijos komponentės. Ši išraiška galioja, kai sužadinamos srities skersmuo yra daug mažesnis nei išspinduliuojamas THz bangos ilgis. Fotosrovę j kuria paviršiuje fotonų sugeneruotos elektronų ir skylių poros, su sąlyga, kad šviesos kvanto energija didesnė už puslaidininkio draustinės juostos plotį. Sugeneruotų krūvininkų judėjimą lemia paviršinio elektrinio lauko bei Foto–Demberio efektai.

Paviršinis elektrinis laukas puslaidininkyje susidaro kai valentinė ir laidumo juostos dėl paviršinių būsenų išlinksta ties puslaidininkio kraštu. Tuomet susidaro nuskurdintas sluoksnis su statmenu paviršiui vidiniu elektriniu lauku, kurio poliškumas priklauso nuo legiruojančių priemaišų tipo ir nuo paviršinių būsenų padėties Fermio lygmens atžvilgiu. Kai puslaidininkis apšviečiamas lazerio ($h\nu > E_g$) impulsu, sugeneruoti krūvininkai yra atskiriami ir greitunami išilgai elektrinio lauko, taip pernešdami fotosrovę, kurios kitimą laike atkartoja THz elektrinio lauko amplitudė pagal 2.1 lygtį. THz impulso elektrinio lauko amplitudė priklauso nuo aktyviosios srities elektri-

nio lauko stiprio, sugerties koeficiento žadinančiai lazerio spinduliuotei bei krūvininkų judrio [16]. Skirtingi puslaidininkiai pasižymi skirtingu THz spinduliavimo intensyvumu. Tokiose medžiagose, kaip *n*- ir *p*-tipo GaAs, GaSb ir InP, fotosrovę nulemia stiprus paviršinis elektrinis laukas (10^4 – 10^5 V/cm). Tačiau THz emisija taip pat stebima ir siauratarpiuose (InAs, Te ir kt.) puslaidininkiuose, kuriuose labiau pasireiškia Foto–Demberio efektas.

Jo metu elektrinis laukas puslaidininkyje indukuojamas, kai puslaidininkio paviršiuje femtosekundinio lazerio sužadinti laisvieji krūvininkai dėl tankio gradiento difunduoja į puslaidininkio tūrį. Daugelyje puslaidininkių elektronų judris yra didesnis nei skylių, todėl elektronai pabėga nuo skylių. Erdviškai atskirti krūvininkai indukuoja statmeną paviršiui elektrinį lauką, kurio kitimas laike gali sąlygoti THz spinduliuotės emisiją. Žadinant Ti:safyro lazeriu ($h\nu \cong 1.55$ eV) puslaidininkius su siauru draustinės juostos tarpu sugeneruoti krūvininkai gali turėti energijos perteklių ΔE , kuris gali viršyti 1 eV. Todėl būdami karšti ir turėdami didelę kinetinę energiją elektronai nuo skylių gali pabėgti didesniu atstumu nei terminis krūvininkų atskyrimas, taip indukuojant didesnę elektrinį lauką [17].

Tiriant THz emisiją nuo puslaidininkio paviršiaus, pastebėta, kad THz elektrinio lauko amplitudė priklauso nuo bandinio kristalografinės orientacijos [18]. Reiškinių nepavyko paaiškinti fotosužadintų krūvininkų kuriamos fotosrovės kitimu laike. Po aktyvaus tyrinėjimo toks efektas pripažintas optiniu lyginimu (OR), kitaip dar vadinamu netiesiniu optinių laukų dažnių maišymu, skirtuminių dažnių generavimu arba atvirkštiniu elektro-optiniu efektu [19]. Žadinančiojo femtosekundinio lazerio impulsas turi platų spektrą. Todėl visos dažnio komponentės gali susimaišyti viena su kita taip sukurdamos platų THz emisijos spektrą. Detalūs netiesinių terahercinės spinduliuotės emisijos mechanizmų tyrimai buvo atlikti [15, 18] darbuose.

Dar vienas THz spinduliuotės emisijos mechanizmas yra optiškai žadinamos krūvininkų plazmos osciliacijos (PO). Po fotosužadavimo sugeneruoti krūvininkai dreifuoja dėl elektrinio lauko arba difunduoja dėl tankio gradiento. Vyksta momentinė poliarizacija, kurios metu priešingo krūvio elektronai ir skylės yra atskiriami. Tačiau elektrinis laukas, susidaręs dėl Kulono sąveikos, yra priešingos krypties ir ekranuoja krūvininkus skiriantį elektrinį lauką. Tokiu būdu vyksta krūvininkų tankio osciliacijos su dažniu $\omega = \sqrt{\omega_p^2 - \gamma^2/4}$ (γ – osciliacijų slopimo koeficientas). Kai bangos vektorius

k yra nedidelis, plazmos dažnis ω_p lygus:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{\epsilon_0 m^*}}, \quad (2.2)$$

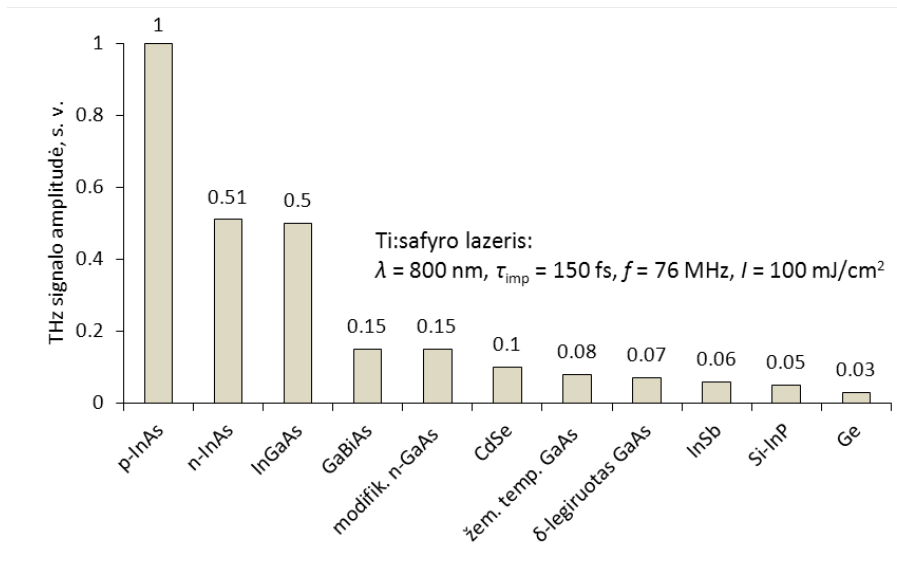
čia n – koherentiškai osciliuojančių krūvininkų tankis, ϵ_0 – dielektrinė skvarba vakuume, m^* - krūvininkų efektinė masė. Pagal šią formulę PO dažnis priklauso tik nuo osciliuojančių krūvininkų tankio.

Krūvininkų PO buvo pastebėtos žadinimo-zondavimo eksperimentais kaip vidinio elektrinio lauko osciliacijos p - i - n tipo struktūrose [20]. Šiuo principu veikiantis heterosandūrinis p - i - n THz spinduliuotės emiteris buvo ištirtas [21] darbe. Buvo nustatyta, kad p - i - n tipo struktūros generuojamos THz spinduliuotės dažnis priklauso nuo sužadintų krūvininkų tankio. Osciliacijos susidaro kai i -tipo srityje sugeneruoti krūvininkai ekranuoja vidinį elektrinį lauką tarp p ir n sričių.

Esamų optiškai žadinamų paviršinių emiterių palyginimas

Šiame skyriuje buvo aptarti pagrindiniai THz emisijos nuo optiškai žadinamo puslaidininkio paviršiaus susidarymo mechanizmai. THz emisijos amplitudė priklauso nuo puslaidininkio parametrų (draustinės juostos plotis, krūvininkų judris ir t.t.). Priklausomai nuo puslaidininkio savybių skiriasi ir vyraujantys spinduliuotės susidarymo mechanizmai. Šiuo metu efektyviausių THz emiterių palyginimas pateiktas 2.2 pav.

Eksperimentuose emiterių žadinimui plačiai naudojamas Ti:safyro femtosekundinis lazeris (750-880 nm). Šiuo metu efektyviausias emiteris yra pagamintas iš p -tipo InAs [15]. Tačiau dėl InAs technologijų trūkumo toks emiteris nėra plačiai naudojamas. Efektyvių THz spinduliuotės šaltinių problemai spręsti reiktų ieškoti būdų kaip juos pagaminti, naudojant gerai išvystytas technologijas. Kaip pavyzdys galėtų būti emiteris, pagamintas iš GaAs, bet tam reikia ieškoti būdų, kaip padidinti THz generacijos efektyvumą.



2.2 pav. THz emisijos palyginimas nuo skirtingų optiškai žadinamų paviršinių emiterių. Adaptuota iš [15].

2.2 Koherentinė terahercinės spinduliuotės emisija iš fotosužadintos elektron-skylinės plazmos

Optoelektroniniai emiteriai, veikiantys sužadintus krūvininkus paviršinio elektrinio lauko nuskurdintame sluoksnyje, galėtų būti patobulinti, kadangi tik dalis sužadintų krūvininkų dalyvauja fotosrovės pernešime dėl kelių priežasčių: (1) sužadinimo sritis tik dalinai apima paviršiaus nuskurdintą sritį dėl negilaus spinduliuotės įsiskverbimo į puslaidininkį; ir (2) vidinis elektrinis laukas gali būti sparčiai ekranuojamas sužadintų krūvininkų. Taipogi plazminis dažnis yra nehomogeninis pozicijos atžvilgiu tiek vertikaliai, tiek horizontaliai paviršiui, todėl fotosrovės amplitudė sparčiai mažėja dėl interferencijos. Vadinasi paviršinių emiterių efektyvumo padidinimui reikalinga optimizuoti elektrinio lauko ir sugerties profilus puslaidininkyje panašiai kaip tai atliekama *p-i-n* fotomaišytuvuose (angl. *photomixers*) [22] ir griūtiniuose *p-i-n* fotodetektoriuose.

A. Reklaitis savo darbe [7] pasiūlė naudoti kaskadinę *p-i-n-i*-tipo GaAs/AlGaAs heterostruktūrą efektyviam THz spinduliuotės generavimui. Pasiūlytas emiteris pasižymi stipriais vidiniais elektriniais laukais fotokrūvininkų greitinimui ir tolygiai kintamu medžiagos sugerties koeficientu homogeniškam plazmos tankiui užtikrinti paviršiui statmena kryptimi. Šiame

darbe pristatomas eksperimentinis šios struktūros tyrimas, parodantis, kad toks emiteris prie tam tikrų sužadavimo sąlygų gali būti efektyvesnis už InGaAs bei p -InAs emiterius.

2.2.1 GaAs/AlGaAs p - i - n - i emiterio aprašymas

Tiriamas emiteris buvo pagamintas pagal [7] darbe pateiktą heterostruktūros modelį. Heterostruktūros architektūrą sukūrė A. Reklaitis¹, o bandinį molekulių pluoštelių būdu užaugino K. Köhler².

Tiriamas emiteris yra kaskadinė p - i - n - i -tipo heterostruktūra, sudaryta iš penkių nelegiruotų $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ sluoksnių. $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ kiekvieną sluoksnį gaubia δ funkcija legiruoti n - ir p -tipo GaAs sluoksniai. Susidaręs vidinis elektrinis laukas kiekviename periode siekia 50 kV/cm . Aliuminio molinė koncentracija x kinta nuo 0.08 (viršutinis sluoksnis, $\epsilon_g = 1.524\text{ eV}$) iki 0 (apatinis sluoksnis, $\epsilon_g = 1.424\text{ eV}$) tam, kad būtų užtikrintas vienodas vidutinis sužadintų krūvininkų tankis kiekviename $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ sluoksnyje. Lazero spinduliuotei besiskverbiant į bandinį jos intensyvumas eksponentiškai mažėja, tačiau sugeneruotų krūvininkų tankis turėtų būti išlaikomas vienodas dėl didėjančio sugerties koeficiento α_i (kai bangos ilgis $\lambda = 800\text{ nm}$, α_i vertės yra $0.55\ \mu\text{m}^{-1}$, $0.65\ \mu\text{m}^{-1}$, $0.75\ \mu\text{m}^{-1}$, $0.95\ \mu\text{m}^{-1}$ ir $1.25\ \mu\text{m}^{-1}$). Atvirkštinis sugerties koeficientas viršija aktyviojo sluoksnio storį $L = 0.3\ \mu\text{m}$, kad būtų patenkinama sąlyga $\alpha_i L \ll 1$, reiškianti, jog foto-krūvininkų pasiskirstymą kiekviename periode galima laikyti homogenišku.

Žadinančios lazerio spinduliuotės fotono energija viršija GaAs draustinės juostos plotį ir yra mažesnė už $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ draustinės juostos plotį. Tuomet krūvininkai generuojami tik $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ sluoksniuose su maža aliuminio koncentracija. Delta legiruoti p - ir n -tipo GaAs sluoksniai sukuria stiprų elektrinį lauką, kuris užtikrina, kad kiekviename atskirame sluoksnyje krūvininkai būtų žadinami vienodai. $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ sluoksnio storis L_i parenkamas toks, kad būtų tenkinama sąlyga $\alpha_i L_i \ll 1$, kuri reiškia, jog viename sluoksnyje sužadintų krūvininkų tankio kitimas dėl šviesos intensyvumo kritimo būtų nykstamai mažas. Krūvininkai nepereina iš $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ į $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$, nes jų energija neviršija potencialo barjero, susidariusio dėl draustinės juostos trūkio. Tokiu būdu galima laikyti, kad

¹Fizinių ir technologijos mokslų centras, Lietuva

²Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, Freinburg, Vokietija

<i>i</i> -GaAs, 5 nm	$\epsilon_g = 1.424 + 1.247x$
p^+ -GaAs, 40 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$, 250 nm, 10^{15} cm^{-3}	↓ 1.536 eV
n^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$, 100 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.985 eV
p^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$, 280 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.524 eV
n^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$, 100 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.985 eV
p^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$, 280 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.511 eV
n^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$, 100 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.985 eV
p^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$, 280 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.486 eV
n^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
$n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$, 100 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.985 eV
p^+ -GaAs, 10 nm, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
n -GaAs, 280 nm, 10^{15} cm^{-3}	1.424 eV
Padėklas n^+ -GaAs, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	

2.3 pav. Tiriama $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ heterodarinio sandara

kiekviename $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ sluoksnyje PO dažnis yra vienodas. Tuo tarpu tam, kad būtų užtikrintas tolygus sužadintų krūvininkų pasiskirstymas atskiruose $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ sluoksniuose, kiekviename jų aliuminio koncentracija x skiriasi. Tokiu būdu α_i sugerties koeficientas pakoreguojamas taip, kad būtų kompensuojamas krūvininkų tankio sumažėjimas dėl šviesos intensyvumo kritimo. Rezultate PO dažnis visuose struktūros perioduose tampa vienodas ir slopinančios interferencijos yra išvengiama.

Tiriama $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ emiterio efektyvumui palyginti su kitais paviršiniais THz emiteriais buvo panaudoti šie bandiniai: (111) orientacijos $p\text{-InAs}$ ($N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), (100) orientacijos $n\text{-InAs}$ ($N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ir nelegiruotas 500 nm (100) orientacijos $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$,

epitaksiškai užaugintas ant nelegiruoto InP.

2.2.2 Paviršinių emiterių tyrimo metodika

Paviršiniai puslaidininkiniai emiteriai paprastai žadinami femtosekundinės trukmės lazerio impulsais. Kiekybiškai žadinanti lazerio spinduliuotė gali būti aprašoma energijos srauto tankiu, kuris apibrėžiamas kaip spinduliuotės energija tenkanti ploto vienetui,

$$I_0 = \frac{E_{imp}}{\pi w^2} = \frac{P_0}{f_{rep} \pi w^2}, \quad (2.3)$$

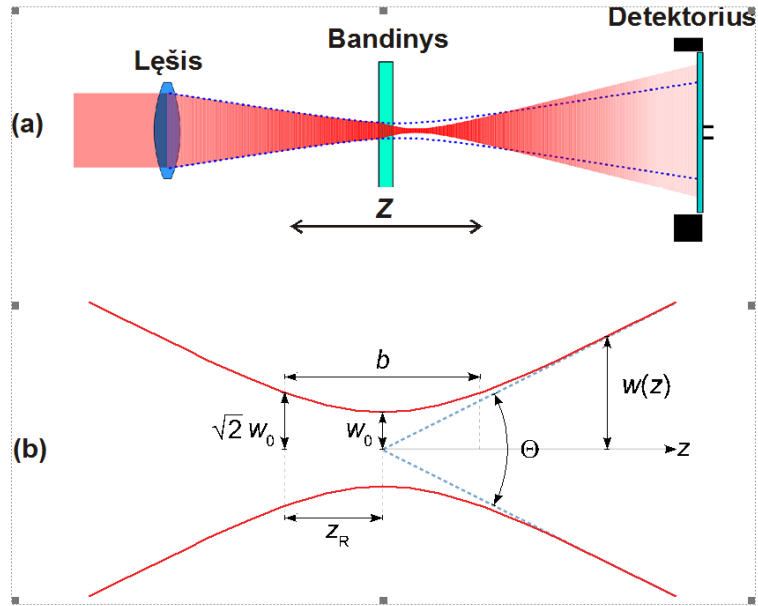
čia E_{imp} - lazerio impulso energija, w - pluošto spindulys, $P_0 = E_{imp} f_{rep}$ - lazerio spinduliuotės vidutinė galia, f_{rep} - lazerio impulsų pasikartojimų dažnis.

Terahercinės spinduliuotės emisijos priklausomybė nuo sužadavimo intensyvumo gali būti išmatuojama keičiant lazerio pluošto spindulį. Tai atliekama panaudojant Gausso pluošto, praėjusio pro fokusuojantį lęšį, sklidimą. Pluošto spindulys, t. y. atstumas nuo pluošto ašies, kuriame intensyvumas krinta e^2 kartų, įgis mažiausią vertę w_0 erdvės taške, vadinamame pluošto sąsmauka. Gausso pluošto spindulio kitimas z ašyje aprašomas funkcija

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}, \quad (2.4)$$

čia $z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ yra Rayleigh ilgis, kuriame pluošto spindulys padidėja $\sqrt{2}$ karto. Išmatavus pluošto spindulį keliuose z taškuose, galima rasti pluošto spindulį, tuo pačiu ir sužadavimo energijos srauto tankį, visoje z ašyje. Šis metodas dar vadinamas z -skenu (angl. *z-scan*) (2.4 pav.).

Terahercinės spinduliuotės impulsams nuo paviršinių emiterių generuoti buvo panaudota eksperimentinė schema pavaizduota 2.5 pav. Emiterio paviršius apšviečiamas femtosekundiniai titano safyro lazeriu, kuris generuoja iki 450 mW vidutinės galios, $f_{rep} = 82$ MHz pasikartojimo dažnio ir 5.5 nJ energijos impulsus. Eksperimento metu lazerio spinduliuotės bangos ilgis buvo derinamas intervale 750..800 nm. Lazerio pluoštas fokusuojamas į bandinį, pakreiptą 45° kampu. Atspindžio kryptimi sugeneruota THz spinduliuotė paraboliniiais veidrodžiais nukreipiama tiesiai į THz detektorių (2.5a pav.) emisijos intensyvumui matuoti arba į Maikelsono interferometrą

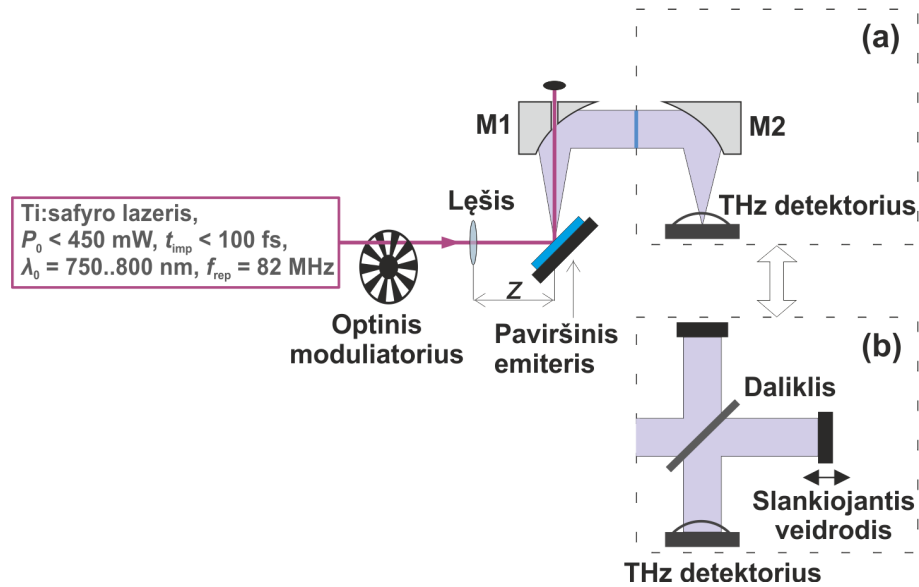


2.4 pav. Z-skenavimo metodas ir Gauso pluošto sklidimas laisvoje erdvėje.

(2.5b pav.) emisijos spektrinių charakteristikų tyrimui. Kadangi bandinys žadinamas kampu, reikalinga atsižvelgti į bandinio atspindžio koeficientą R ir taipogi į sužadintos srities elipsinę formą. Tuomet energijos srauto tankio formulė (2.3) pakoreguojama atitinkamai:

$$I_0 = \frac{P_0 (1 - R)}{f_{rep} \pi w^2 \sqrt{2}}. \quad (2.5)$$

Emituojama spinduliuotė eksperimento buvo detektuojama plačiajuosčiu optoakustiniu detektoriumi, "Golay" cele (jautris 10^4 V/W , NEP $10 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$), bei skystu heliu aušinamu bolometru (NEP $< 1 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$). Detektorių signalas buvo matuojamas sinchroniniu stiprintuvu. Dėl to žadinančioji spinduliuotė buvo moduluojama optiniu modulatoriumi. Matavimo metu schemas dalis nuo emiterio iki detektoriaus buvo uždara ir užpildyta azoto dujomis arba sausu oru, kad būtų išvengta vandens garų sugerties.



2.5 pav. Eksperimentinė terahercinės spinduliuotės generavimo nuo paviršinių emiterių schema ir jos variacijos emisijos intensyvumo (a) ir spektrinių charakteristikų (b) matavimams.

2.2.3 Paviršinių emiterių tyrimo rezultatai

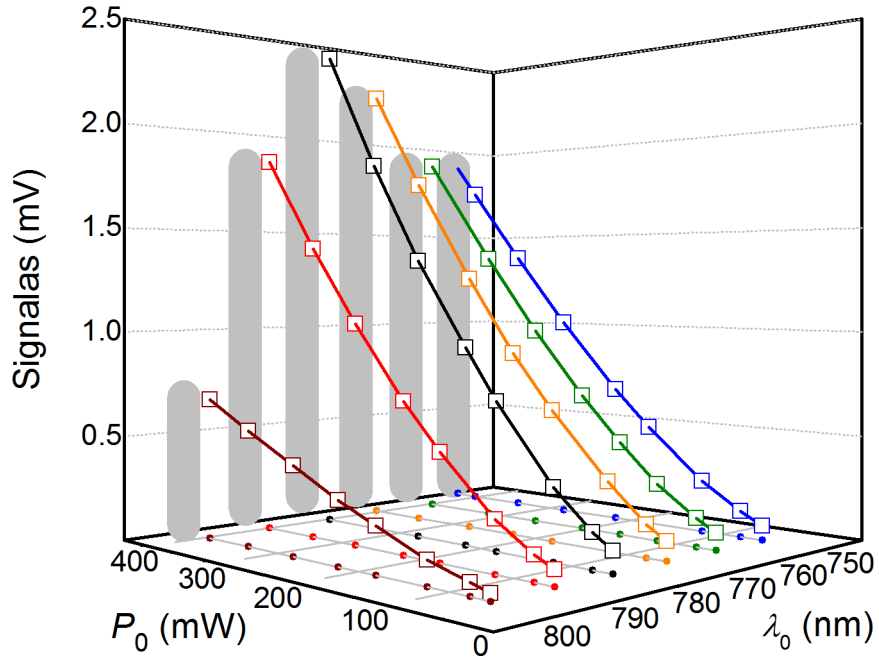
Heterosandūrinio emiterio tyrimui buvo formuluojami šie uždaviniai:

1. optimalių žadinimo sąlygų suradimas;
2. emisijos dažnių charakteristikų tyrimas;
3. emisijos intensyvumo kitimas nuo sužadinimo intensyvumo;
4. emisijos palyginimas su kitais paviršiniaisiai puslaidininkiniais emiteriais.

Pirmojoje tyrimų stadijoje panaudojant derinamą Ti:safyro lazerinę sistemą buvo išmatuotos emisijos priklausomybės nuo žadinančios spinduliuotės galios ir bangos ilgio. Rezultatai pateikti 2.6 pav.

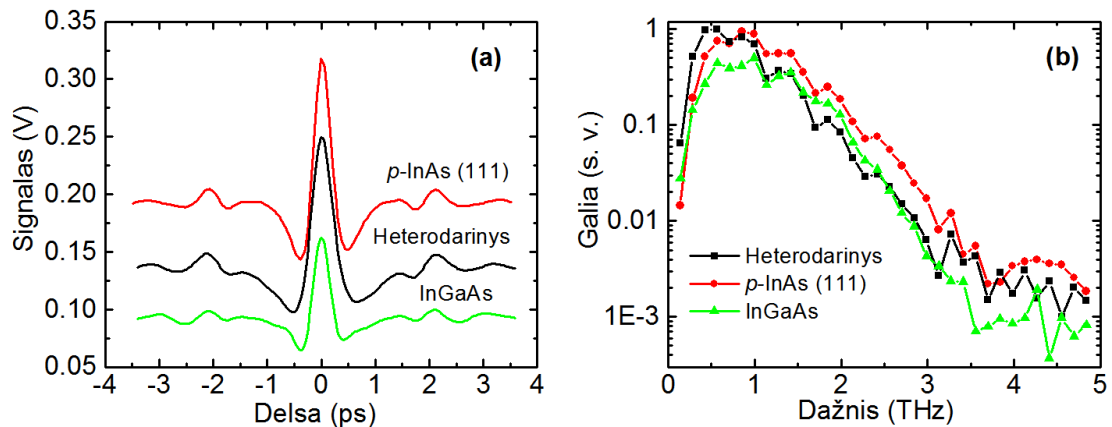
Buvo nustatyta, kad maksimalus THz signalas pasiekiamas, kai $\lambda_0 = 780\text{nm}$. Tai atitinka kvanto energiją 1.591eV , kuri didesnė už draustinės juostos tarpą visuose darinio aktyviuosiuose sluoksniuose ($\epsilon_g = 1.424\text{eV}$ GaAs ir $\epsilon_g = 1.524\text{eV}$ $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$) ir mažesnė už barjerinius $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ sluoksnius ($\epsilon_g = 2.066\text{eV}$).

Tiriamos emiterio veikimas buvo palygintas su geriausiai paviršiniaisiai emiteriais laikomais p - ir n -tipo InAs bei InGaAs, kai $I_0 = 0.7\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Eksperi-



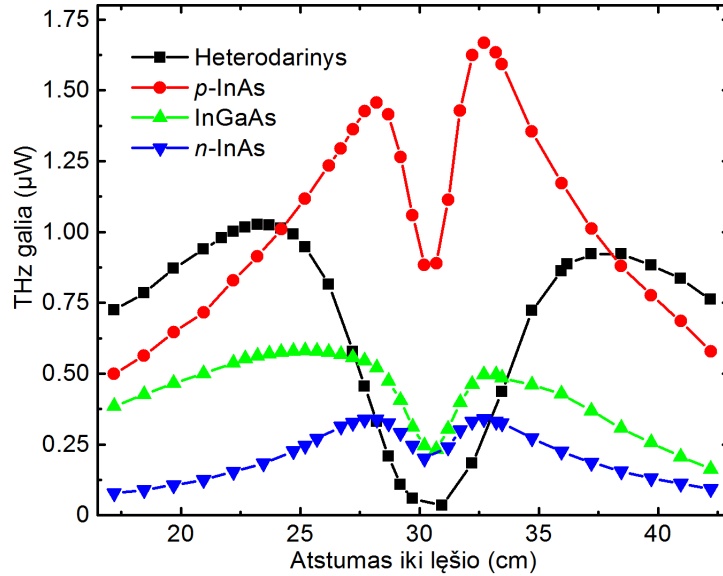
2.6 pav. Terahercinės emisijos intensyvumas esant skirtingoms sužadavimo sąlygomis išmatuotas schema, pateikta 2.5a pav. Lazerio pluošto skersmuo $900\ \mu\text{m}$, detekcijai naudojamas optoakustinis detektorius, kurio matuojamas signalas atidėtas Y skalėje.

mento rezultatai pateikti 2.7 pav. Iš rezultatų buvo nustatyta, kad tiriamasis emiteris dažnių srityje virš $1\ \text{THz}$ yra palyginamas su InGaAs emiteriu ir nežymiai nusileidžia $p\text{-InAs}$ emiteriui. Tačiau dažnių srityje iki $1\ \text{THz}$ tiriamasis emiteris spinduliuoja daugiau galios ne tik už InGaAs, bet ir už $p\text{-InAs}$.



2.7 pav. Ištirto $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ emiterio interferogramų (a) ir galios Furje spektrų palyginimas su $p\text{-InAs}$ bei InGaAs emiteriais (b) prie vienodų sąlygų, kai $\lambda_0 = 780\ \text{nm}$ ir $I_0 = 0.7\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$, naudojant schemas variaciją su interferometru, pateiktą 2.5b pav.

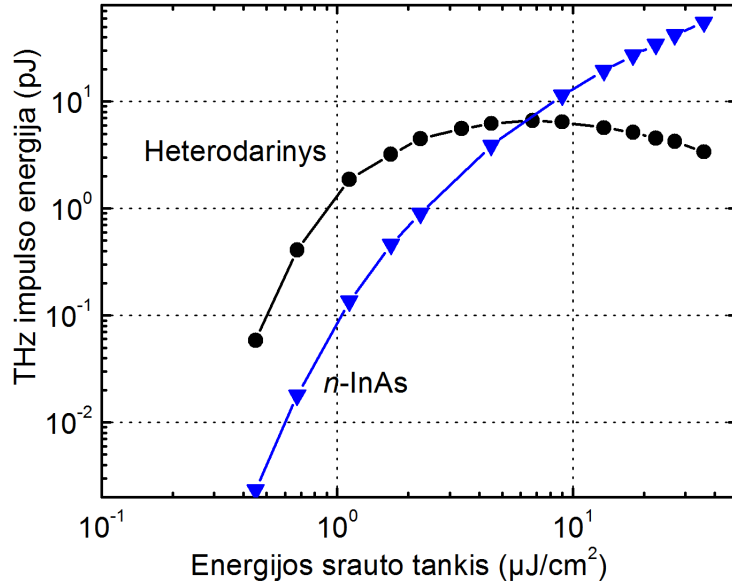
Siekiant palyginti tiriamojo heterodarinio maksimalią generuojamą galią su kitais emiteriais buvo atliktas z -skenavimo eksperimentas. Emiterių generuojamos THz galios priklausomybės nuo jų padėties atstumo iki lęšio pateiktos 2.8 pav. Buvo nustatyta, kad tiriamojo heterodarinio generuojama galia yra didžiausia prie silpnų sužadavimo intensyvumų, t.y. kai $z < 23$ cm. Artėjant prie lęšio židinio emiteris pasiekia maksimalią galią, kai $z = 23$ cm, kas atitinka energijos srauto tankį $I_0 = 0.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, ir toliau mažėja iki pat židinio nuotolio ($z = 30.5$). Kiti emiteriai pasiekia maksimalią galią ties: InGaAs - $1.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, n -InAs - $5.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir p -InAs - $8.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Emisijos sumažėjimas, padidėjus sužadavimo intensyvumui, siejamas su vidinio lauko ekranavimu sugeneruotų krūvininkų plazma.



2.8 pav. Tiriamo heterodarinio ir kitų emiterių THz spinduliuotės galios priklausomybė nuo bandinio atstumo iki žadinačią spinduliuotę fokusuojančio lęšio. $\lambda_0 = 780$ nm, $P_0 = 450$ mW, lęšio židinio nuotolis 30.5 cm. [A5]

Vidinio lauko ekranavimas fotokrūvininkais yra vienas iš pagrindinių reiškinų ribojančių paviršinių emiterių emituojamą galią. Atlikus z -skenavimo eksperimentą, buvo pastebėtas įdubimas vidutinės galios priklausomybėje nuo z , parodantis, kaip stipriai pasireiškia ekranavimas. Kaip matyti iš matavimo rezultatų (2.8 pav.), tiriamajam emiteriui šis efektas pasireiškia daug anksčiau nei kitiems emiteriams. Taip yra dėl ilgos krūvininkų gyvavimo trukmės (~ 10 ns) heterodarinėje, nes sužadinti elektronai ir skylės tokiame darinyje yra erdviškai atskiriami, todėl jų rekombinacija ženkliai sumažėja. Panaši problema, stebima pastovios veikos $n-i-p-n-i-p$ emiteriuose, yra

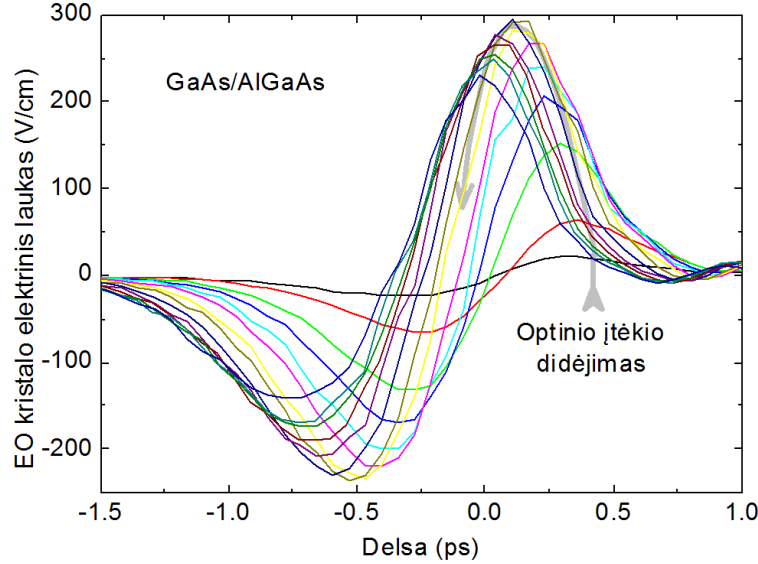
sprendžiama įterpiant į juos specialius rekombinacinius sluoksnius [23]. Norint patvirtinti šią hipotezę, buvo atlikti papildomi matavimai su kita lazerine sistema, kurioje impulsų pasikartojimo dažnis daug mažesnis (1 kHz vietoje 82 kHz), o detekcijai naudojama elektrooptinė detekcija. Tuomet žadinimo impulsų periodas pailgėja nuo 12.2 ns iki 1 ms. Detalesnį lazerinės sistemos aprašymą galima rasti [24, 25] darbuose. Matavimo rezultatai atlikti su tokia sistema pateikti 2.9 pav.



2.9 pav. Terahercinio impulso energijos priklausomybė nuo energijos srauto tankio žadinant žemo pasikartojimo dažnio lazerine sistema su elektrooptine detekcija (EO). [A5]

Atlikti matavimai parodė, kad $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ emiterio emituojamo THz impulso energija išsotina, kai energijos srauto tankis pasiekia $7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ vertę. Palyginimui atidėta su ta pačia sistema išmatuota $n\text{-InAs}$ žadinimo charakteristika, kurioje soties nebuvo pastebėta. Lyginant su aukščiau pateiktais rezultatais, heterodarinio emisijos maksimumas pasiekiamas esant dešimt kartų didesnei energijos srauto tankio vertei. Toks padidėjimas rodo, kad elektrinio lauko ekranavimas darinyje vyksta ne tik kaupiantis krūvininkams per kelis sužadavimo impulsus, bet ir vieno impulso metu. $n\text{-InAs}$ atveju krūvininkų gyvavimo trukmės yra daug mažesnės, todėl išsotinimo matuotame energijos srauto tankio diapazone pastebėta nebuvo. Elektrinio lauko ekranavimą heterodarinyje patvirtina ir išmatuota THz impulso elektrinio lauko amplitudės forma, esant skirtingam sužadavimo intensyvumui (2.10 pav.). Sužadavimo energijos tankiui pasiekus

soties režimą, terahercinis impulsas yra emituojamas keliais šimtais femtosekundžių anksčiau. Šis poslinkis reiškia spartesnę elektrinio lauko dinamiką esant didesniai sužadavimo intensyvumui. Galinė dalis optinio impulso įneša vis mažiau indėlio į THz emisiją, nes impulso pradžioje sužadinti krūvininkai vis labiau ekranuoja vidinį elektrinį lauką struktūroje.



2.10 pav. Terahercinio impulso elektrinio lauko amplitudės priklausomybė nuo delsos tarp žadinančio impulso ir lauko matavimo momento, išmatuota elektrooptiniu detektoriumi žadinant žemo pasikartojimo dažnio impulsais. [A5]

Maksimalus terahercinio impulso elektrinis laukas siekia 300 V/cm , kas atitinka 8 pJ impulso energiją, esant fokusuotai spinduliutei. Kaip rodo 2.9 pav. impulso energija yra didesnė nei $n\text{-InAs}$ iki soties taško.

Aptariant rezultatus derėtų paminėti ir plazminių bangų įtaką tiriamo emiterio veikimui. Plazmos osciliacijų dažnis susijęs su krūvininkų tankiu pagal formulę $\omega = \sqrt{\omega_p^2 - \gamma^2/4}$. Eksperimento metu nebuvo pastebėta žymaus THz spinduliuotės dažnio pokyčio dėl sužadavimo intensyvumo. Kadangi nerekombinavusių krūvininkų tankis didėja kylant sužadavimo intensyvumui, didelio tankio elektronų impulso relaksacijos spartą pagrindė nulemia elektronų sklaida su skylėmis. Pastarasis efektas gali būti traktuojamas kaip elektronų sklaida jonizuotomis priemaišomis dėl didelio sunkiųjų skylių ir Γ slėnio elektronų efektinių masių santykio. Todėl galima teigti, jog padidėjus sužadavimo tankiui ω_p , padidėjimas yra kompensuojamas impulso relaksacijos spartos padidėjimu.

Apibendrinant skyriaus rezultatus galima teigti, jog pirmą kartą pagamintas delta-profilu legiruotas *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterodarinys yra efektyvus terahercinės spinduliuotės emiteris žadinant jį femtosekundinės trukmės optiniais impulsais. Atlikus *z*-skenavimo eksperimentus buvo nustatytos optimalios žadinimo sąlygos. Gautus rezultatus palyginus su tokiomis pačiomis sąlygomis žadinamų InGaAs ir InAs paviršinių emiterių duomenimis, nustatyta, kad struktūros galia viršija InGaAs ir InAs paviršinių emiterių emisiją, jei optinio žadinimo srautai neviršija $0.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir $7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, esant atitinkamiems 82 MHz ir 1 kHz žadinančio lazerio pasikartojimo dažniams. Parodyta, kad maksimalią THz spinduliuotės galią riboja elektrinio lauko ekranavimas sužadintais krūvininkais. Padidinus krūvininkų rekombinacijos spartą, šią problemą *p-i-n-i* heterosandūrinis GaAs/AlGaAs paviršinis emiteris galėtų būti puiki alternatyva InAs emiteriams.

Šiame skyriuje pateikti tyrimų rezultatai leido suformuluoti 1-ąją ginamąją teiginį:

Femtosekundinio lazerio impulsu žadinami delta-legiruoti *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterodariniai yra efektyvūs terahercinės spinduliuotės emiteriai, kurių galia viršija InGaAs ir InAs paviršinių emiterių emisiją, jei optinio žadinimo srautai neviršija $0.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir $7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, esant atitinkamiems 82 MHz ir 1 kHz žadinančio lazerio pasikartojimo dažniams.

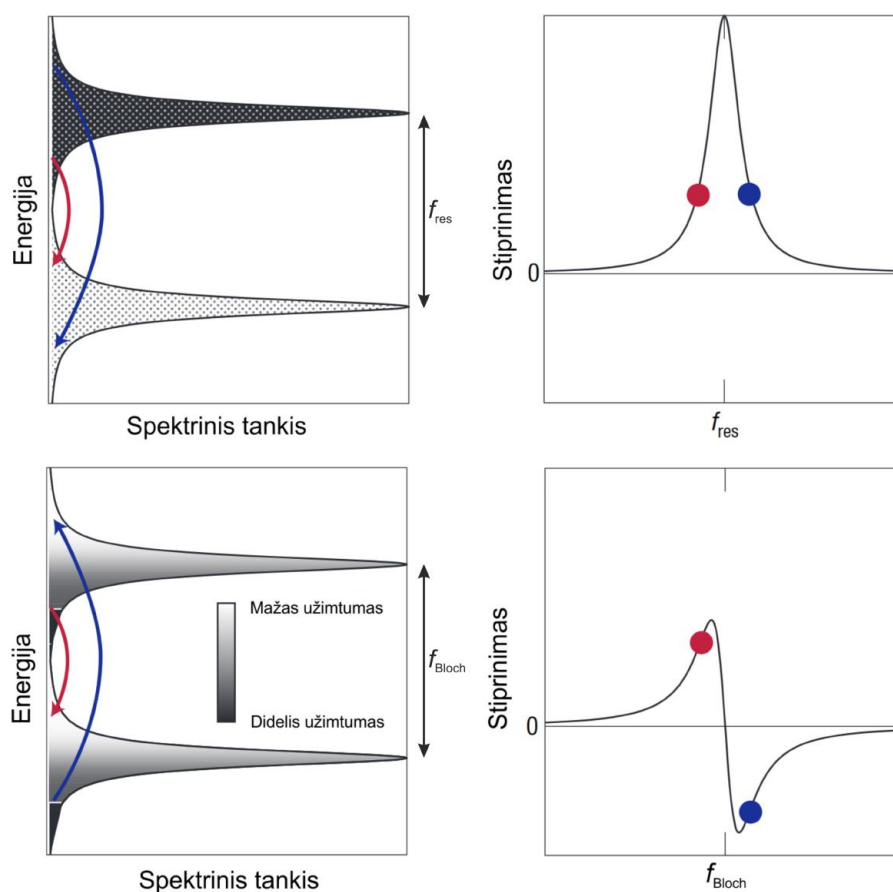
3 Blocho stiprinimo apraiška mikrobangų ruože supergardeliniam diode su kontroliuojama injekcija

3.1 Teminė literatūros apžvalga

Puslaidininkinės supergardenės (SL) yra dirbtiniai periodiniai dariniai sudaryti iš labai plonų, angstreminio storio puslaidininkių sluoksnių, kuriuose keičiant jų plotį, legiravimo lygį ir profilį galima pagal poreikį modifikuoti darinio optines ir elektronines savybes. Ši galimybė keisti medžiagos savybes padaro SL puikia terpe sudaryti sąlygas įvairių kvantinės prigimties reiškinų tyrimams kietuosiuose kūnuose arba pritaikyti jas modernių elektroninių ar fotoninių prietaisų kūrimui [5], tokių kaip, pavyzdžiui, kompaktiški mikrobangų ir terahercinės spinduliuotės šaltiniai ar stiprintuvai. Tokių prietaisų kūrimui būtų galima panaudoti Blocho osciliacijas (BO) [6,26,27]. Tai yra elektriniu lauku valdomi kvantiniai mušimai su erdviu poslinkiu eksitoniniuose Wannier-Stark laipteliuose, kurie buvo pastebėti optiniame eksperimente pikosekundžių laiko skalėje. Puslaidininkinėse supergardenėse BO savybės labai priklauso nuo sužadavimo sąlygų: žadinančio plačiajuosčio lazerinio impulso spektrinės padėties [28] arba jo spektro formos [29] Wannier-Stark laiptelių atžvilgiu [30] – galima stebėti tiek pavienio dažnio emisiją, tiek ir BO harmonikų atsiradimą.

Pastoviam elektriniame lauke BO pasireiškia kaip neigiamas diferencialinis judris (NDM), jei tik elektrinis laukas viršija tam tikrą slenkstinę vertę, vadinamą Esaki-Tsu kritiniu elektriniu lauku [5]. Išnaudojant šią savybę galima būtų kurti naujo tipo THz spinduliuotės šaltinius arba stiprintuvus.

Prietaisas, išnaudojantis šiuos ypatumus - elektriškai kaupinamas Blocho osciliatorius, turintis savybę keisti dažnį keičiant pridėtą įtampą - iki šiolei dar nėra sukurtas. Taip yra todėl, kad tokio tipo emisijai reikia dviejų sunkiai suderinamų tarpusavyje sąlygų – stipraus elektrinio lauko, siekiančio virš 10 kV/cm , ir didelių srovės tankių, siekiančių keletą kA/cm^2 [12]. Sukurti tokias sąlygas realizuojančio supergardių dizaino kol kas nepavyko. Nepaisant to SL dariniai buvo sėkmingai pritaikyti modernių prietaisų kūrimo išnaudojant krūvininkų pernašos reiškinius kvantinių kaskadinių lazerių (QCL) kūrimo tiek infraraudonųjų (IR), tiek ir terahercinių dažnių ruože [31,32]. Skirtingai nuo fiksuotuose dažniuose veikiančių QCL, Blocho stiprinimui yra būdingas plačiajuostis efektas, leidžiantis stiprinti elektromagnetinę spinduliuotę žemiau Blocho dažnio. Tai schematiškai pavaizduota 3.1 pav.



3.1 pav. Blocho stiprinimo pobūdis lyginant jį su optiniu stiprinimu. Adaptuota iš [33].

Kaip yra žinoma, tipinio optinio stiprinimo metu stiprinimas vyksta tarp dviejų energijos lygmenų esant lygmenų užpildos apgrąžai. Stiprinimas

vyksta rezonansiniame dažnyje, sutampančiame su energijos tarpu tarp lygmenų. Tuo tarpu Blocho stiprinimo pobūdis yra kitoks. Realiose dariniuose energijos lygmenys yra išplitę dėl sklaidos procesų. Elektronai esantys aukštesnės energijos būsenose turi didesnę tikimybę būti išsklaidomi nei žemesnėse. Todėl labiau tikėtina, kad aukštesnių energijų būsenos išplitusiuose lygmenyse bus mažiau okupuotos nei žemesnių. Tai nulemia, kad stiprinimas gali vykti tik dažniuose mažesniuose nei f_{Blocho} (raudona linija ir taškas), kai tuo tarpu aukštesniuose nei f_{Blocho} stiprinimo nebus, o bus tik sugertis (mėlyna linija ir taškas). Mokslinėje spaudoje buvo parodyta, kad efektas galioja tiek žemų [34,35], tiek ir aukštų signalų atvejais [36]. Su Blocho stiprinimu siejami ypatumai buvo surasti paprastose SL [37], super-supergardelėse [38] ir QCL struktūrose IR srityje [39]. Pastaruose darbuose nagrinėjamas nuoseklaus tuneliavimo transporto režimas silpnai susietuose supergardenelėse. Stipriai susietoms SL, lyg šiol nebuvo intensyvių tyrimų objektų, nes čia susiduriama su tam tikrais sunkumais - tiriama sistema pasidaro nestabili dėl aukštame elektriniame lauke pasireiškiančių šalutinių reiškinių, tokių kaip judančių elektrinio lauko domenų formavimasis (pvz. Gunn'o efekto prigimtis), kurie slopina stiprinimą.

Kitaip tariant, Blocho stiprinimas reikalauja kiek galima homogeniškesnio elektrinio lauko pasiskirstymo. Būtent dėl to visuose teoriniuose darbuose, nagrinėjančiuose Blocho stiprinimą [34,35], elektrinis laukas buvo laikomas visiškai homogeniškas erdvėje. Tačiau realiuose eksperimentinėse sąlygose elektrinis laukas, kaip taisyklė, yra stipriai nehomogeniškas, todėl jo profilį buvo bandoma „aplyginti“ periodiškai įterpiant stipriai legiruotus sluoksnius į SL ir taip suformuojant taip vadinamą super-supergardelę [38]. Laiko domeno požiūriu, homogenišką elektrinį lauką galima sukurti femtosekundiniu lazerio impulsu, bet jis egzistuos tik labai trumpą laiką apie 10 ps [40]. Yra ir kitas būdas – naudoti tokius darinius, kuriuose galima suderinti darbo tašką į teigiamo diferencialinio laidumo režimą žemuose dažniuose [41].

Nehomogeniškas elektrinis laukas buvo stebimas daug anksčiau kitokio tipo puslaidininkiniuose prietaisuose su neigiamu diferencialiniu judriu - Gunn'o dioduose [42]. B. Ridley ir T. Watkins [43] bei C. Hilsum [44] išaiškino, kad NDM prigimtis tūriniuose puslaidininkiniuose yra elektronų tarpplėninė pernaša. NDM reiškinys yra vienas iš reikalavimų susidaryti Gunn'o efektui, kurio metu pasireiškia srovės osciliacijos dėl elektrinio lauko domenų formavimosi. Elektrinio lauko domenai formuojasi, kai Kroe-

mer'io kriterijus yra patenkinamas, kuomet krūvininkų koncentracijos n ir bandinio ilgio L sandauga yra didesnė nei tam tikra kritinė vertė (paprastai 10^{12} cm^{-2} eilės). Elektrinio lauko domenai suardo homogenišką elektrinio lauko pasiskirstymą. Kai Kroemer'io kriterijus nepatenkinamas, erdvinis elektrinio lauko profilis tampa stabilus ir nepaisant NDM voltamperinėje charakteristikoje pasireiškia tik teigiamas polinkis [45]. Įdomus pavyzdys yra Thim stiprintuvas [46], kuris veikia siaurame mikrobangų ruože netoli lėkio trukmės rezonanso. Tokio tipo stiprintuvuose, legiruotuose žemiau kritinio lygio, elektrinis laukas yra nehomogeniškas ir jo stipris didėja nuo katodo link anodo. Jeigu injektuojantis kontaktas (katodas) yra idealus ominis, tai elektrinio lauko stipris prie katodo yra lygus nuliui, einant link anodo išsiplėčia žemo elektrinio lauko sritis (žemiau už kritinį el. lauką), o dar toliau yra stipraus elektrinio lauko sritis (daugiau nei kritinis el. laukas). Toks pakankamai nehomogeniškas elektrinio lauko pasiskirstymas atsiranda dėl didelio perteklinio krūvio, injektuoto iš ominio kontakto į santykinai mažai laidžią aktyviają sritį [47]. Reiktų paminėti ir tai, jog aukštadažnės elektromagnetinės spinduliuotės stiprinimas gali atsirasti netgi tada, jei darinio legiravimas yra sub-kritinis, tačiau injektuotų krūvininkų koncentracija atitinkamo ilgio bandinyje yra moduluota, o optimalus fazių skirtumas tarp srovės ir įtampos yra artimas $3\pi/2$ [47]. Šis reiškinys priklauso nuo elektronų lėkio laiko per prietaisą (angl. *transit-time dependent*) ir gali būti vadinamas lėkio rezonansiniu stiprinimu [48].

Siekiant sukurti tinkamą terpę plačiajuosčiam stiprinimui, sąlygotam NDM mechanizmo, per visą darinį reikia sudaryti erdviškai homogenišką elektrinį lauką, kuris būtų didesnis už kritinį. Šios problemos sprendimui buvo sugalvota dariniuose įterpti potencialo barjerą injektuojančiame kontakte [48–52]. Tačiau bendresniu atveju tiek pastovi, tiek kintama srovė stabiliam stiprintuve bus apspreštos ne tik erdvinio krūvio, bet taip pat ir kontakto savybėmis [53].

Šioje darbo dalyje bus pristatytas ir ištirtas kontroliuojamos injekcijos stiprintuvas, pagamintas iš siliciu legiruotos stipriai susietos GaAs/AlGaAs supergardelės diodo. Pritaikius kontroliuojamos injekcijos teorinius principus, taikomus subkritiniams Gunn'o stiprintuvams, buvo surastos sąlygos, leidžiančios puslaidininkinėje supergardelėje sukurti vienalytį elektrinį lauką. Eksperimentiškai apjungus nanosekundinės trukmės nuostovios srovės (DC) įtampos impulsų bei mikrobangų metodikas buvo pastebėti

įvairūs stipraus elektrinio lauko sąlygoti mikrobangų ypatumai, kurie buvo paaiškinti Blocho stiprinimo reiškiniu. Pasirinkus supergardele su plačia 104 meV minijuosta, buvo sudarytos galimybės sudaryti santykinai didelį elektrinio lauko stiprį, siekiantį $31E_{kr}$, kur E_{kr} yra kritinis elektrinis laukas pagal Esaki-Tsu teoriją [5]. Šis reiškinys buvo anksčiau aprašytas teoriškai ir buvo nustatyta, kad SL gali būti naudojama aukštų dažnių, siekiančių THz ruožą, stiprinimui kambario temperatūroje netgi be neigiamo diferencialinio laidumo režimo [54, 55]. Elektrinio lauko profilio homogeniškumas ir stabilumas buvo užtikrinamas naudojant injekcinių diodų idėją su neominiais kontaktais. Pirmasis, injekciją kontroliuojantis barjeras, yra sudarytas pasirenkant legiravimo profilį ir heterosandūrą. Antrąjį, blokuojantį barjerą, sudaro Šotki kontaktas. Toks specialus asimetrinių injekcinių/kolektrinių kontaktų darinys leidžia ne tik minimizuoti elektrinio lauko netolygumą, bet ir sukurti darinyje didelį vidinį elektrinį lauką (angl. *built-in field*), leidžiantį tirti krūvininkų pernašą itin stipriuose elektriniuose laukuose. Tokiu būdu atsiranda palankios sąlygos Blocho stiprinimui stebėti.

Tam reikalingos sąlygos buvo surastos analitiškai modeliuojant stabilumo sąlygas išplėtojant pirminę H. Kroemer'io idėją [53]. Tam tikslu buvo sukurtas analitinis modelis, kuris leido nustatyti, jog mažų srovių atveju taip vadinamas „Kroemerio taškas“ išplinta į „Kroemerio intervalą“, kuriame elektrinis laukas yra vienalytis. Nanosekundinių DC įtampos impulsų metodikos panaudojimas leido sukurti stiprų elektrinį lauką diodiniame darinyje su AlGaAs/GaAs supergardele. Taikant sukurtą analitinį modelį, eksperimentiškai pastebėti stipraus elektrinio lauko sąlygoti mikrobangų ypatumai buvo susieti su Blocho stiprinimo reiškiniu puslaidininkinėje supergardeleje.

3.2 Kontroliuojamos injekcijos supergardelinio diodo idėja

3.2.1 Elektrinio stabilumo kriterijus

Šiame darbe siūloma idėja remiasi krūvininkų pernašos vienoje 1D supergardelės minijuostoje modeliu. SL, kurios ilgis L yra prijungta labai plonais kontaktais. Joje elektrono dispersija gali būti užrašoma dėsniu [5]:

$$\varepsilon(p) = \frac{\Delta}{2} \left(1 - \cos \frac{pa}{\hbar} \right), \quad (3.1)$$

čia p yra judesio kiekio momentas, Δ - minijuostos plotis, a - SL periodas. Tolygiai legiruota SL veikia vienos minijuostos transporto režime, kuriame elektrono dreifo greitis v netiesiškai priklauso nuo elektrinio lauko pagal Esaki-Tsu formulę [5]:

$$v(F) = v_0 \frac{F}{1 + F^2}, \quad (3.2)$$

čia $v_0 = \Delta a / (2\hbar)$ yra maksimalus dreifo greitis minijuostoje, F - normuotas elektrinis laukas E/E_{cr} , kur $E_{cr} = \hbar/ea\tau$ (τ - elektrono impulso relaksacijos trukmė) yra Esaki-Tsu kritinis laukas.

Jeigu $E > E_{cr}$ ($F > 1$), tai SL pereina į neigiamo diferencialinio judrio režimą, kuriame vyksta Blocho osciliacijos. Mikrobangų dažnyje galiotų sąlyga $\omega\tau \ll 1$, todėl dreifinis greitis momentiška seką kintamą elektrinį lauką ir 3.2 lygtis gali būti naudojama analizuoti tiek DC, tiek ir AC supergardelės savybes. Svarbu atskirti šį NDM mechanizmą nuo tarpslėninės sklaidos, kuri yra tipinė daugeliui tūrinių puslaidininkių [43].

NDM būseną gali būti nestabili jei saudauga $n_d L$ yra daugiau nei kritinė vertė, t.y. Kroemer'io kriterijus yra patenkinamas [42]. Priešingu atveju elektrinio lauko domenai nesusiformuoja ir erdvinis elektrinio lauko profilis SL išlieka stabilus. Jeigu nagrinėtume atvejį, kai SL yra su injekciją kontroliuojančiu kontaktu, tai dreifo greitis būtų išreiškiamas Esaki-Tsu formule, o atitinkamas kriterijus galėtų būti suformuluotas kaip McCumber-Chynoweth kriterijus supergardelėms. Pagal šį kriterijų SL yra elektriškai stabili pasirinktam DC laukui, jeigu

$$\alpha < 7, \quad \alpha = \frac{en_d L}{\varepsilon_0 \varepsilon_r E_{cr}}, \quad (3.3)$$

čia α yra bedimensinis parametras atitinkantis $n_d L$, ϵ_0 ir ϵ_r - dielektrinė konstanta ir vidutinė santykinė dielektrinė skvarba SL medžiagai. Svarbu paminėti, kad pakankamai stiprių elektrinių laukų atveju stabili situacija gali būti realizuota ir didelėms $\alpha > 7$ vertėms. Ribiniu atveju $F = E/E_{cr} \gg 1$ SL tampa stabili, jei

$$F > \frac{\alpha}{2.09}, \quad \text{kai } \alpha \gg 1. \quad (3.4)$$

3.3 ir 3.4 išraiškoms aprašomi stabilumo kriterijai buvo išvesti pagal originalią McCumber-Chynoweth kriterijaus formą [56], kuris, kaip yra žinoma, gerai tinka ominių ir kitų kontaktų su stačiomis charakteristikomis [53] atvejais. Yra žinoma, kad injekciją kontroliuojantys ir barjero tipo kontaktai yra stabilesni nei numato McCumber-Chynoweth kriterijus [57].

Tolimesnėje šio skyriaus eigoje bus laikoma, kad mūsų tyrinėjamas SL prietaisas patenkina bent vieną iš aptartų kriterijų ir jame elektrinio lauko profilis yra stabilus. Didžiausią įtaką prietaiso veikimui turi injektuojantis kontaktas, esantis $x = 0$ plokštumoje. Laikoma, kad tokio kontakto srovės stiprio priklausomybė nuo elektrinio lauko $J_{const}(E)$ yra žinoma.

3.2.2 Stabilumo taškai ir Kroemer'io intervalo įvedimas

Erdvinis elektrinio lauko $E(x)$ ir tūrinio elektronų tankio $n(x)$ pasiskirstymas išilgai SL ašies x yra aprašomas Poisson'o ir srovės tolydumo lygtimis:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n - n_d), \quad j = env_{dr}(E) = const. \quad (3.5)$$

Tolimesnei analizei patogiu įvesti bedimensius dydžius:

$$V_{dr} = v/v_0, \quad F = E/E_{cr}, \quad J = j/(qn_d v_0), \quad \tilde{x} = x/L. \quad (3.6)$$

Apjungus 3.2, 3.3, 3.6 ir 3.5 lygtis gaunama išraiška

$$\frac{dF}{d\tilde{x}} = \alpha \left(\frac{J(1+F^2)}{F} - 1 \right). \quad (3.7)$$

Išvesta lygtis 3.7 apibūdina sistemos elektrinio lauko evoliuciją viendimensinėje erdvėje. Šios sistemos trajektorijos atitinka skirtingus erdvinius elektrinio lauko profilius. Esant tam tikrai pradinei sąlygai $F(0)$ elektrinio

lauko erdvinė evoliucija priklauso tik nuo vienintelio parametro J , kai tuo tarpu parametras α nustato evoliucijos spartą. Lygtis 3.7 turi du stacionarius taškus

$$F_{\pm}(J) = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4J^2}}{2J}, \quad (3.8)$$

kuriuose elektrinis laukas nepriklauso nuo koordinatės, t.y. $F(x) = F(0)$, jei laukas kontakte $F_{in}(J)$ yra artimas F_+ arba F_- taškams. Kadangi $F_+F_- = 1$, tai bet kokiai J vertei visada galios nelygybės $F_- < 1$ ir $F_+ > 1$ (arba dimensiniais dydžiais $E_- < E_{cr}$ ir $E_+ > E_{cr}$). Stacionarus taškas F_+ priklauso NDM būsenai. Tačiau ne visų tipų injektuojantys kontaktai leidžia pasiekti F_+ . Pavyzdžiui, idealus ominis kontaktas su $F_{in} \approx 0$ negali palaikyti elektrinio lauko reikalingo pasiekti NDM būseną. Kroemer'io tašku šiame darbe vadinsime F_+ kartu su atitinkamu darbo tašku SL darinio voltamperinėje charakteristikoje.

Kadangi diferencialinė lytis 3.7 turi tikslų sprendinį, tai atvirkštinis lauko profilis $x(F)$ ir VACH $U(J)$ gali būti randami analitiškai pasirinktam kontaktui su žinoma jo charakteristika. Tolimesnėje skyriaus eigoje bus nagrinėjamas tik eksperimentinėms sąlygoms artimas atvejis su blokuojančiu kontaktu praleidžiančiu santykinai mažą $J \ll 1$ srovę per SL. Teorinė analizė riboje $J \ll 1$ tampa daug paprastesnė ir analitiškai numato naują fizikinę savybę - Kroemerio taško išplitimą į Kroemer'io intervalą.

3.2.3 Elektrinio lauko erdvinis profilis mažų srovių atveju

Fizikiškai sąlyga $J \ll 1$ reiškia, kad į SL injektuojama srovė j_{in} yra daug mažesnė nei pikinė SL srovė $j_p = qn_d v_0 / 2$, kuri apibrėžta Esaki-Tsu kreive 3.2. Šioje riboje stacionarius taškus aprašanti lygtys 3.8 supaprastėja į

$$F_- = J \ll 1, \quad F_+ = 1/J \gg 1, \quad F_+F_- = 1. \quad (3.9)$$

Toliau nagrinėsime NDM režimui priklausančią Kroemer'io tašką. Norint jį pasiekti reikia realizuoti kontaktą, kurio charakteristika leistų sukurti stiprų elektrinį lauką F_{in} , atitinkantį lauką, kai $J \ll 1$. Natūralu, kad toks kontaktas turėtų būti blokuojantis, nes reikia patenkinti silpnos srovės sąlygą $J \ll 1$.

Stiprių elektrinių laukų $F \gg 1$ atveju evoliucijos lygtis (3.7) supaprastėja

į

$$\frac{dF}{d\tilde{x}} = \alpha(JF - 1), \quad (3.10)$$

o bedimensis dreifinis greitis tampa $V_{dr}(F) \approx 1/F$. Matyti, kad ši lygtis turi tik vieną stacionarų tašką F_+ (3.9), kurio aplinkoje $F(x)$ turėtų nepriklausyti nuo x . Toliau parodysime, kad 3.10 lygtimi aprašomas elektrinis laukas gali silpnai priklausyti nuo x net parinkus pradinę sąlygą $F(0) = F_{in}$ toli nuo Kroemer'io taško. Pradinių elektrinių laukų intervalą $F(0)$, kuriam esant, elektrinio lauko profilis darinyje beveik nepriklauso nuo koordinatės toliau vadinsime Kroemer'io intervalu, t.y. intervalu, kuriame esant tam tikram pridėtos išorinės įtampos intervalui, elektrinis laukas supergardenėje yra praktiškai vienalytis.

Ribiniu atveju $JF \ll 1$ lygtyje 3.10 galimos dvi tarpusavyje susijusios interpretacijos. Vienoje iš jų riba atitinka lauką, daug mažesnę negu Kroemer'io taške F_+ , nes $F \ll J^{-1} = F_+$. Kitoje - remiantis 3.5 lygtimi, ši riba apibūdina visišką krūvininkų nuskurdinimą $n \ll n_d$. Šioje riboje lygtis 3.10 turi paprastą sprendinį

$$F(\tilde{x}) = F_{in} - \alpha\tilde{x}, \quad (3.11)$$

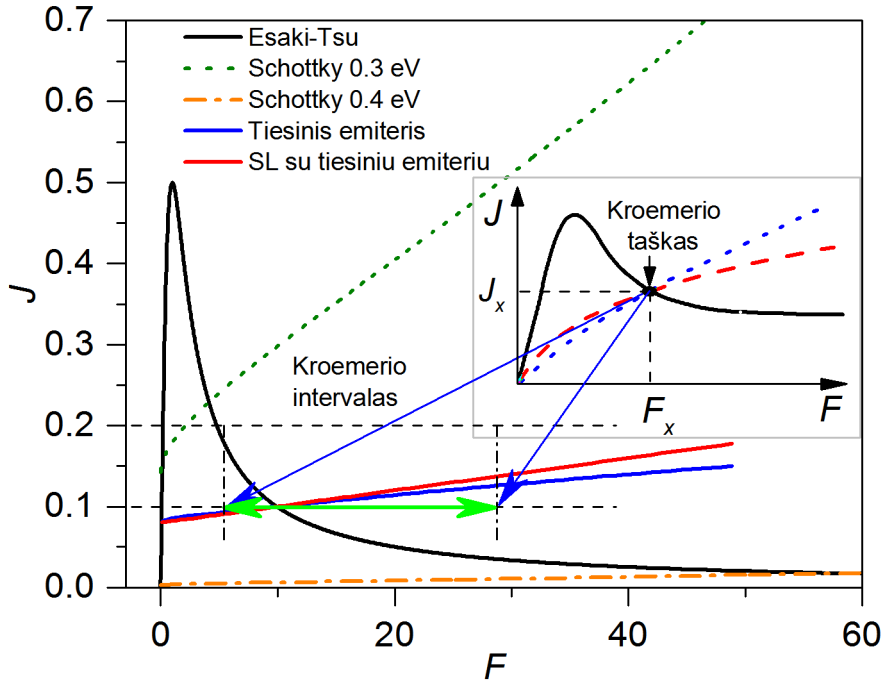
kuris apibūdina tiesišką lauko mažėjimą SL su gradientą nusakančiu parametru α . Iš to seka svarbi išvada, kad, netgi esant visiškam nuskurdinimui, elektrinis laukas gali būti beveik nekintamas, kai $\alpha \simeq 1$.

Bendresniu atveju lygtis 3.10 turi sprendinį

$$F(\tilde{x}) = \frac{1}{J} + \frac{JF_{in} - 1}{J} \exp(\alpha J\tilde{x}) \approx F_{in} + (JF_{in} - 1)\alpha\tilde{x}, \quad \text{kai } \alpha J \ll 1. \quad (3.12)$$

Ši formulė rodo ne tik, kad Kroemer'io taške $F_{in} = F_+ = 1/J$ laukas yra nekintantis ($F(x) = F_{in}$), bet taip pat ir tai, kad tiek stiprėjantis laukas akumuliacijos režime $F_{in} > F_+$, tiek silpnėjantis laukas nuskurdinimo režime $F_{in} < F_+$ yra artimas homogeniškam. Tokiu atveju galima laikyti, kad Kroemer'io taškas išplinta į intervalą, kaip pavaizduota 3.2 pav. Fizikinė priežastis (beveik) homogeniškam laukui yra blokuojantis kontaktas, kuris neinjektuoja pakankamai krūvininkų didelio gradiento elektrinio lauko netolygumams susidaryti. Tai dar aiškiau matoma ribiniu atveju 3.11 visiško

nuskurdinimo, o taip pat ir akumuliacijos $\alpha J \ll 1$ atvejais.



3.2 pav. Srovės priklausomybė nuo elektrinio lauko bedimensinių dydžių formoje: taikant Esaki-Tsu formulę 3.2; tiesinio emiterio atveju ($J = 0.08 + 0.002F_e$); supergardelės su tiesiniu emiteriu; emiterio charakteristika Šotki barjerui kurio aukštis $B_2 = 0.3\text{ eV}$ ir $B_3 = 0.4\text{ eV}$. Mažų srovių riboje Kroemerio intervalą atitinkančios srovės nuspalvintos. Intarpas iliustruoja klasikinį Kroemerio darbą [53], kuris sako, jog Kroemerio taške elektrinis laukas yra vienalytis. Mažų srovių atveju, kai $J \ll 1 \approx 0.1$, tas taškas išplinta į intervalą, kuriame elektrinis laukas yra vienalytis.

Šiame darbe tyrinėjami taip vadinami subkritiniai stiprintuvai dirbantys NDM režime [52], kurių koncepciją pirmą kartą pademonstravo Kroemer'is [53]. Tokio tipo prietaisuose NL sandauga yra mažesnė nei reikalinga judantiems stipraus elektrinio lauko domenams susidaryti, todėl tyrinėjamu atveju su SL, kuriose $v(E)$ nusako Esaki-Tsu formulė, stabilumo kriterijus gali būti užrašyta analitine forma.

Pastovaus DC lauko atveju stabilumo kriterijus gali būti pateiktas kaip [58]

$$\frac{F(1+F^2)}{|1-F^2|} > \alpha, \quad \alpha = \frac{1}{\alpha_0} \frac{eNL}{\epsilon_0 \epsilon}. \quad (3.13)$$

Čia vietoje n_{dc} panaudotas legiravimo tankis N pritaikius elektrinio neutralumo principą. Stipriems laukams kai $F \gg 1$ ($E_{dc} \gg E_{cr}$) kriterijus 3.13

įgyja paprastesnę formą $F > \alpha$, kuri rodo, kad stipriame elektriniame lauke supergardelė yra visada stabili.

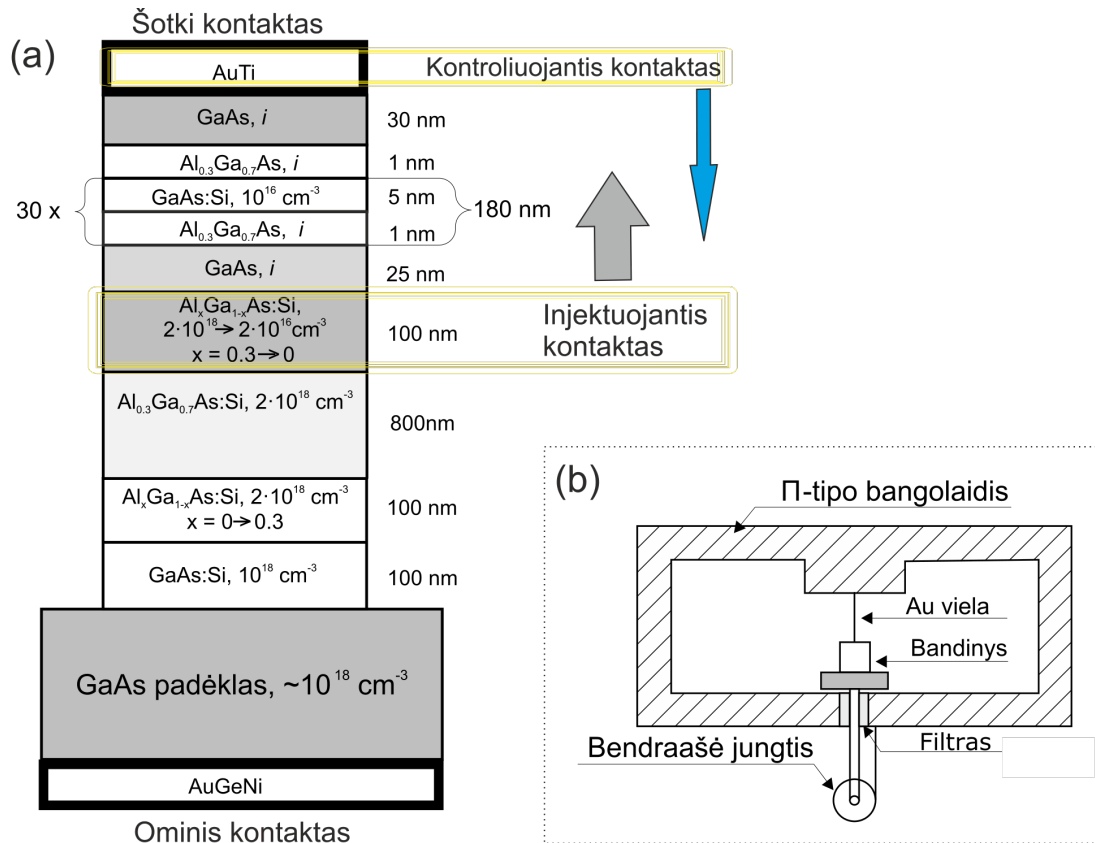
3.3 Bandiniai ir eksperimentinės metodikos

3.3.1 Supergardelės architektūra

Kambario temperatūros darinys mikrobangų stiprinimui su kontroliuojančia injekcija buvo sudarytas iš siliciu legiruotos (legiravimo tankis 10^{16} cm^{-3}) GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As supergardelės. Norint eksperimentiškai patvirtinti Kroemer'io intervalo susidarymą, reikia išpildyti stipraus elektrinio lauko sąlygotą krūvininkų pernašą, kai laukas $F \gg 1$. Kaip jau žinome iš 3.2.2 skyriaus, tai viena iš Kroemer'io intervalo sąlygų, kuomet Kroemer'io taškas apibrėžiamas kaip $F_+ = J^{-1}$, kai $J \ll 1$. Būtent todėl eksperimentui buvo pasirinkta supergardelė su plačia 104 meV pločio minijuosta, kas leidžia tirti minijuostos pernašos ypatumus esant pridėtam $31E_{cr}$ stiprio elektriniam laukui.

Dažniausiai elektriniams krūvininkų pernašos reiškinų tyrimams naudojamos struktūros su ominiais kontaktais. Tačiau šiame darbe SL struktūroje buvo tikslingai suformuoti ne ominiai, o asimetriniai Šotki ir heterostruktūros tipo kontaktai. Bandinio struktūra yra pavaizduota 3.3 pav.

Darinio viršuje buvo suformotas Šotki tipo kontaktas. Jis buvo reikalingas sukurti stiprų vidinį elektrinį lauką bei atlikti kontroliuojančio elektrodo funkciją, kai supergardelinis diodas prijungtas tiesiogine kryptimi. Esant atbulinei įtampai, sukuriančiai stipriai nuskurdintą sritį, šis kontaktas atliko injektuojančio elektrodo vaidmenį. Kitoje struktūros pusėje tarp SL ir padėklo yra įterpta GaAs/AlGaAs heterosandūra. Tiesiogine kryptimi ji veikia kaip injektuojantis elektrodas, o užtvarine - jos funkcija keičiasi į kontroliuojančio kontakto, kai tuo metu Šotki kontaktas injektuoja elektronus. Tokiu būdu tiesiogine kryptimi elektrinis laukas tampa homogeniškas, pasireiškia erdvinio krūvio ribotų srovių režimas, ir tuo pačiu elektrinio lauko stipris yra pakankamas išlaikyti SL darbinį tašką Esaki-Tsu srityje. Užtvarine kryptimi homogeniškas laukas yra sudaromas nuskurdintoje srityje per visą SL ilgį.

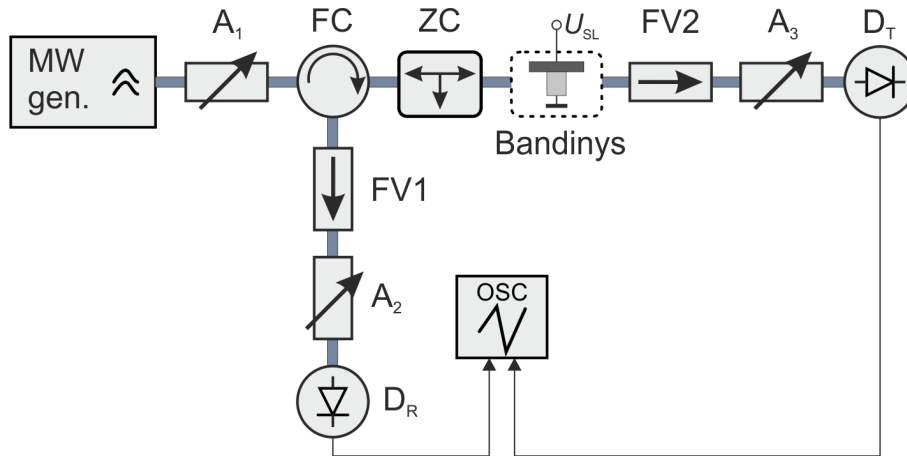


3.3 pav. GaAs/AlGaAs pupergardelės struktūra (a). Bandinio patalpini-
mas bangolaidyje (b).

3.3.2 Nanosekundinių impulsų ir mikrobangų metodikos

Elektrinio lauko sąlygotai krūvininkų dinamikai tirti mikrobangų dažnių diapazone bandinys buvo montuojamas į Π -tipo bangolaidį. Bangolaidžio skerspjūvis su jame įmontuotu bandiniu pavaizduotas 3.3b pav. Tiriamoji struktūra patalpinta bangolaidžio centre TE_{10} modai, kur mikrobangų elektrinis laukas yra maksimalus. Bandinio Šotki kontaktas yra prijungtas prie bangolaidžio korpuso su aukso viela. Apatinis ominis kontaktas sujungtas su bendraašio kabelio centrine gysla, kuri išvedama per bangolaidžio sienelę į bendraašę jungtį. Mikrobangų galvaniniam atšimimui panaudotas filtras tarp bendraašio kabelio gyslos ir bangolaidžio. Tokia konstrukcija leidžia bandinį vienu metu paveikti ir DC įtampa, ir aukštadažniu mikrobangų elektriniu lauku.

Mikrobangų metodikos eksperimentinė schema pateikta 3.4 pav. Mikrobangų traktas suformuotas iš standartinių stačiakampio formos bango-



3.4 pav. Mikrobangų trakto schema pralaidumo ir atspindžio matavimams. Joje naudojami komponentų žymenys: MW gen. - mikrobangų generatorius, $A_{1,2,3}$ - mikrobangų galios slopintuvas, FC - feritinis cirkuliatorius, FV1 ir FV2 - feritiniai ventiliai, ZC - ketvirčio bangos ilgio varžų transformatorius, D_R ir D_T - detektoriai atspindėtai ir praėjusiai mikrobangų spinduliuotei, OSC - skaitmeninis oscilografas.

laidžių (išmatavimai $22.86 \times 10.16 \text{ mm}^2$) skirtų X dažnių diapazonui nuo 8.2 iki 12.4 GHz. Mikrobangų spinduliuotei generuoti buvo naudojami derinamo dažnio klistronas (8.2 – 12.4 GHz) ir fiksuoto dažnio magnetronas (9.4 GHz). Iš generatoriaus mikrobangos nukreipiamos feritiniu cirkuliatoriumi (FC) į perdavimo liniją. Joje per derinamą varžų transformatorių (ZC, angl. *impedance transformer*) mikrobangos pasiekia bandinį. Praėjusi pro bandinį mikrobangų galia registruojama detektoriumi D_T . Panaudojant feritinį ventilį (FV2) linija taip suderinta, kad detektoriaus atspindėta galia nepasiektų bandinio. Mikrobangų linija, skirta registruoti atspindėtą nuo pralaidumo linijos galią, sudaryta iš ekvivalentiškų komponentų.

Mikrobangų galiai galioja galios balanso sąlyga

$$P_0 = P_R + P_T + P_A, \quad (3.14)$$

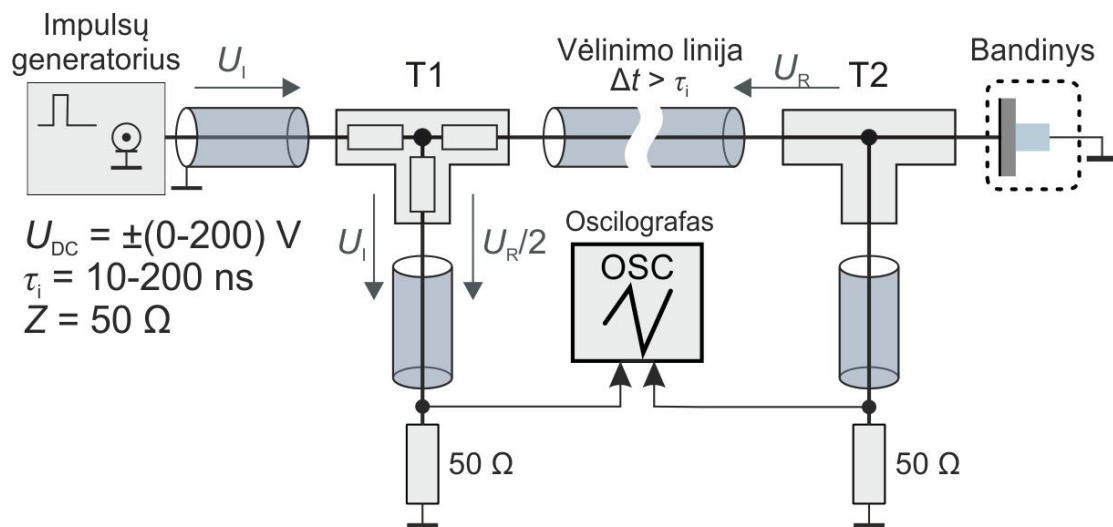
čia P_0 , P_R , P_T , P_A yra atitinkamai krintanti, atspindėta, praėjusi ir sugerta galia. P_R priklauso nuo linijos impedanso suderinimo. Suderinus linijos impedansą taip, kad atspindys būtų minimalus, galima pereiti į realios varžos atvejį su $P_R \approx 0$. Tuomet krintančios ir praėjusios galios skirtumas pagal 3.14 bus lygus $P_A = P_0 - P_T$.

Perdavimo linijos impedanso derinimui buvo panaudotas varžų transformatorius (ZC), sudarytas iš dviejų lygiagrečių kvarcinių plokštelių, kurių

storis atitinka ketvirtį bangos ilgio. Linijos impedansas yra derinamas keičiant atstumą tarp plokštelių ir atstumą tarp bandinio ir plokštelių. Impedanso suderinimas užtikrinamas stebint atspindžio detektoriaus D_R išduodamą signalą.

Mikrobangų galios pokytis pralaidume ir atspindyje registruojamas Šotki diodais. Detektorių įtampos signalai matuojami oscilografu (Lecroy Wave-Pro 7200). Visiems mikrobangų galios matavimams detektorių signalai yra kalibruojami preciziniais mikrobangų slopintuvais ($A_{1,2,3}$). Tuomet detektorių signalo pokytį galima konvertuoti į mikrobangų galios pokytį. Detektorių jautris prie kelių mW galios yra šimtai V/W ir didėja, kai galia mažėja iki μW . Detektoriais registruojant mikrobangų galios pokytį jų išduodamo signalo (DC įtampos) atsako trukmė yra kelių nanosekundžių eilės.

Stipraus DC elektrinio lauko sukūrimui bandinyje buvo pritaikyta nanosekundinės trukmės DC įtampos impulsų metodika. Eksperimentinė schema panaudojant bendraašius kabelius pateikta 3.5 pav.



3.5 pav. Impulsinė pastovios įtampos prijungimo schema naudojama voltamperinių charakteristikų ir mikrobangų pralaidumo eksperimentuose.

Impulsų generatorius formuoja aukštos DC įtampos (U_I) ir nanosekundinės trukmės (τ_i) impulsus, kurie perduodami bendraašiais kabeliais su bangine varža $Z = 50 \Omega$. Juose impulsų sklidimas gali būti aprašomas perdavimo linijų teorija. Kaip matyti eksperimento schemeje, panaudojant suderinto impedanso trišakį taške T1 galima išmatuoti kritusio U_I ir du kartus sumažinto atspindžio $U_R/2$ impulsų amplitudes. Tuo tarpu kitas trišakis taške T2 leidžia išmatuoti įtampą ant bandinio $U_{SL} = U_I + U_R$. Pa-

žymėtina, kad krintantis impulsas U_I yra atspindimas atgal dėl taške T2 esančio skirtingo impedanso, kuris yra $R_x = R_{SL}Z/(R_{SL} + Z)$ (čia R_{SL} yra bandinio varža). Tokiu atveju atspindėto ir praėjusio impulso amplitudes nusako pralaidumo K_T ir atspindžio K_R koeficientai:

$$K_T = \frac{U_{SL}}{U_I} = \frac{2R_x}{R_x + Z}; \quad K_R = \frac{U_R}{U_I} = \frac{R_x - Z}{R_x + Z}. \quad (3.15)$$

Remiantis pateiktomis išraiškėmis (3.15) matuojant kritusio $U_I(t)$ ir atspindėto $U_R(t)$ impulsų laikines priklausomybes galima rasti dydžius $U_{SL}(t)$ ir $R_{SL}(t)$ reikalingus bandinio voltamperinei charakteristikai išmatuoti. Korektiškiems matavimams svarbu U_I ir U_R impulsus atskirti laike. Eksperimentinėje schemoje tai atliekama panaudojant vėlinimo linija tarp T1 ir T2, kuri yra ilgesnė už impulso trukmę ($\Delta t > \tau_i$).

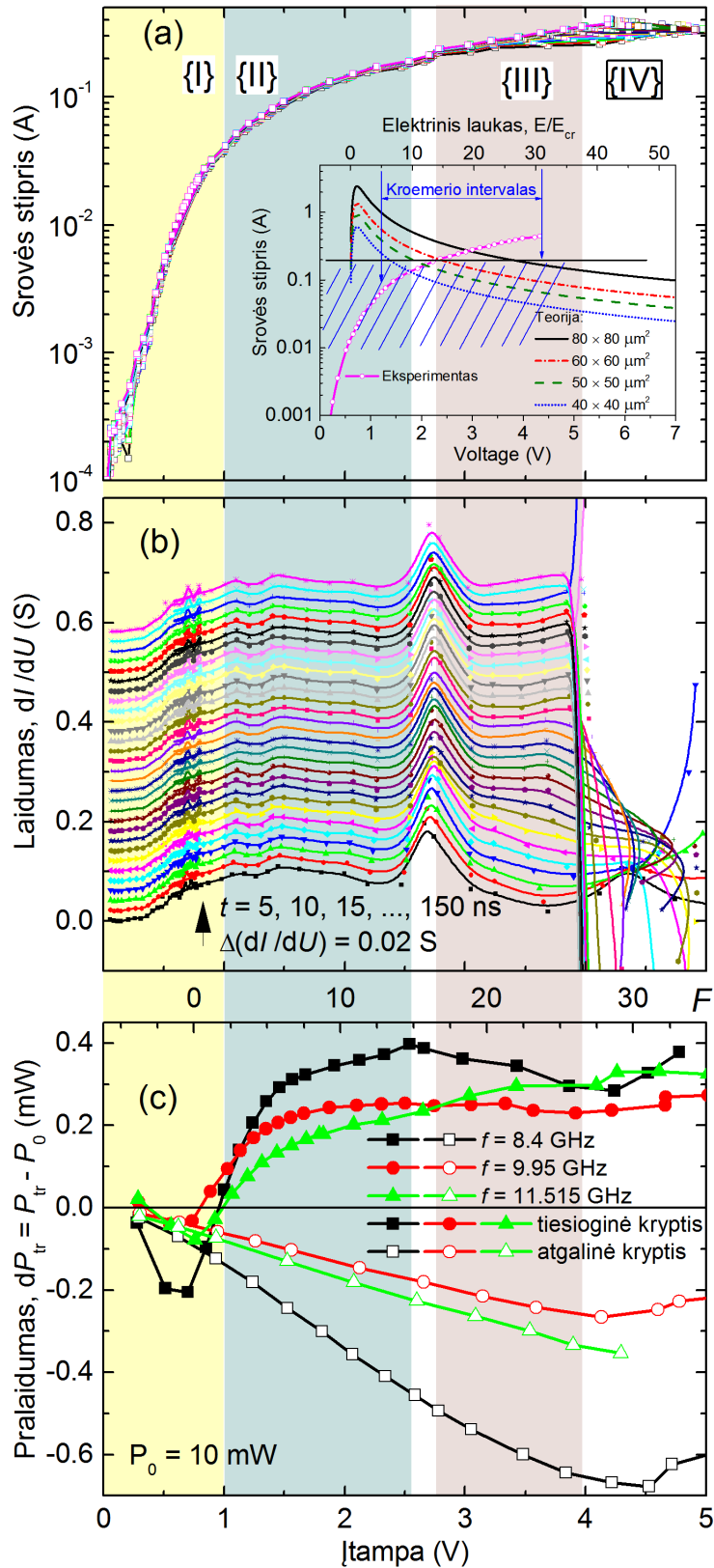
Vienu metu taikant aprašytas mikrobangų ir nanosekundinės trukmės impulsų matavimo metodikas galima tirti stipraus DC elektrinio lauko sąlygotus ypatumus mikrobangų dažnių ruože su nanosekundine laikine skyra.

3.4 Stipraus elektrinio lauko sąlygotų mikrobangų pralaidumo pokyčio tyrimo rezultatai

Kartu apjungiant nanosekundinės trukmės DC impulsų bei mikrobangų metodikas buvo atlikti tiriamos struktūros voltamperinių charakteristikų ir mikrobangų spinduliuotės pralaidumo matavimai. Matavimų rezultatai pateikti 3.6 pav.

Norint nustatyti procesų laikinę evoliuciją voltamperinės charakteristikos išmatuotos skirtingais laiko momentais kas 5 ns per visą DC impulso trukmę nuo 5 ns iki 150 ns (3.6a pav.). Išdiferencijavus šias charakteristikas gautos atitinkamos elektrinio laidumo charakteristikos (3.6b pav.). Esant įtampoms mažesnėms nei 2 V, žymių ypatumų nepastebėta. Didėjant įtampai virš 2 V srovės charakteristikos pradeda sotintis, tačiau joje neigiamo diferencialinio laidumo srities (NDC) nepastebėta.

Pritaikyta nanosekundinės trukmės impulsinė metodika leido išskirti 4 charakteringus procesus vykstančius supergardelėje. Prie mažų įtampų (iki 1 V), I sritis - matomas srovės ir laidumo didėjimas. II srityje (1-2.7 V) -



3.6 pav. Išmatuotos GaAs/AlGaAs supergardelės voltamperinės charakteristikos skirtingais laiko momentais kas 5 ns (a). Intarpe atidėtos suskaičiuotos srovės stiprio priklausomybės pagal Esaki-Tsu modelį esant skirtingiems mezos geometriniais išmatavimams. Iš voltamperinių charakteristikų apskaičiuoto laidumo priklausomybė nuo pridėtos įtampos (b). Mikrobangų stiprinimo priklausomybė nuo pridėtos įtampos (c). Mikrobangų šaltinis - klistronas.

srovės didėjimas sulėtėja, kai tuo tarpu laidumas mažai kinta. Pastebėtas laidumo pikas ties 2.7 V įtampa gali būti siejamas su Zener'io tuneliavimu į antrą minijuostą, kurią nuo pirmosios skiria 47 meV energijos tarpas. Toliau didėjant įtampai (2.7-4 V), III srityje, tuneliavimas tarp gretimų kvantinių duobių galimai vis labiau pasireiškia, todėl IV srityje, kai įtampa viršija 4 V, susidaro *S*-tipo srovės nestabilumai dėl neigiamo diferencialinio laidumo. 3.6a pav. intarpe pavaizduotos teorinės srovės stiprio vertės, apskaičiuotos panaudojant 3.5 ir 3.2 lygtis esant skirtingiems mezos išmatavimams. Gautos Esaki-Tsu tipo kreivės yra atidėtos kartu su eksperimentine voltamperine charakteristika. Jos susikirtimas su Esaki-Tsu kreive atitinka Kroemerio tašką, kuriame elektrinis laukas yra vienalytis. Mus domina mažų srovių atvejis, atitinkantis sritį žemiau horizontalios $I = 0.2 \text{ A}$ linijos. Matyti, jog mažų srovių atveju geriausiai atitinka $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ mezos išmatavimų atvejis, leidžiantis daryti išvadą, kad dėl paviršiaus efektų srovė teka ne visu mezos skerspjūviu (jos matmenys yra $80 \times 80 \mu\text{m}^2$). Esaki-Tsu SL modelis remiasi ypač sparčiais procesais, todėl tokie rezultatai rodo, kad pridėta įtampa leidžia perderinti SL į skirtingus darbinis režimus, kas suteikia galimybę pritaikius mikrobangų metodikas pademonstruoti darinio ypatumus, stebimus aukštame dažnyje.

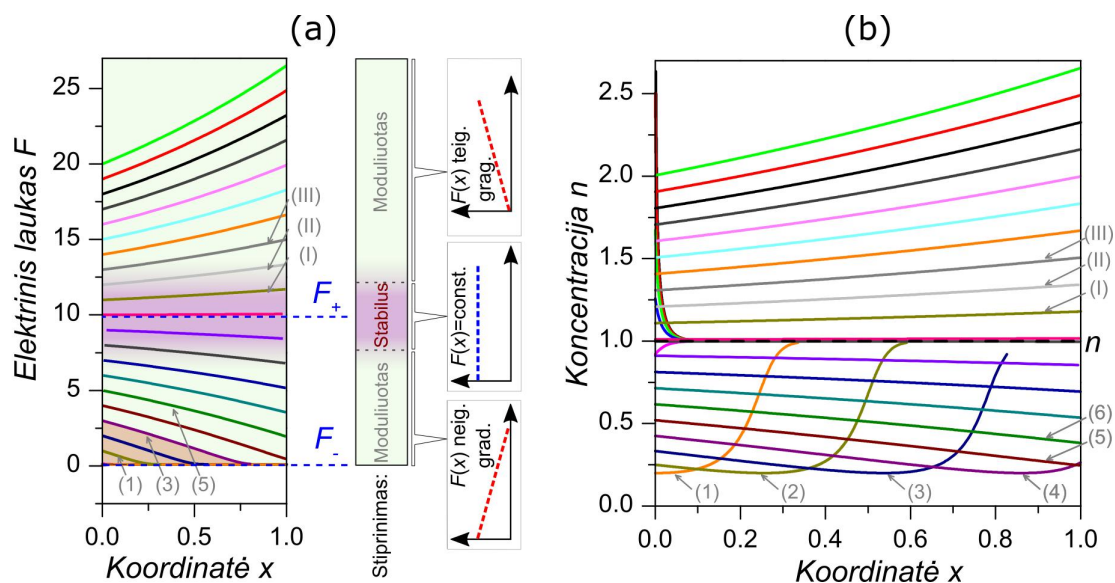
Struktūros atsako mikrobangų spinduliuotei ypatumai paveikiant ją aukšto dažnio mikrobangų spinduliuote pavaizduoti 3.6c pav. Jame pateiktas praėjusios pro struktūrą mikrobangų galios pokyčio priklausomybė nuo pridėtos išorinės DC įtampos. Kaip matyti praėjusios mikrobangų galios pokyčio priklausomybė stipriai skiriasi nuo pridėtos DC įtampos. Užtvarine kryptimi praėjusios galios pokytis yra neigiamas - pasireiškia sugertis. Tiesiogine kryptimi galios pokytis netgi keičia ženklą, iš neigiamo tampa teigiamu, kas reiškia praėjusios mikrobangų galios padidėjimą - stiprinimą. Analizuojant išmatuotą priklausomybę derėtų įvertinti ir mikrobangų atspindžio pokytį. Eksperimento metu mikrobangų traktas buvo taip suderintas, kad atspindėta galia būtų artima nuliui nesant prijungtos išorinės DC įtampos.¹ Todėl galima laikyti, kad visi ypatumai mikrobangų pralaidume yra sietini su fizikiniais procesais bandinyje, t.y. su aktyviąja bandinio varža.

Rezultatų interpretacijai pridėta DC įtampą galime perskaičiuoti į nor-

¹Išmatuota mikrobangų atspindžio galios priklausomybė nuo pridėtos DC įtampos bus pateikiama tolimesnėje skyriaus dalyje (3.8 pav.).

muotą elektrinio lauko stiprio vertę F (atidėta viršutinėje x ašies skalėje 3.6c pav.), laikant, kad visa įtampa krinta aktyvioje bandinio srityje. Kaip matyti iš rezultatų tiesiogine kryptimi, prie mažų įtampų, iki 0.6 V , mikrobangų pralaidumas yra neigiamas. Kai įtampa pasiekia 1 V vertę, kas atitinka $3E_{cr}$ elektrinį lauką, pralaidumas keičia ženklą ir struktūra iš sugeriančios pasidaro stiprinanti. Stiprinimas pradeda sotintis prie maždaug 1.5 V įtampos, kas atitinka elektrinį lauką lygų $6.9E_{cr}$, ir tai tęsiasi iki 2.7 V , atitinkamai $E = 16E_{cr}$. Taip pat stiprinimas išlieka beveik toks pats 8-11 GHz mikrobangų dažnių ruože. Sugretinus voltamperinę ir mikrobangų galios pokyčio charakteristikas stebimos tam tikros koreliacijos su anksčiau paminėtomis 4 charakteringomis sritimis: I) laidžiui didėjant pasireiškia mikrobangų sugertis laisvaisiais krūvininkais; II) pralaidumo skirtumas keičia ženklą, kas rodo monotonišią stiprinimo atsiradimą visiem (tiriamiems) dažniams dėl patenkinamų sąlygų neigiamam diferencialiniam laidumui susidaryti; III) stiprinimas panašaus dydžio visoje srityje, tačiau stiprinimo pobūdis tampa skirtingas: prie mažesnio dažnio stiprinimas didesnis, prie didesnio - mažesnis, kadangi galimai keičiasi Esaki-Tsu režimas dėl pridėtos įtampos; IV) pasireiškia srovės nestabilumai, tačiau stiprinimas vyksta ir toliau. Kitaip nei tiesiogine kryptimi, atgaline kryptimi eksperimento metu tiriamame dažnių ruože ir esant šiam pridėtos įtampos intervalui teigiamo praėjusios mikrobangų galios pokyčio nebuvo pastebėta (3.6c pav. apatinė dalis).

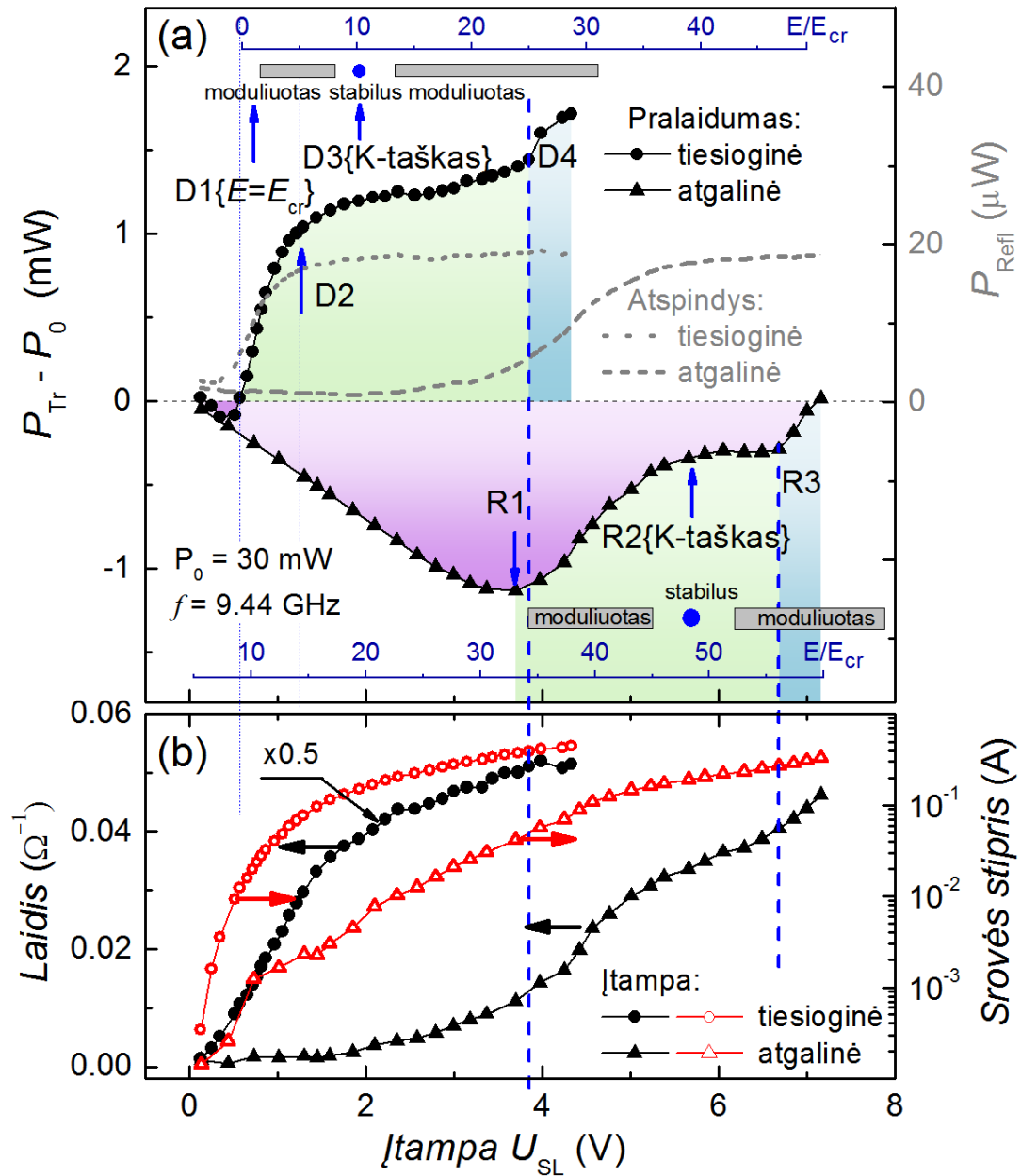
Nagrinėjamą fizikinį modelį paaiškina teoriniai elektrinio lauko ir krūvininkų koncentracijos pasiskirstymo pagal koordinatę skaičiavimai, pavaizduoti 3.7 pav. Šie rezultatai gauti sprendžiant 3.7 lygtį keičiant kraštinę sąlygą $F(0)$, kas atitinka elektrinio lauko vertę sandūroje tarp kontakto ir supergardenės. Didėjant elektriniam laukui, kinta jo profilis koordinatės x atžvilgiu. Tam, kad SL vyktų stiprinimas, elektrinis laukas turi pasiekti Esaki-Tsu kritinę vertę ($F = 1$). Tačiau prie mažesnių elektrinių laukų, kaip pvz. kreivė (1), elektrinio lauko gradientas yra neigiamas, ir tik tam tikroje SL dalyje yra sudaromas virškritinis elektrinis laukas. Didėjant elektriniam laukui, gradientas mažėja ir vis didesnė SL dalis persijungia į stiprinimo režimą ($F > 1$), kol galiausiai, kai $F = 5$, visoje SL susidaro virškritinis laukas. Kai elektrinis laukas pasiekia vertę $10E_c$, atitinkančią Kroemerio tašką F_+ , elektrinis laukas visoje struktūroje pasidaro vienalytis (homogeniškas). Kriomer'io taške elektrinio lauko gradientas lygus nuliui ir išlieka nedidelis



3.7 pav. Elektrinio lauko (a) ir krūvininkų koncentracijos (b) erdvinis pasiskirstymas supergardenėje, apskaičiuotas skaitmeniškai sprendžiant 3.7 lygtį kai $\alpha = 5$ ir $J = 0.1$. Aibė skirtingų kreivių gaunama keičiant elektrinio lauko dydį kontakto ir supergardenės sandūroje intervale $F_- < F(0) \leq XF_+$ su žingsniu $\Delta F(0) = 1$.

gana plačiame elektrinių laukų ruože, kurį nusako Kroemer'io intervalas. Kai elektrinis laukas priklauso šiam intervalui, elektrinio lauko pasiskirstymas darinyje yra artimas homogeniškam ir taip sudaromos sąlygos reikalingos Blocho stiprinimui. Elektrinio lauko vertės toliau nuo Kroemer'io taško taip pat priklauso Kroemer'io intervalui. Vienalytis elektrinis laukas, kaip matyti iš 3.7 pav. susidaro tada, kai elektrinio lauko vertė yra apie $10E_{cr}$. Žemiau šios vertės elektrinis laukas kinta tiesiškai, t. y. turi gradientą. Jei gradientas yra teigiamas – tai atitinka krūvininkų akumuliaciją, jei yra neigiamas – nuskurdinimą. Esant tokioms sąlygoms, elektronas judėdamas per SL patiria elektrinio lauko stiprio kitimą. Ekvivalentišką situaciją elektronui vienalyčiame elektriniame lauke galima sukurti ir pridėjus pjūklo forma laike kintantį elektrinį lauką. Publikuoti teoriniai darbai [54, 55] teigia, jog Blocho stiprinimas gali pasireikšti esant moduliuiotam elektriniui laukui. Remiantis šiais samprotavimais stiprinimą Kroemer'io taške vadinsime stabilium Blocho stiprinimu, o Kroemer'io intervalo kraštuose (kur elektrinis laukas turi gradientus) – moduliuiotu Blocho stiprinimu.

Aprašytas teorinis modelis buvo pritaikytas eksperimentinių rezultatų analizei. 3.8 pav. pateiktos išmatuotos mikrobangų pralaidumo pokyčio, atitinkančio stiprinimą, laidžio ir srovės priklausomybės nuo pridė-



3.8 pav. Praėjusios ir atspindėtos mikrobangų spinduliuotės galios priklausomybė nuo pridėtos įtampos GaAs/AlGaAs supergardelei tiesiogine ir užtvarine kryptimi (a). Mikrobangų atspindžio galia pateikta dviem eilėms mažesnėje skalėje, kadangi mikrobangų traktas buvo suderintas minimaliam atspindžiui. Krintanti mikrobangų spinduliuotė buvo generuojama magnetronu, kurio emituojama galia lygi 30 mW. Atitinkamos voltamperinės charakteristikos pateiktos (b) dalyje laidžio ir srovės pavidale.

tos įtampos. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų sugretinimui 3.8 pav. viršutinėje dalyje pažymėtas įtampos kritimui aktyvioje srityje atitinkantis elektrinis laukas E/E_{cr} . Jungiant įtampą tiesiogine ir atgaline kryp-

timis šis laukas skiriasi dėl struktūros vidinio elektrinio lauko, kadangi $E/E_c = (U \pm U_{built-in})/d$, kur $U_{built-in} = 0.6$ ir $d = 236\text{nm}$ yra potencialų skirtumas dėl vidinio elektrinio lauko bei aktyviosios srities ilgis. Kaip galima matyti iš rezultatų, stiprinimas sparčiai didėja elektrinių laukų intervale $0-5.4E_{cr}$ (1.3 V). Pasiėkus $10E_{cr}$, atitinkamai 1.9 V, stiprinimas beveik nekinta ir intervale $15E_{cr}-27E_{cr}$ vėl iš lėto kyla. Ta sritis, kurioje stiprinimas beveik nekinta, gali būti siejama su stabilaus Blocho stiprinimo pasireiški- mu. Atitinkamai gretimos sritys, kuriuose stiprinimas didėja, gali būti sie- jamos su moduluoto Blocho stiprinimo apraiška: mažesnių įtampų pusėje dėl neigiamo elektrinio lauko gradiento ir didesnių - dėl teigiamo. Remiantis teoriniais stabilumo įvertinimais tiriama struktūra turėtų būti stabili iki tol kol elektrinis laukas pasieks vertę lygią $31E_{cr}$. Iš eksperimentinių duomenų matyti, kad nestabilumai pasireiškia ties maždaug 4 V įtampa, kas atitinka $27E_{cr}$ - o tai visai neblogas sutapimas su teoriniu stabilumo įvertinimu.

Supergardelės injektuojantis kontaktas vaidina svarbų vaidmenį stiprini- mo veiksenoje. Tam, kad supergardelė stiprintų krintančią spinduliuotę, didžiojoje jos dalyje diferencialinis judris turi būti neigiamas. Tai reiškia, kad egzistuoja tam tikra slenkstinė F_{in} vertė, kurios pakanka didžiojoje da- lyje supergardelės sudaryti elektrinį lauką, didesnę nei Esaki-Tsu kritinis laukas. Pavyzdžiui, teorinis lauko ir koncentracijos profilis su $J = 0.1$ rodo (3.7 pav.), jog visa supergardelė pereina į NDV veikseną, kai $F_{in} = 4-5$. Ši vertė gana gerai atitinka eksperimentiškai stebimą slenkstinę įtampą, prie kurios prasideda stiprinimas tiesioginiame SL jungime (3.6 pav.). Stiprini- mas visada prasideda nusukardinimo būsenoje, ir neigiamas elektrinio lauko gradientas gali turėti skirtingas vertes priklausomai nuo blokuojančio kon- takto savybių.

Diodinė darinio struktūra su Šotki tipo kontaktu SL viršuje ir hetero- sandūra apačioje, leidžia ištirti skirtingus injektuojančio ir blokuojančio elektrodo sukeltus efektus priklausomai nuo pridėtos įtampos. Tiesiogine kryptimi injektuojantis kontaktas yra heterosandūra. Tuomet veikimas yra apsprendžiamas injektuojančio kontakto su sekliu barjeru (angl. *shallow barrier*). Kitu atveju, kai SL prijungta užtvarine kryptimi, krūvininkus in- jektuos gilus barjero (angl. *deep barrier*) Šotki tipo kontaktas. Kroemer'io intervalas gali būti realizuotas naudojant abu šių kontaktų tipus. Jį sudaro elektrinio lauko ties kontaktu F_{in} vertės, kurios yra tiek mažesnės, tiek ir didesnės už Kroemer'io tašką F_+ . Laukas ties kontaktu priklauso nuo te-

kančios per darinį srovės, kurią užduoda pridėta išorinė įtampa. Situacija keičiasi injekciją ribojančių kontaktų atveju, kai srovė yra maža. Tuomet injektuojanti srovė beveik nepriklauso nuo pridėtos įtampos, bet ja galima tiesiškai keisti elektrinį lauką ties injektuojančiu kontaktu F_{in} ir tokiu būdu sukurti skirtingus elektrinio lauko profilius pavaizduotus 3.7 paveiksle.

Skirtingai nei seklaus barjero atveju tiesiogine kryptimi, gilaus barjero atveju teigiamas mikrobangų galios pralaidumo pokytis nepasireiškia. Šiuo atveju srovė J yra mažesnė ir todėl intervalo centro ir jame esančio Kroemer'io taško $F_+ = 1/J$ pozicija pasislenka prie didesnių įtampų. Tuomet stebimi ypatumai yra susiję su kairiąja (nuskurdinimo) Kroemer'io intervalo dalimi. Kai $F \ll F_+$, vyksta visiškas krūvininkų koncentracijos nuskurdinimas. Iš tikrųjų visame Kroemer'io intervale bedimensis elektronų tankis $N = n/n_d$ priklauso nuo lauko F kaip $N = JF$. Tačiau tuo atveju, kai $F \ll F_+$, tuomet $N \ll 1$. Vadinasi, šis stiprus nuskurdinimas sukuria gana didelį neigiamą elektrinio lauko gradientą. Tuomet reikia pakankamai stipraus elektrinio lauko F_{in} , NDM režimas būtų sudaromas per visą SL ilgį. Taigi gilaus barjero atveju slenkstinė stiprinimo įtampa yra didesnė ir tuo pačiu pats stiprinimas yra mažiau efektyvus. To pasekoje visame bandinyje dominuoja sugertis. Toks teiginys galioja ir eksperimentiniams rezultatams, kai užtvarine kryptimi supergardenė rodo sugerties mažėjimą ir pereina į stiprinimo režimą tik prie labai didelių įtampų.

Apibendrinant skyrių, galime teigti, jog buvo teoriškai ir eksperimentiškai ištirti diodai su stipriai susietomis siliciu legiruotomis GaAs/AlGaAs supergardenėmis su injektuojančiais/blokuojančiais kontaktais, skirti Blocho stiprinimui tinkančios aplinkos sudarymui. Remiantis kontroliuojamos injekcijos teoriniais principais, taikomais sub-kritiniams Gunn'o stiprintuvams, sukurtas analitinis teorinis modelis diodui su supergardele, reikalingas surasti sąlygas sudaryti vienalytį elektrinį lauką, reikalingą Blocho stiprinimui pasireikšti. Nustatyta, kad, jei tokia struktūra turi blokuojantį kontaktą, vienalytis elektrinis laukas injeciniame diode gali būti sukuriamas plačiame pridėtos įtampos intervale, t. y. taip vadinamas Kroemer'io taškas sub-kritiniams Gunn stiprintuvams išplinta į Kroemer'io intervalą. Eksperimentiškai ištirta GaAs/AlGaAs supergardenė, turinti asimetrinius injektuojančius/blokuojančius kontaktus – Schottky kontaktą ir GaAs/AlGaAs heterosandūrą. Parodyta, jog kontroliuojamos injekcijos stipriai susietų GaAs/AlGaAs supergardenių diode esant vienalyčiam elektriniam laukui, su-

kurtam nanosekundinės trukmės elektrinio lauko impulsais, tiek tiesiogine, tiek užtvarine kryptimi kambario temperatūroje mikrobangų ruože gali būti stebimas Blocho stiprinimo reiškinys.

Remiantis šiais rezultatais buvo suformuluotas *2-asis ginamasis teiginys*:

Asimetriniai injektuojantys/blokuojantys kontaktai – Schottky kontaktas ir heterosandūra – leidžia sukurti vienalytį elektrinį lauką GaAs/AlGaAs supergardenėje esant atitinkamam pridėtos išorinės įtampos intervalui. Esant šioms sąlygoms stipriai susietos GaAs/AlGaAs supergardenės diode kambario temperatūroje mikrobangų ruože gali būti stebimas Blocho stiprinimas.

4 Terahercinės spinduliuotės šaltinių spinduliuojamos modos bei jų įtaka vaizdinimui

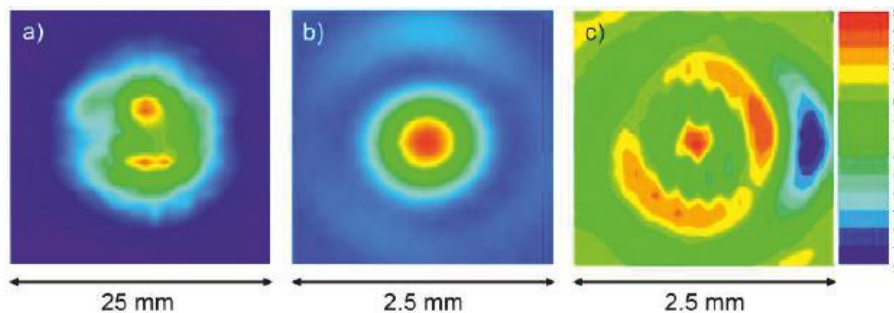
4.1 Teminė literatūros apžvalga

THz modų įtaka THz vaizdinimui atspindžio geometrijoje

Pagrindiniai kriterijai renkantis spinduliuotės šaltinį teraherciniam vaizdinimui yra išspinduliuojama galia ir spindulių pluošto erdvinis pasiskirstymas arba, kitaip tariant, kokią jis modą generuoja. Kuriant THz vaizdinimo sistemas, dėl pakankamai didelio galingumo šaltiniu dažnai pasirenkami THz lazeriai, kurie generuoja mW eilės galios spinduliuotę [59–61]. Siekiant išgauti kuo didesnę vaizdinimo skiriamąją gebą, pageidautina, kad arba šaltinis veiktų fundamentine TEM₀₀ moda, arba būtų naudojama papildomi optiniai komponentai, leidžiantys suformuoti pageidaujamą Gauso skirstinio formos spindulių pluoštą. Tačiau pastarasis būdas į sistemą įveda galios nuostolių, dėl ko paprastai nukenčia sistemos signalas-triukšmas santykis. Vienos modos šaltinis paprastai generuoja mažesnės galios spinduliuotę nei kelių modų šaltinis, tačiau praktiniams taikymams kambario temperatūroje veikiančiose vaizdinimo sistemose reikalinga didesnės galios spinduliuotė, kad būtų kompensuojama THz spinduliuotės sugertis ore [62]. Kompaktiškas sprendimas THz spinduliuotei generuoti galėtų būti pastaruoju metu itin sparčiai tobulinami kvantiniai kaskadiniai lazeriai (QCL). Pirmieji QCL [31] veikė tik skysto helio temperatūroje. Tačiau neseniai pasirodė darbai [63, 64] su kambario temperatūros THz kvantiniais kaska-

diniais lazeriais atveria naujas THz-QCL panaudojimo perspektyvas. Juose THz spinduliuotė generuojama maišant dviejų vidurinės IR srities lazerių spinduliuotes, kurių dažnių skirtumas užduoda QCL veikimo dažnį. Kaip ir kiekvienam lazeriui, taip ir QCL ypač svarbu užtikrinti gerą pluošto kokybę.

Terahercinės spinduliuotės pluošto pavyzdys iš 3 THz QCL pateiktas [61] darbe. Kaip matyti pluoštas susideda iš dviejų pikų (4.1a pav.). Tokį pluoštą sufokusavus lęšiu (4.1b pav.) buvo nustatytas nuo +4.5% iki -8.8% neatitikimas Gauso skirstiniui (4.1c pav.).



4.1 pav. Išmatuotas 3 THz QCL emisijos pluoštas 25 mm atstumu nuo emiterio (a), lęšio židinyje (b) ir skirtumas tarp fokusuoto ir idealaus Gauso skirstinio (c). Adaptuota iš [61].

Siekiant pasiekti vienos modos emisiją, QCL rezonatorių matmenys gali būti mažinami ir pasidaryti mažesni už emituojamos spinduliuotės bangos ilgį. Tokiu atveju emituojamas pluoštas žymiai diverguoja ir pasireiškia spinduliuotės iš skirtingų rezonatoriaus paviršių interferencija [65]. Šios problemos gali būti sprendžiamos QCL rezonatoriuose atliekant pluošto korekcijas plazmoninėmis struktūromis [66]. Tačiau kuriant tokius prietaisus sudėtinga užtikrinti gerą spinduliuotės išstrūkos našumą, kas sumažina prietaiso emituojamą galią.

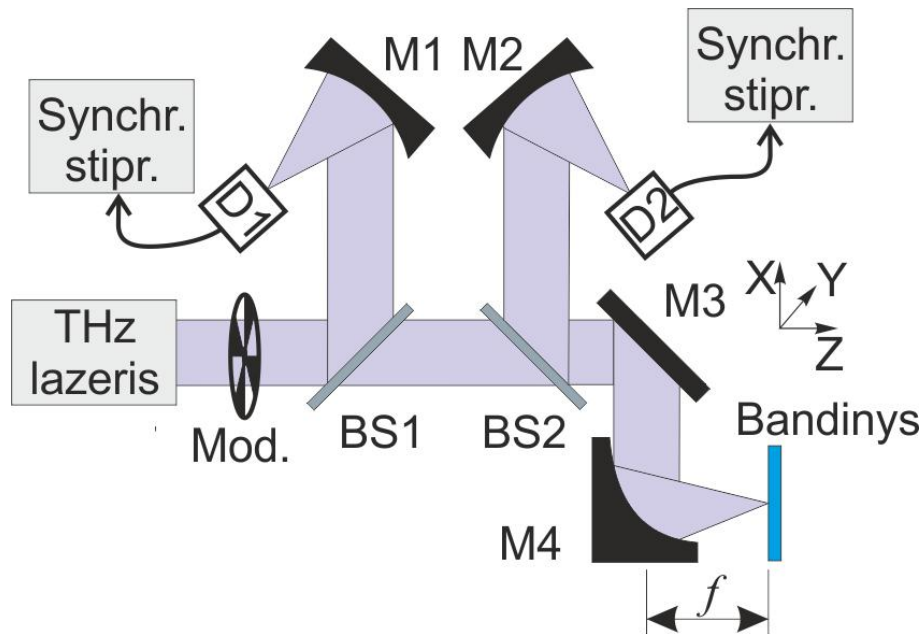
QCL yra pakankamai nauja ir brangi technologija, todėl laboratorijose THz tyrimams vis dar dažnai yra naudojamas CO₂ dujomis kaupinamas molekulinis lazeris. Pirmą kartą realaus laiko THz vaizdinimas su iš mikrobolometrų masyvo pagaminta THz kamera buvo pristatytas [67] darbe. Šis darbas paskatino aktyvų naujų kompaktiškų THz emiterių ir detektorių masyvų tyrimus ir gamybą. Tuo tarpu didelio ploto THz vaizdinimo sistema su molekulinio lazeriu ir pyroelektrinių jutiklių kamera buvo pristatyta darbe [68]. Naudojant 2.52 THz dažnį ir Gausinį pluoštą, nustatyta vaizdinimo skiriamoji geba buvo apie 0.6 mm, kai matavimuose su vieno

jutiklio THz detektoriumi - 0.4 mm [59]. Tuo tarpu tyrimų, nustatančių, kokią įtaką daro neidealaus spindulių pluošto THz šaltinio panaudojimas THz vaizdinimo kokybei, mūsų žiniomis, iki šiol nebuvo atlikta.

4.2 Eksperimento aprašymas

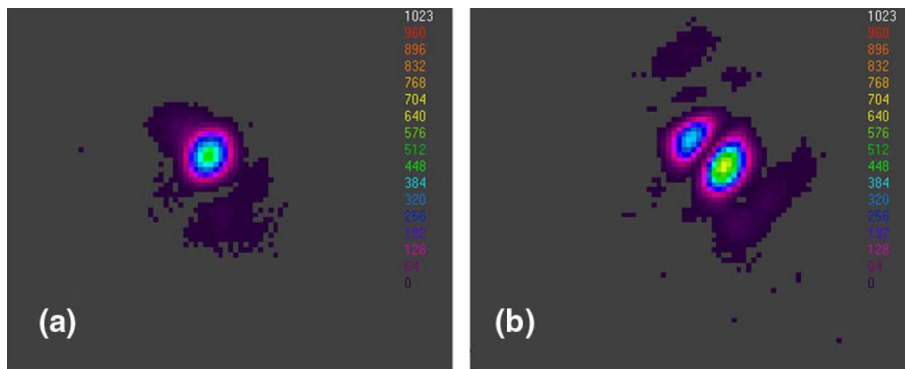
Šiame darbe buvo sukurta ir ištirta THz atspindžio geometrijos vaizdinimo sistema, pavaizduota (4.2 pav.). THz lazerio (FIRL 100, Edinburgh Instruments) spinduliuotė polietileno plėvelės spindulio dalikliu BS1 buvo padalinta į dvi dalis galios santykiu 1 : 10. Daliklio atspindėta mažesnio galingumo dalis buvo sferiniu fokusuojančiu veidrodžiu M1 nukreipta į detektorių D1 šaltinio galiai matuoti. Pro daliklį praėjusi spinduliuotė buvo naudojama atspindžio matavimams. Tiriamas objektas patalpinamas paslinktos ašies fokusuojančio parabolinio veidrodžio M4 židinio plokštumoje. Eksperimentuose buvo naudojami skirtingo židinio nuotolio, $f = 5, 10$ ir 15 cm, veidrodžiai. Kadangi matuojant stačiu kampu atspindėtas spindulys grįžta ta pačia kryptimi kaip ir kritęs, todėl naudojamas papildomas daliklis BS2 (didžiavaržis silicis, galios santykis 1 : 1) spindulių atskyrimui. Atskirtas atspindėtas spindulių pluoštas fokusuojamas sferiniu veidrodžiu M2 į detektorių D2. Detektorių signalai registruojami sinchroniniais stiprintuvais. Šiuo tikslu lazerio spinduliuotė yra moduluojama optiniu moduliatoriumi. Plačios 9 mm apertūros pyroelektriniai detektoriai buvo pasirinkti tyrimui, kad būtų išvengta erdvinio skersinių spinduliuotės modų išrinkimo. Vaizdo užrašymui objektas pritvirtinamas prie dviejų krypčių (XY) motorizuoto poslinkio staliuko ir slenkamas veidrodžio fokuso plokštumoje. Detektoriaus signalas registruojamas sinchronizuotai slankiųjų ašių judėjimui. Bandinys rastriniu būdu skenuojamas slenkant jį pastoviu greičiu X kryptimi ir fiksuotu žingsniu (Δy) Y kryptimi. Skenuojant moduliacijos dažnis ir sinchroninio stiprintuvo integravimo laikas buvo pasirinkti, atitinkamai, 235 Hz ir 10 ms. Priklausomai nuo skenuojamo ploto vaizdo užrašymo procesas užtrunka 5–15 min.

Tyrimo tikslas buvo nustatyti kaip THz vaizdinimui atsiliepia daugiamodis THz šaltinis. Lazerio pluošto matavimams buvo naudojama Pyrocam III (Spiricon) kamera. Derinant lazerio rezonatorių buvo keičiama generuojama moda tarp fundamentinės TEM_{00} ir TEM_{01} modų. Išmatuoti dviejų tipų kolimuoti spindulių pluoštai pateikti 4.3 pav. Maksimali spinduliuotės



4.2 pav. Eksperimento schema atspindžio geometrijos THz vaizdinimui.

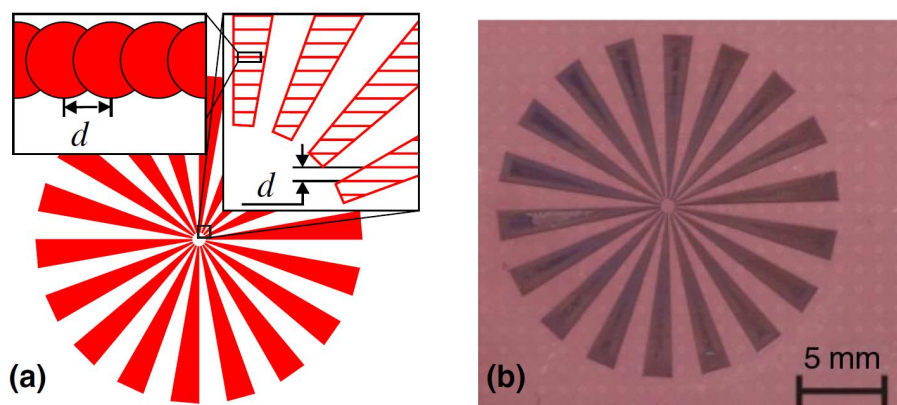
galia TEM_{01} modos atveju siekė 20 mW, apie 2 kartus daugiau nei TEM_{00} atveju. Vaizdinimui buvo naudojamas TEM_{01} pluoštas, kurio diametras $\exp(-2)$ amplitudės aukštyje yra $w = 30$ mm.



4.3 pav. Išmatuotas THz lazerio pluoštas generuojant TEM_{00} (a) ir TEM_{01} (b) modas. [A3]

Vaizdinimo sistemos testavimui su pasirinkta 2.52 THz dažnio spinduliute buvo tiesioginio lazerinio rašymo (DLW) būdu pagamintas gerai atspindintis aukštos rezoliucijos bandinys, „Siemens žvaigždės“ tipo taikiny, struktūruotas mažo dydžio neatspindinčiomis dalelėmis su matmenimis, palyginamais su $118.8 \mu\text{m}$ bangos ilgiu. Bandinys buvo pagamintas iš metalizuotos silicio plokštelės tiesioginio lazerinio įrašymo būdu [69], kuris leidžia formuoti struktūras ant plėvelių ir kietųjų kūnų. Taikinio kontūras bu-

vo suformuotas raštriškai abliuojant paviršių pastoviu $d = 2\mu\text{m}$ atstumu tarp skenavimo eilučių, kaip pavaizduoda schematiniame taikinio brėžinyje 4.4a pav. Visi lazerinio apdirbimo etapai buvo kartojami tris kartus, kad būtų užtikrintai pašalintas visas metalizacijos sluoksnis. DLW procesas $20 \times 20\text{ mm}^2$ ploto struktūravimui užtruko apie 30 min. naudojant 200 mm/s skenavimo greitį. Paruošto bandinio nuotrauka pateikta 4.4b pav. Taikinyje buvo struktūruotas 18 ekvivalentiškų trapecijų, išdėstytų vienodais atstumais užpildant visą apskritimą. Kiekvienos trapecijos plotis nuo centro link išorės plėtėja nuo 75 iki $1750\mu\text{m}$. Centre esančio metalizuoto apskritimo plotis yra apie $860\mu\text{m}$. Gamybos metu kai kuriose bandinio vietose (tamsios dėmės 4.4b pav.), nuėmus metalizaciją, ne daugiau $2\mu\text{m}$ storio silicio padėklo sluoksnis buvo papildomai apdirbtas siekiant suformuoti juodąjį silicį [70]. Tokio sluoksnio atspindys sumažėja nuo 45% iki mažiau nei 1% dėl padidėjusios THz sugerties.



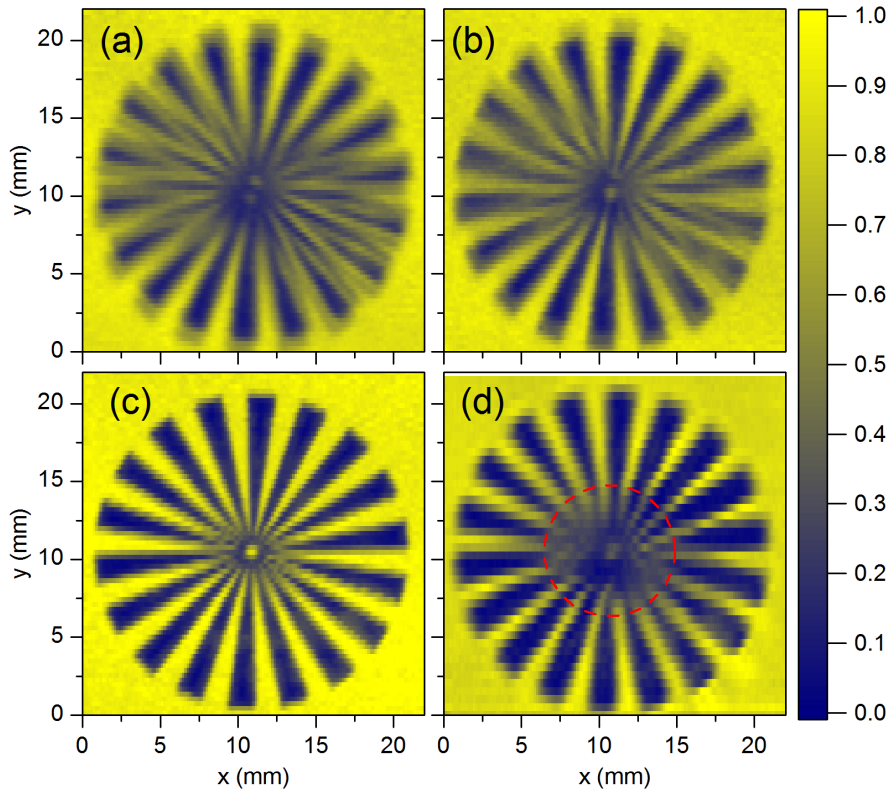
4.4 pav. Bandinio gamybos schema naudojant DLW metodą (a) ir pagaminto bandinio nuotrauka (b). [A3]

4.3 Tyrimo rezultatai

Šiame darbe pateikti išmatuoti vaizdai pateikiami be jokių papildomų matematinių vaizdų apdorojimų, tokių kaip: vaizdo atstatymas, aštrinimas ar triukšmo sumažinimas.

Išmatuoti teraherciniai „Siemens žvaigždės“ vaizdai, naudojant skirtingo židinio nuotolio fokusuojančią optiką, pateikti 4.5a–4.5c pav. Didžiausio židinio nuotolio 15 cm atveju užregistruotas taikinio vaizdas sudvigubėjęs ir išblukęs. Trumpėjant židinio nuotoliui, prie $f = 10\text{ cm}$ vaizdas tampa

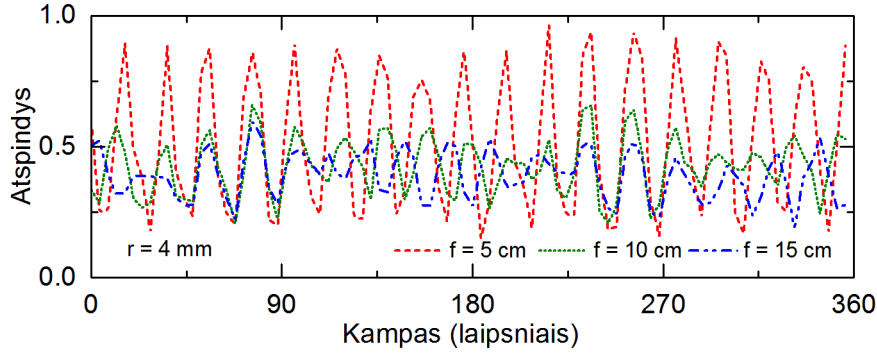
mažiau iškraipytas, sudvigubėjęs tik arčiau centro. Iškraipymai beveik nestebimi, kai $f = 5\text{ cm}$. Tuomet struktūros kraštai atvaizduoti ryškūs, ir viduryje esantis metalinis apskritimas yra taisyklingos formos. Kad būtų galima patvirtinti hipotezę, jog vaizdo iškraipymai atsiranda dėl aukštesnės eilės lazerio modos, matavimai buvo pakartoti apribojus pyroelektrinio detektoriaus darbinę apertūrą iki 1 mm su metaline diafragma (4.5d pav.). Tokiu būdu buvo atliktas erdvinis modos filtravimas praleidžiant tik vieną piką iš TEM_{01} pluošto. Palyginus 4.5a ir 4.5d pav. pastebėta, kad atlikus erdvinį modos filtravimą, kaip ir panaudojus trumpo židinio nuotolio (4.5c pav.) veidrodį, vaizdo iškraipymų nebelieka.



4.5 pav. Terahercinis taikinio "Siemens star" atspindžio vaizdas išmatuotas fokusuojant spinduliuotę skirtingo židinio nuotolio f paraboliniiais veidrodžiais: (a) ir (d) – $f = 15\text{ cm}$, (b) – $f = 10\text{ cm}$, (c) – $f = 5\text{ cm}$. Vaizdas (d) buvo užrašomas detektorių uždengus 1 mm apertūra. Raudona brūkšninė linija pažymėtas $r_R = 4.2\text{ mm}$ spindulio apskritimas apskaičiuotas pagal 4.1 formulę. [A3]

Detalesnei terahercinių vaizdų analizei 4.6 pav. pateikti THz vaizdų, išmatuotų su skirtingo židinio nuotolio paraboliniiais veidrodžiais, apskritiminių pjūviai $r = 4\text{ mm}$ spinduliu nuo taikinio centro. Pjūviuose su $f \geq 10\text{ cm}$

nustatytas kontrasto ir signalas-triukšmas santykio sumažėjimas iki 2 kartų.



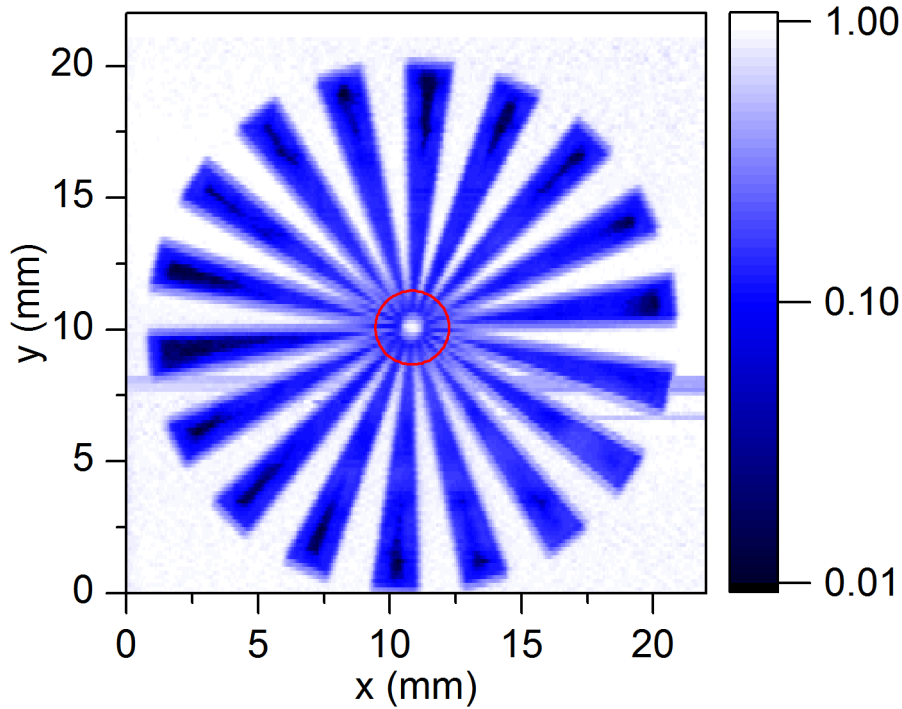
4.6 pav. Atspindžio vaizdų (4.5 pav., a–c) apskritiminiai pjūviai $r = 4\text{ mm}$ spinduliu nuo taikinio centro. [A3]

Eksperimentas buvo pakartotas su lėtesniu skenavimu ir mažesniu taško dydžiu siekiant įvertinti maksimalią sistemos skiriamąją gebą. Vaizdas, išmatuotas naudojant $f = 5\text{ cm}$ židinio nuotolio optiką, pateiktas 4.7 pav. Šiuo atveju neryškus vaizdas pastebimas tik mažame plote aplink centrinę taikinio apskritimą, tačiau visa bandinio struktūra buvo atvaizduota korektiškai. Atlikus vaizdų profilių analizę, buvo nustatyta, kad vaizde, užrašytame su TEM_{01} moda, galima išskirti objektus, kurių matmenys siekia $100\ \mu\text{m}$. Tai atitinka 0.84λ skiriamąją gebą. Taip pat šiame vaizde galima išskirti juodas dėmes trapecijų viduryje su suformuotu juoduoju siliciu, kurio išmatuotas atspindys buvo nedidesnis nei 1 %.

Vaizdinimo sistemų skiriamoji geba gali būti įvertinama Rayleigh kriterijumi $l = 1.22\lambda f/D$. Šiame darbe naudojamam „Siemens star“ taikiniui, atsižvelgiant į jo geometriją, patogiau naudoti Rayleigh apskritimą, kurio spindulys r_R apibrėžiamas formule

$$r_R = \frac{1.22\lambda Nf}{\pi D}, \quad (4.1)$$

čia λ – spinduliuotės bangos ilgis, N – trapecijų skaičius taikinyje, f – fokusavimo židinio nuotolis ir D – spinduliuotės pluošto skersmuo. Rayleigh apskritimas pažymi atstumą nuo taikinio centro iki vietos, kurioje trapecijų plotis atitinka Rayleigh kriterijų $l = 1.22\lambda f/D = r_R\pi/N$. Įstačius į 4.1 formulę trapecijų skaičių $N = 18$ ir skaitinės apertūros vertes $NA = D/f = 0.6$, 0.3 ir 0.2 , buvo apskaičiuotos $r_R = 1.4$, 2.8 , ir 4.2 mm vertės. Tačiau, remiantis eksperimentiniais duomenimis, šie kriterijai galioja tik $NA = 0.6$ ir vienmodžio pluošto atvejais (4.5 pav., c ir d), nes kitais atve-



4.7 pav. Terahercinis taikinio „Siemens star“ atspindžio vaizdas, išmatuotas fokusuojant spinduliuotę $f = 5$ cm židinio nuotolio paraboliniu veidrodžiu. Raudona linija pažymėtas $r_R = 1.4$ mm spindulio apskritimas, apskaičiuotas pagal 4.1 formulę. [A3]

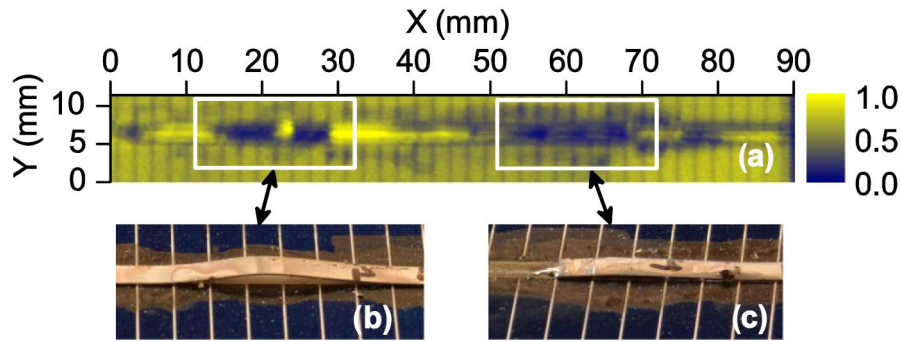
jais vaizdinimo sistemos skiriamoji geba buvo didesnė už spinduliuotės bangos ilgį, kadangi vaizdų iškraipymai pasireiškia Rayleigh apskritimo išorėje. Tokiais atvejais 4.1 lygtyje atsiranda daugiklis 2 dėl du kartus padidėjusio pluošto dydžio židinyje [71]. Skiriamosios gebos įvertinimas apibendrintas 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. THz vaizdinimo skiriamoji geba su TEM_{01} pluoštu skirtingo židinio nuotolio paraboliniams veidrodžiams.

Bangos ilgis λ (μm)	f (cm)	NA	r_R (μm)
118.8	15	0.2	4.2
	10	0.3	2.8
	5	0.6	1.4

Atlikus skiriamosios gebos įvertinimo tyrimą su TEM_{01} pluošto THz lazeriu buvo nustatyta, kad tokia lazerinė sistema kartu su korektiškai parinktais atitinkamos skaitinės apertūros optiniais komponentais gali būti naudojama didelio ploto objektams vaizdinti su palyginamai didele erdvine rezoliucija. Sukurta vaizdinimo sistema buvo sėkmingai pritaikyta silicio

saulės elementų kontaktų diagnostikai. Tyrimo rezultatai pateikti 4.8 pav. Vaizdinimas su THz spinduliuote įgalino pastebėti elektrinių kontaktų netobulumus, kurių nuotraukos pateiktos 4.8 pav. (b) ir (c) dalyse. Svarbu pastebėti ir tai, jog dėl aukštos skiriamosios gebos matomi ne tik išilginiai pagrindiniai kontaktai, bet ir siauri skersiniai pagalbiniai kontaktai.



4.8 pav. Silicio saulės elemento atspindžio vaizdas (a), užrašytas su 2.52 THz naudojant $f = 10\text{cm}$ ($\text{NA} = 0.3$) židinio nuotolio fokusuojantį veidrodį. Vaizdas susideda iš 300×38 $300 \times 300\mu\text{m}^2$ dydžio taškų, užrašymo trukmės apie 12 min. Balta linija vaizde pažymėti kontakto defektai atitinkamai pavaizduoti nuotraukose (b) ir (c). [A3]

Apibendrinant šio skyriaus rezultatus galima teigti, jog TEM_{01} lazerio moda buvo sėkmingai pritaikyta THz vaizdų užrašymui su didele skiriamąją geba esant 2.52 THz spinduliuotės dažniui. Vaizdo sistemos skiriamajai gebai įvertinti buvo pagamintas taikynys su mažiausiais dariniais iki $75\mu\text{m}$ dydžio. Buvo nustatyta, kad panaudojant trumpo židinio nuotolio $f = 5\text{cm}$ ($\text{NA} = 0.6$) parabolinį veidrodį skiriamąją sistemos gebą riboja ne pluošto kokybė, o bangų difrakcijos riba. Lazerinis TEM_{01} pluoštas buvo sėkmingai pritaikytas silicio saulės elementų kontaktų kokybės tikrinimui.

Atsižvelgiant į aukščiau pateiktus šio skyriaus rezultatus buvo suformuluotas 3-iasis ginamasis teiginys:

Trumpo židinio nuotolio fokusuojančio optikos elemento panaudojimas vaizdinimo sistemoje su šaltiniu spinduliuojančiu TEM_{01} modos terahercinės spinduliuotės pluoštą leidžia užrašyti kokybiškus terahercinius vaizdus su rezoliucija artima difrakcijos ribai.

5 Mažų matmenų terahercinės spinduliuotės nekoherentinių detektorių taikymas spektroskopinėse terahercinėse vaizdinimo sistemose

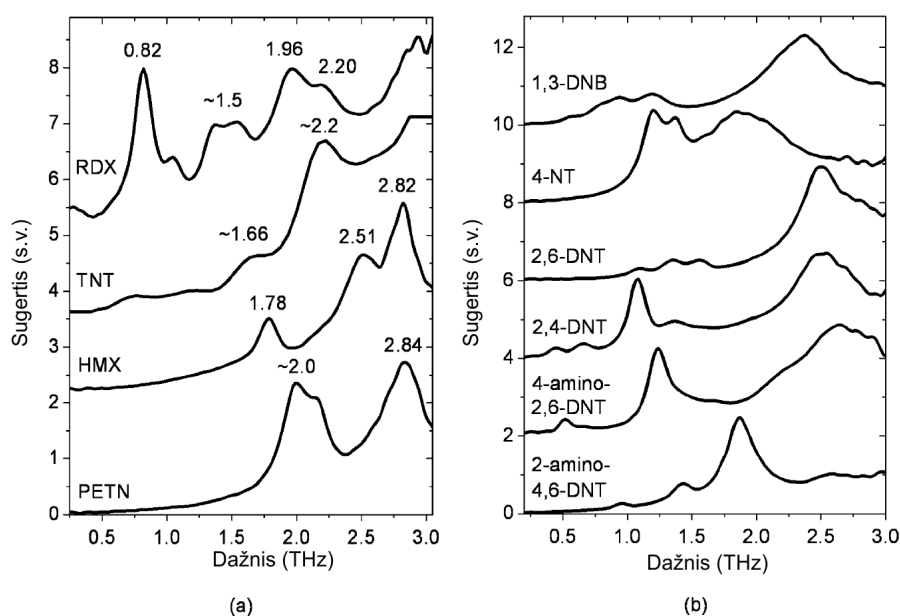
5.1 Teminė literatūros apžvalga

Spektroskopinis vaizdinimas terahercine spinduliuote

Terahercinio dažnio spinduliuotė pasižymi savybe prasiskverbti pro elektriškai nelaidžias medžiagas, tokias kaip, pavyzdžiui, popierius, plastikas, tekstilė ir kt. Tai suteikia galimybę nepažeidžiančiu ir nejonizuojančiu būdu peršviesti objektus ir jų pakuotes, užrašyti jų vaizdus ir atlikti spektroskopinius matavimus [72]. Yra žinoma nemažai medžiagų, kurios THz dažnių ruože pasižymi charakteringais ypatumais [73]. Ne išimtis yra ir pavojingos riboto naudojimo medžiagos, įskaitant sprogstamąsias medžiagas, cheminius ir biologinius reagentus. Todėl perspektyvi sritis THz spinduliuotei pritaikyti yra naujų saugumo sistemų kūrimas, kurių viena iš funkcijų būtų pavojingų medžiagų aptikimas ir atpažinimas.

Sprogmenys yra gaminami iš organinių medžiagų, kurių molekulės pasižymi rotaciniais ir vibraciniais šuoliais su energijomis atitinkančiomis THz dažnio diapazoną. Šių medžiagų cheminiai junginiai turi charakteringus sugerties ir atspindžio spektrus THz ruože, kurie leidžia juos identifikuoti. Tarp tokių sprogstamų medžiagų yra heksogenas (RDX), pentritas (PETN),

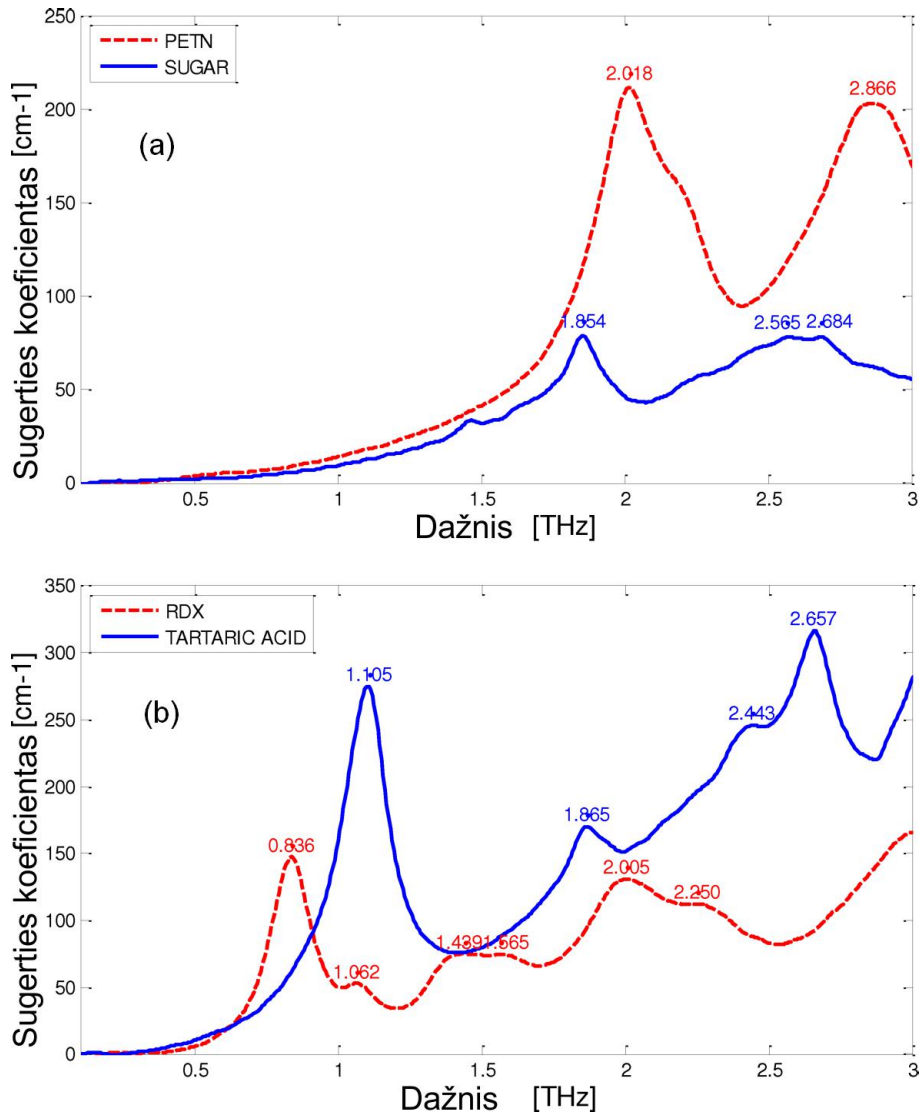
nitrotoluenas (NT), dinitrotoluenas (DNT), trinitrotoluenas (TNT), dinitrobenzenas (DNB) arba oktagenai (HMX). Jų pralaidumo spektrams yra būdingi ypatumai, leidžiantys juos išskirti iš tokių dažnai naudojamų medžiagų kaip tekstilė, žmogaus oda ar metalas. Be to, svarbu paminėti, kad ne visi žinomi sprogmenys turi charakteringų ypatumų THz ruože. Pavyzdžiui, tokios pavojingos medžiagos, kaip sprogmenys amonio nitrato pagrindu (AN-FO, amonias) arba pikrino rūgštis (TNP), turi tolygų sugerties spektrą THz ruože ir neturi spektrinių ypatumų, leidžiančių jas identifikuoti THz ruože. Kai kurių sprogmenų sugerties spektrai pateikti 5.1 pav. [74].



5.1 pav. Sprogmenų (a) ir su jais susijusių cheminių komponentų (b) spektriniai sugerties ypatumai THz dažnių ruože. Adaptuota iš [74].

Terahercinių saugumo sistemų kūrimas ir vystymas iš esmės yra labai ribotas dėl galimo pavojaus dirbant su sprogstamosiomis medžiagomis. Tai turėtų atlikti tik specialiai apmokyti personalas laikantis ypač aukštų darbo saugos reikalavimų. Todėl atliekant mokslinius tyrimus ir testuojant saugumo sistemas pravartu turėti kiek galima tikslesnius sprogmenų imitatorius turinčius panašias spektrines savybes kaip ir tikri sprogmenys, bet tuo pačiu nekeliančius jokios grėsmės su jais dirbančiam personalui. Tokiais sprogmenų imitatoriais gali būti sacharozė (SC) ir vyno rūgštis (TA). Šių medžiagų sugerties spektrų palyginimas su realiais sprogmenimis (5.2 pav.) atliktas [75] darbe. Pagrindiniai sugerties pikai PETN turi atitikmenis SC spektre su 0.2 THz dažnio poslinkiu. RDX spektras labai panašus į TA

spektrą paslinktą per maždaug 0.3 THz. Pateikta tyrimų apžvalga leidžia teigti, kad SC ir TA gali būti naudojami vietoje tikrų sprogmenų taikant spektroskopinio vaizdinimo metodus THz dažnių ruože.



5.2 pav. Realių sprogmenų PETN (a) ir RDX (b) spektrų palyginimas su sprogmenų imitatorių SC ir TA spektrais. Adaptuota iš [75].

Aktyvaus THz vaizdinimo procesas susideda iš tiriamo objekto apšvietimo THz spinduliuote ir pro jį praėjusios, atspindėtos ar išsklaidytos spinduliuotės surinkimo ir analizės. Tuo tarpu THz spektroskopija yra medžiagos ar objekto dažninių savybių tyrimas terahercinių dažnių ruože. Apjungus šiuos du procesus, t.y. atliekant THz vaizdinimą prie tam tikro dažnio (ar keleto dažnių) gaunamas taip vadinamas spektroskopinis vaizdinimas [1]. Parinkus tam tikrai medžiagai charakteringą spinduliuotės dažnį galima sudaryti tos medžiagos pasiskirstymo žemėlapij tiriamajame objekte. Toks proce-

sas yra vadinamas spektroskopiniu atpažinimu (angl. *principle component analysis*) [76].

Pirmosios THz vaizdinimo sistemos buvo paremtos koherentine laikinės skyros spektroskopija (THz-TDS). Tokiose sistemose THz emiteris ir detektorius žadinami gana masyviu ir brangiu femtosekundžių trukmės impulsų optiniu lazeriu [77]. Šiuo metu prieinamos kompaktiškesnės skaiduliniais lazeriais žadinamos optoelektroninės THz-TDS sistemos [78]. Deja THz-TDS sistemos pasižymi nedidele THz vaizdinimo sparta dėl THz impulsų stroboskopinio matavimo laike. Tiesioginiams pritaikymams, o ypač saugumo reikmėms, reikalingos kompaktinės realaus laiko (arba labai sparčios) vaizdinimo sistemos. Sistemos kompaktiškumą dažniausiai apriboja THz šaltinis. Šiuo metu sparčiai tobulinami kompaktiški diskretaus dažnio kvantiniai kaskadiniai lazeriai ir elektroniniai šaltiniai, kuriuos jau galima taikyti komercinėse vaizdinimo sistemose. Tuo tarpu sistemos spartą dažniausiai nulemia THz jutiklio atsako sparta. Šiuo aspektu tinkami kandidatai galėtų būti bolometriniai jutikliai pagaminti standartine CMOS technologija [79], antena kaupinami mikro-bolometrai [80], silicio lauko tranzistoriai su nanometrų ilgio kanalu [81] ir Šotki diodai [82].

Papildomi reikalavimai keliami vaizdinimo sistemoms galinčioms spektroskopinio atpažinimo metodu nustatyti tam tikro cheminio komponento kiekį ir pasiskirstymą tam tikrame objekte. Tokiu atveju reikalingi reguliuojamo dažnio THz emiteriai ir plačiajuosčiai detektoriai. Spektroskopinis atpažinimas tokia vaizdinimo sistema buvo atliktas [76] darbe. THz spinduliuotė šiame darbe buvo generuojama pastovios veikos derinamu parametriniu osciliatoriumi, o registruojama plačiajuosčiu pyroelektriniu detektoriumi. Atlikus THz vaizdinimą ties 6 dažniais THz dažnių ruože nuo 1.3 iki 1.8 THz, buvo sudaryti palatinozės ir 5-aspirino komponentų pasiskirstymo vaizdai. Autorių panaudotoje vaizdinimo sistemoje pyroelektrinis jutiklis neleidžia skenuoti greičiau. Spektroskopinis atpažinimas su THz-TDS sistema pademonstruotas darbe [83]. Jame atliktas cheminių medžiagų, tokių kaip laktozė, aspirinas, sacharozė, vyno rūgštis, atpažinimas. THz-TDS sistema leidžia pasirinkti dažnį plačiame THz intervale, tačiau dėl lėto taškinio skenavimo vaizdai užrašomi tik su 2 mm skiriamąja geba. Spartesnėms sistemoms kurti galėtų būti panaudoti spartūs nekoherentiniai mažų matmenų THz jutikliai.

Mažų matmenų terahercinės spinduliuotės nekoherentinių detektorių apžvalga

Terahercinės spinduliuotės detektoriai pagal veikimo principą yra skirstomi į šiluminius ir elektroninius. Dažniausiai naudojami komerciniai šiluminiai jutikliai yra optoakustiniai detektoriai, tokie kaip Golay celė [84], skystu heliu aušinami bolometrai [85] ir pyroelektriniai detektoriai [86]. Šie jutikliai nors ir yra vieni iš jautriausių (jautris iki 5 kV/W), tačiau yra gana masyvūs ir per lėti naudoti sparčiose vaizdinimo sistemose. Šiluminiai THz detektoriai pritaikomi vaizdinimui galėtų būti mažų matmenų kambario temperatūroje veikiantys mikrobolometrai [80], kurių aktyvioji dalis pakabinta ore, kad būtų nuslopinti šilumos nuostoliai ir iki $28 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ sumažinta detektoriaus NEP. Dėl mažų matmenų mikrobolometrai pasižymi pakankamai greitu (moduliacijos dažnis iki 400 kHz) atsaku ir tai suteikia galimybę kurti jutiklių matricas realaus laiko THz kameroms. Tokiam tikslui galima pritaikyti ir infraraudonųjų spindulių ruožo bolometrines kameras, kurios yra pakankamai jautrios vaizdams užrašyti prie 2.5 THz THz [67]. CMOS technologija pagaminta 2D realaus laiko THz kamera iš mikrobolometrinių jutiklių pristatyta [87] darbe. Optimizuota matrica, sudaryta iš 320×240 antena kaupinamų mikrobolometrų, turėjo didžiausią jautrį 2.5 THz dažnyje. Atlikti tyrimai leido užrašyti vaizdus su signalas-triukšmas santykiu lygiu 10 iki 25 kadrų per sekundę greičiu apšviečiant tiriamąjį objektą 25 nW galios plataus spektro spinduliuote.

Elektroniniai detektoriai, tokie kaip Šotki diodai, lauko tranzistoriai (FET), remiasi elektronų pernaša puslaidininkiniuose dariniuose. Šotki diodai THz spinduliuotei detektuoti buvo pritaikyti 1994 m. [88]. Jų veikimo principas pagrįstas THz spinduliuotės lyginimu dėl stipriai asimetrinės krūvininkų pernašos per Šotki potencialo barjerą. Šotki detektoriai pasižymi pakankamai dideliu jautriu ir gali būti optimizuoti plačiam THz dažnių intervalui. Iki 7 THz veikiantis kvazioptinis Šotki detektorius buvo pademonstruotas [82] darbe. Spinduliuotė suvedama į diodą per ilgos vielos anteną ir parabolinį reflektorių. Nustatytas detektoriaus jautris iki 200 V/W dažnių diapazone nuo 1 iki 2 THz . Prie žemesnių dažnių (iki 1 THz) Šotki detektorių jautris gali siekti 1000 V/W [89]. Pagrindiniai šių detektorių trūkumai yra sudėtinga neplanarinė gamybos technologija, kuri nulemia aukštą prietaisų kainą. Aktyvus lauko tranzistorių taikymas THz spektroskopijai prasidėjo

nuo pionierinio Dyakanov ir Shur darbo [90], kuriame numatė, kad plazmos osciliacijos FET kanale gali būti naudojamos THz detekcijai ir emisijai. Detekcija galima dėl tranzistoriaus netiesinių savybių, kas sukelia krintančios spinduliuotės sukeltos kintamos srovės lyginimą. Šio efekto rezultatas yra pastovios įtampos fotoatsakas tarp ištakos ir santakos. Eksperimentiškai terahercinės spinduliuotės detekcija dvimatėmis dujomis lauko tranzistoriaus kanale iširtos [91] darbe. Pirmieji eksperimentai buvo atliekami žemoje temperatūroje. THz vaizdinimas su kambario temperatūroje veikiančiu FET buvo atliktas [92] publikacijoje. Mažėjant FET kanalo matmenims plazminis rezonansas slenkasi į aukštesnius dažnius proporcingai santykiui S/L [90]. Plačiajuostis FET detektorius veikiantis nuo 0.27 iki 1.05 THz pristatytas darbe [93], kuriame detektorius buvo pagamintas naudojant komercinę 130 nm silicio CMOS technologiją su integruota plačiajuoste peteliškės formos antena. Išmatuotas maksimalus jautris ir minimalus NEP prie 0.3 THz siekė, atitinkamai, 5 kV/W ir 10 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Net kai dažnis siekia 1 THz, detektorius išlieka pakankamai jautrus (55 V/W ir 800 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$). Tai rodo, kad FET detektoriai gali būti pakankamai jautrūs naudoti spektroskopinio vaizdinimo sistemose. Deja pagrindinė FET detektorių problema yra jų patikimumas, nes dėl nanometrinių matmenų kanalas yra lengvai pažeidžiamas elektrostatiniais pramušimais.

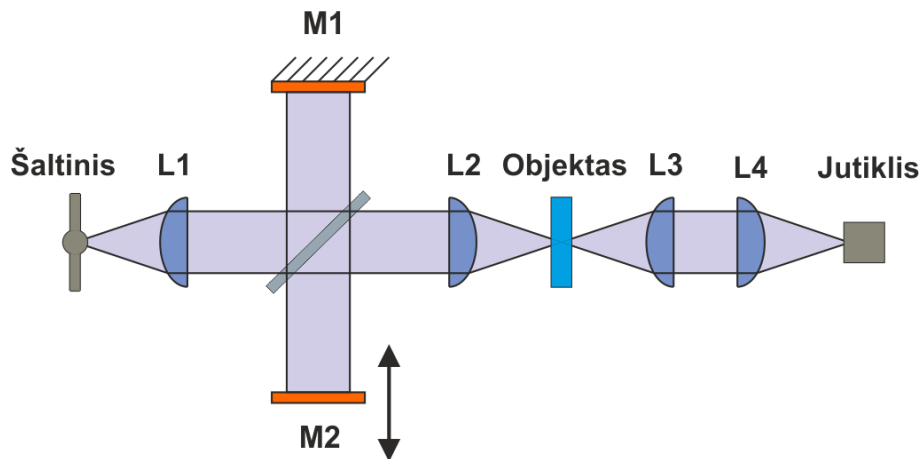
Šiame darbe spektroskopinėms vaizdinimo sistemoms mes siūlome naudoti mažų matmenų peteliškės formos InGaAs detektorius.

5.2 Ekperimentinės metodikos ir bandiniai

5.2.1 Furjė spektroskopija

Spektrinės tiek tiriamų objektų, tiek ir bolometrinių detektorių charakteristikos buvo tiriamos vakuuminiu Furjė spektrometru. Spektrometro schema pateikta 5.3 pav.

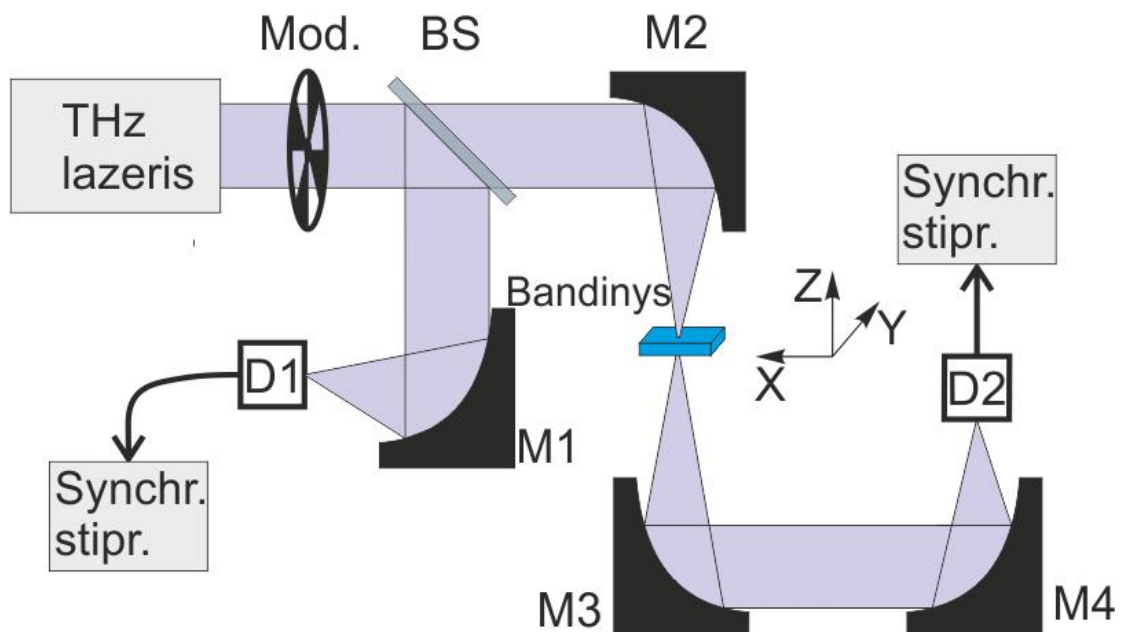
Spektrometras veikia Michelsono interferometro principu. Šaltinis, gyvsidabrio lempa, generuoja plataus spektro spinduliuotę, kuri nukreipiama į interferometrą, kurio vienas iš veidrodžių motorizuotu poslinkio mechanizmu slenkamas išilgai optinės ašies interferogramos užrašymui. Išėję iš interferometro spinduliai nukreipiami į bandinį ir vėliau, pro jį praėję arba atspindėti, nukreipiami į detektorių, optoakustinę Golay ceļę. Spektrometro



5.3 pav. Furjė spektrometro principinė schema, skirta dažniųjų charakteristikų matavimams.

darbinė dažniųjų sritis parenkama keičiant spindulių daliklio, kuris pagamintas iš polietileno plėvelės, storį. Spektrai apskaičiuojami atlikus interferogramos greitąją Furjė transformaciją. Tokiu būdu dažninė skyra priklauso nuo interferogramos ilgio.

5.2.2 Terahercinis vaizdinimas



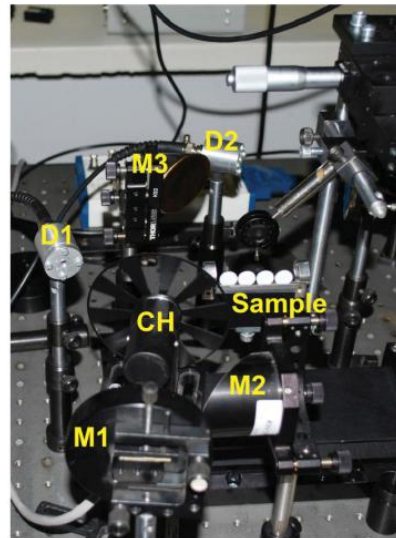
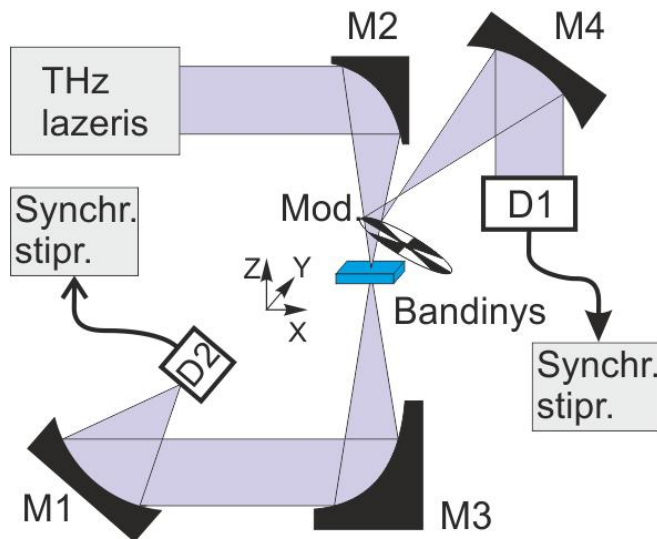
5.4 pav. Modifikuota spektroskopinio vaizdinimo schema skirta ypač sparčiam objektų pralaidumo vaizdų užrašymui.

Spektroskopinio vaizdinimo eksperimentinė schema pavaizduota 5.4 pav.

THz spinduliuotei generuoti buvo naudojamas optiškai kaupinamas molekulinis THz lazeris (FIRL-1000). Šaltinio spinduliuotė spindulio dalikliu BS padalijama į du spindulių pluoštelius. Pirmasis fokusuojančiu veidrodžiu suvedamas į detektorių D1, kurio signalas naudojamas THz lazerio galios registravimui. Kitas spindulių pluoštelis fokusuojamas į bandinį paraboliniu veidrodžiu M2. Po bandinį praėjęs pluoštas surenkamas paraboliniu veidrodžiu M3 ir toliau veidrodžiu M4 nukreipiamas į detektorių D2. Mažiams signalams registruoti buvo naudojami sinchroniniai stiprintuvai (angl. *lock-in*). Tuomet šaltinio spinduliuotė buvo moduluojama mechaniniu moduliatoriumi, malūnėliu. Eksperimentas buvo atliekamas kambario temperatūroje.

Plokštuminio pralaidumo vaizdo sudarymui tiriamasis objektas yra stumdomas veidrodžio M2 židinio plokštumoje XY. Tai atliekama pritvirtinus prie kompiuteriu valdomo postūmio X ir Y ašimis mechanizmo. Objekto vaizdas buvo užrašomas atliekant spartų rastrinį skenavimą, kuriame matavimai atliekami sinchronizuotai su ašies judėjimu. Tai leido skenuoti vaizdą X ašies kryptimi judant pastoviu greičiu iki 100 mm/s. Atstumas tarp taškų buvo $dx = 0.1$ mm, o tarp eilučių $dy = 0.3$ mm. Sinchroninio stiprintuvo integravimo trukmė buvo parenkama 3 kartus ilgesnė nei skenavimo intervalas tarp matavimo taškų siekiant išgauti tolygesnį vaizdą ir išvengti netikslumų dėl signalo diskretizavimo. Sukurtoje vaizdinimo sistemoje pagrindinis vaizdinimo spartos ribojimas yra nulemiamas optinio mechaninio moduliatoriaus, kadangi eksperimentuose buvo taikomi detektoriai, turintys trumpą atsako trukmę. Eksperimentui valdyti LabView programinio paketo pagrindu buvo sukurta prietaisų valdymo ir duomenų apdorojimo kompiuterinė programa.

Ypač spartiems vaizdų užrašymams buvo naudojama šiek tiek modifikuota eksperimento schema (5.5 pav.). Joje moduliatorius montuojamas kampu visai netoli objekto, kur pluošto diametras yra mažesnis, todėl galima sparčiau moduluoti pluoštą. Nuo moduliatoriaus atspindėta spinduliuotė panaudojama šaltinio galios registravimui ir tokiu būdu išvengiama galios nuostolių dėl spindulio daliklio BS.

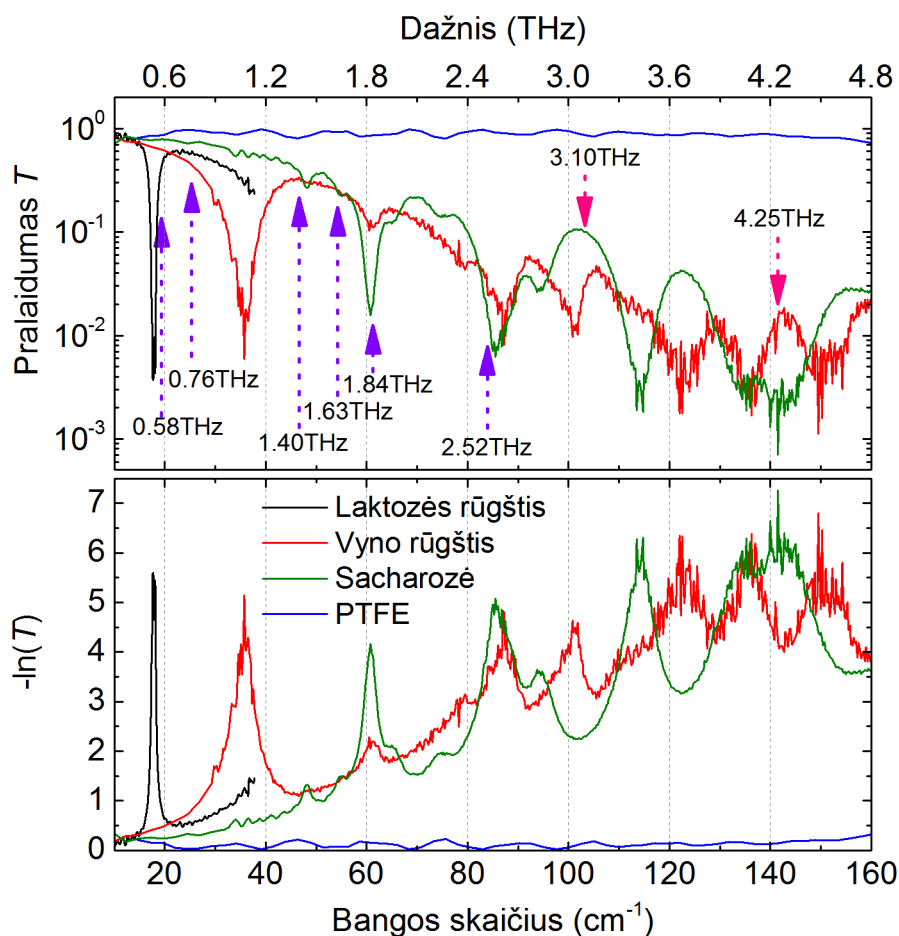


5.5 pav. Modifikuota spektroskopinio vaizdinimo schema molekulinio THz lazerio pagrindu ir peteliškės formos InGaAs diodais, naudojamais signalo detekcijai, pritaikyta greitam vaizdų užrašymui pralaidumo geometrijoje. [A2]

5.2.3 Bandiniai

Spektroskopinio vaizdinimo eksperimentams buvo naudojami bandiniai iš medžiagų, turinčių spektrinių ypatumų terahercinių dažnių ruože. Tyrimams buvo naudojamos šios medžiagos: pieno rūgštis (LA, angl. *lactic acid*), vyno rūgštis (TA, angl. *tartaric acid*) ir sacharozė (SC, angl. *sucrose*). Pieno rūgšties atveju buvo naudojama komerciškai prieinama vaistinio preparato tabletė. Kitos medžiagos gana stipriai absorbuoja terahercinę spinduliuotę, todėl buvo naudojami jų mažos koncentracijos mišiniai su THz spinduliuotei pakankamai skaidriomis ir tiriamame dažnių ruože ryškių ypatumų neturinčiomis medžiagomis. Iš TA ir SC buvo specialiai paruošti keturi bandiniai, tabletės, supresuojant skirtingas medžiagas politetrafluoretileno matricijoje, kurių sudėtys yra: 10% TA, 10% SC ir 5% TA-5% SC. Tabletės buvo 0.4 mg svorio, 1.4 mm storio ir 13 mm skersmens. Papildomai buvo paruošta tabletė iš 100% PTFE, kuri buvo naudojama kaip atraminis bandinys matavimuose be aktyviosios medžiagos. Ji buvo 1.3 mm storio ir svėrė 0.36 mg.

Spektroskopinis atpažinimas reikalauja iš anksto žinoti ieškomų medžiagų spektrines charakteristikas. Išmatuoti bandinių pralaidumo ir sugerties spektrai pateikti 5.6 pav. LA pasižymi stipria sugerties linija prie 0.54 THz dažnio. SC sugerties linijų vieta ties 1.46, 1.83, 2.61, 2.85, 3.42, 4.11 ir



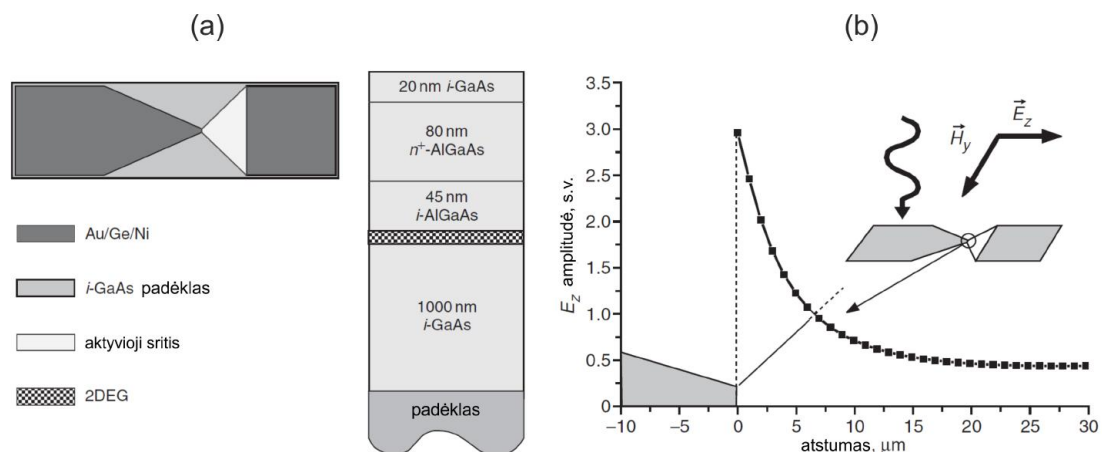
5.6 pav. Tablečių iš pieno rūgšties, vyno rūgšties 10% TA, sacharozės 10% SC ir PTFE 100% pralaidumo T (a) ir $-\ln(T)$ (b) spektrai.

4.29THz sutampa su literatūroje pateiktais duomenimis [73, 83]. TA bandiniui identifikuotos sugerties linijos buvo ties dažniais 1.08, 1.83, 2.61, 2.85, 3.42, 4.11, 4.29THz [83, 94]. THz lazerio linijos, kurios buvo naudojamos vaizdams užrašyti pažymėtos rodyklėmis (5.6a pav.). Kaip matyti geriausiai spektriniam atpažinimui tarp 10%TA ir 10%SC tinkamas dažnis atitinka lazerio linijas 0.762 THz ir 1.840 THz, kadangi šių dviejų bandinių pralaidumas skiriasi, atitinkamai, 2 ir 4 kartus. Tuo tarpu, kai dažnis 2.52 THz, pralaidumų santykis yra tik 20%.

5.3 InGaAs peteliškės formos diodų taikymas spektroskopiniam vaizdinimui iki 2.52 THz

Asimetriniai peteliškės formos diodai

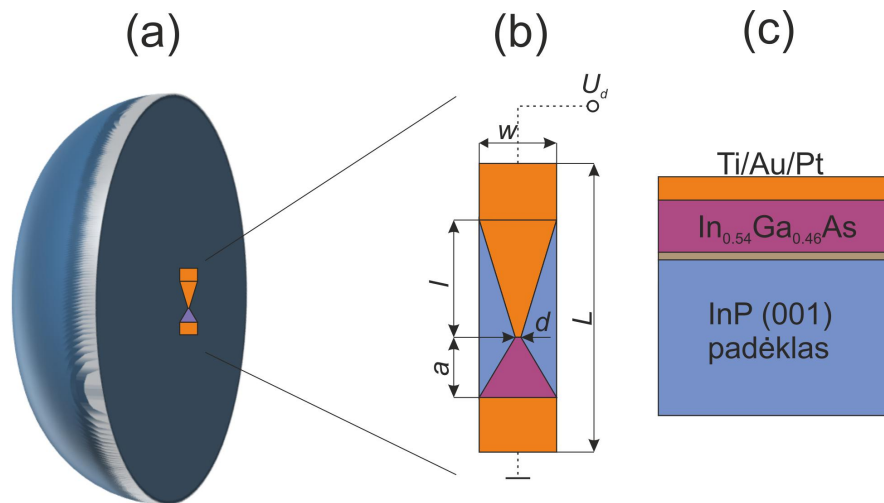
Asimetriškai susiaurinti dvimačių elektronų dujų (2DEG) sluoksniai pirmą kartą pasiūlyti terahercinės spinduliuotės detektavimui [95, 96] darbuose. Juose 2DEG sluoksniams suformuoti buvo naudojama AlGaAs/GaAs heterosandūra. Detektoriaus struktūra pavaizduota 5.7 pav. Detektorius buvo suformuotas išdinant aktyvų sluoksnį iki pat padėklo. Meza kartu su kontaktais veikia kaip peteliškės formos (BT, angl. *bow-tie*) antena THz spinduliuotei suvesti. Tokio jutiklio veikimo principą atspindi 5.7b pav., kuriame suskaičiuotas nehomogeniškas elektrinio lauko pasiskirstymas siauriausioje diodo dalyje apšvietus jį 0.76 THz dažnio spinduliuote. Dėl netolygaus 2DEG krūvininkų kaitimo tarp diodo kontaktų susidaro įtampa, kuri proporcinga THz spinduliuotės intensyvumui. AlGaAs/GaAs jutiklis veikia dažnių intervale nuo 10 GHz iki 0.8 THz su 0.3 V/W jautriu. Tam, kad asimetrinis diodas tiktų spektroskopiniam vaizdinimui, būtina padidinti jo jautrį. Kadangi jutiklio veikimo principas remiasi krūvininkų kaitimo efektu, tai galima būtų naudoti puslaidininkines medžiagas turinčias žymiai didesnę judrį kambario temperatūroje nei GaAs.



5.7 pav. AlGaAs/GaAs terahercinės spinduliuotės detektorius su asimetriškai susiaurintu 2DEG sluoksniu. (a) - jutiklio struktūra, (b) - veikimo principas. Adaptuota iš [95].

Plačiaujustis asimetriškai susiaurintas jutiklis veikiantis iki 2.5 THz bu-

vo pristatytas [97] darbe. Detektoriaus schematinis vaizdas pavaizduotas 5.8 pav. Jis pagamintas iš $\text{In}_{0.54}\text{Ga}_{0.46}\text{As}/\text{InP}$ heterosandūros su 2DEG sluoksniu, kurio elektronų koncentracija ir judris yra atitinkamai apie $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ir $13300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Prietaisas buvo sukurtas kaip asimetrinė peteliškės formos antena, kurios viena pusė metalizuota Ti/Au/Pt ominiais kontaktais. Aktyviai sričiai suformuoti buvo išsėdinta $3 \mu\text{m}$ aukščio meza. Detektoriaus matmenys yra: $d = 12 \mu\text{m}$, $a = 50 \mu\text{m}$, $l = 250 \mu\text{m}$, $L = 500 \mu\text{m}$ ir $w = 100 \mu\text{m}$. Efektyviam krintančios spinduliuotės suvedimui į jutiklį buvo panaudotas hemisferinis 6 mm skersmens silicio lęšis. Svarbus parametras yra detektoriaus atsako laikas, kuris neviršija 7 ns [98]. Skirtingai nuo nanometrinių matmenų tranzistorių ir mikrobolometrų, asimetriškai susiaurinti InGaAs diodai yra mikrometrinių matmenų. Tai padidina jų atsparumą elektrostatinio krūvio iškrovoms ir krintančios spinduliuotės galios perkrovai [98]. Atsižvelgiant į šiuos aspektus, galima teigti, jog asimetriškai susiaurintas InGaAs THz detektorius gali būti tinkamas sparčioms kompaktiškomis THz vaizdinimo sistemoms.

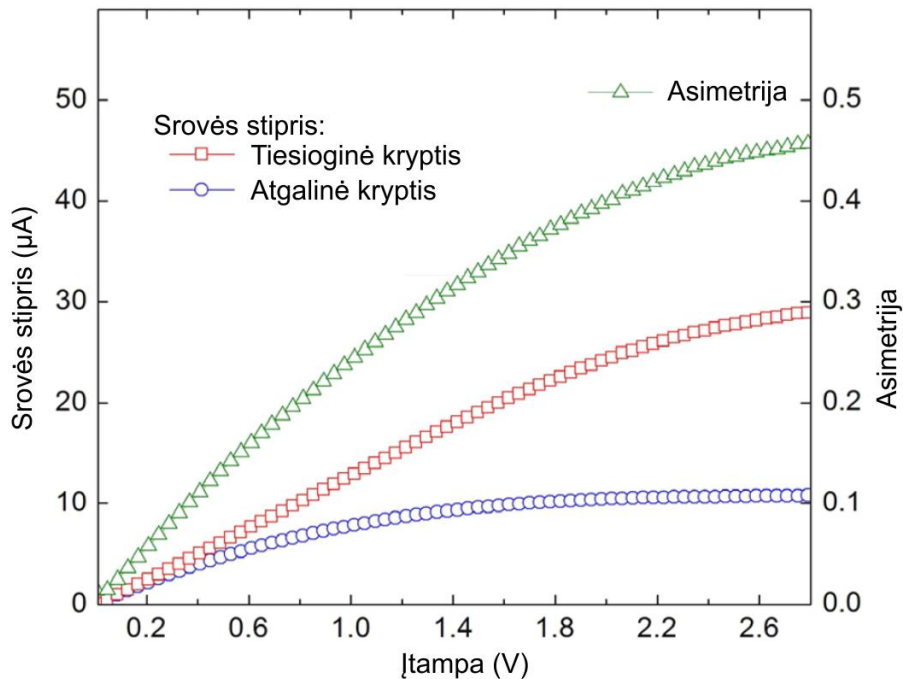


5.8 pav. InGaAs asimetriškai susiaurintas terahercinės spinduliuotės detektorius kaupinamas silicio lęšiu: (a) - schematinis detektoriaus vaizdas; (b) - diodo struktūra ir matmenys; (c) - InGaAs/InP heterosandūra, iš kurios pagaminta jutiklio aktyvioji sritis, sandara.

Šiame darbe buvo sukurta sparti THz vaizdinimo sistema su silicio lęšiu kaupinamais asimetriškai susiaurintais InGaAs diodais. Buvo ištirtos detektoriaus charakteristikos siekiant parinkti optimalų darbo tašką ir nustatyti dažnines savybes. Vėliau sistema buvo ištestuota atliekant spektroskopinį sacharozės ir vyno rūgšties bandinių atpažinimą.

Eksperimento rezultatai

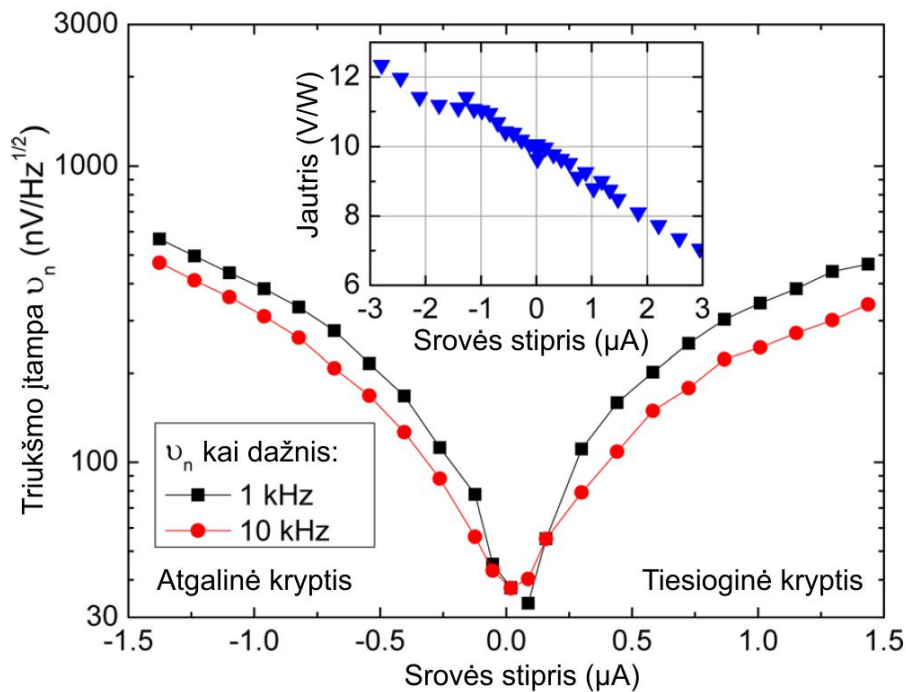
Siekiant pritaikyti peteliškės formos diodinį detektorių spektroskopiniam THz vaizdinimui reikia parinkti jo veikimui optimalų darbo tašką. Išmatuotos detektoriaus voltamperinės charakteristikos pateiktos 5.9 pav. Srovės stiprio priklausomybė tiesiogine I_F ir atgaline I_B kryptimis pasižymi asimetrija, kuri apskaičiuojama pagal formulę $(I_F - I_B)/(I_F + I_B)$. Asimetrija susidaro dėl netolygaus krūvininkų kaitimo susiaurintoje srityje, kas ir lemia detektoriaus atsaką THz spinduliuotei [97]. Kaip matyti iš pateiktos kreivės, srovės stiprio asimetrija tolygiai didėja kylant pridėtai įtampai nuo pat nulinės vertės. Tiriamas InGaAs detektorius neturi veikimo slenksčio, todėl net ir nepridėjus išorinės įtampos, detektorius išduoda signalą, proporcingą apšviečiamos THz spinduliuotės intensyvumui.



5.9 pav. Asimetriškai susiaurinto peteliškės formos InGaAs detektoriaus voltamperinė charakteristika ir asimetrija, suskaičiuota pagal formulę $(I_F - I_B)/(I_F + I_B)$. [A4]

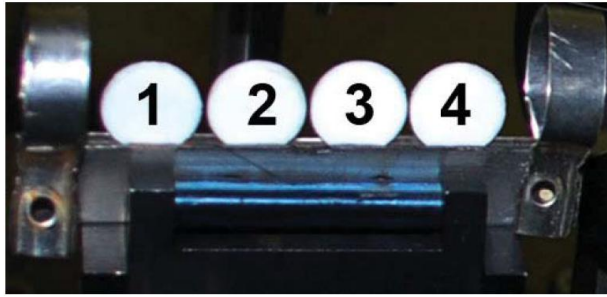
Nuo pridėtos išorinės DC įtampos didėjanti srovės asimetrija leidžia tikėtis, kad detektoriaus jautris priklauso nuo darbo taško parinkimo. Prie 0.76 THz dažnio išmatuotos jutiklio jautrio ir triukšmo priklausomybės nuo pridėtos poslinkio srovės stiprio pateiktos 5.10 pav. Detektoriaus jautris didėja iki 20% pridėjus 3 µA atgalinę srovę. Tačiau tuo pat metu didėja žemo dažnio triukšmo lygis v_n . Kai poslinkio srovė lygi nuliui, peteliškės

formos (BT) diodas generuoja tik Džonsono (Johnson) terminį triukšmą, proporcingą detektoriaus vidinei varžai. Paleidus per prietaisą net nedidelę, mažiau nei 300 nA , srovę atsiranda papildomi triukšmo mechanizmai, tokie kaip tranzistorinis (angl. *shot noise*) ir perteklinis triukšmas (angl. *flicker noise*), kurie viršija šiluminį triukšmą net prie 10 kHz moduliacijos dažnio. Pastebėtina, kad v_n skiriasi nuo srovės postūmio poliaringumo, kas paaškinama skirtinga vidine varža. Mažiausia triukšmų ekvivalentinė galia (NEP), apskaičiuojama kaip triukšmų įtampos ir jautrio santykis, yra tuomet, kai diodas dirba be papildomo postūmio, ir yra lygi $5.8\text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Toks detektoriaus jungimas ypač patogus kompaktinėse vaizdinimo sistemose, kadangi detektoriumi nereikalingas papildomas įtampos šaltinis. Atsižvelgiant į tokius rezultatus tolimesniuose THz vaizdinimo eksperimentuose detektorius buvo naudojamas be papildomo darbo taško postūmio.

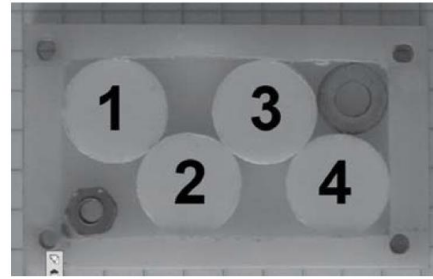


5.10 pav. Asimetriškai susiaurinto peteliškės formos InGaAs detektoriaus jautrio ir triukšmo įtampos priklausomybė nuo pridėtos poslinkio srovės stiprio. [A4]

Spektroskopinio vaizdinimo sistemos su InGaAs detektoriais testavimui buvo užrašomi sprogmenų imitatorių vaizdai esant skirtingiems THz spinduliuotės dažniams. Bandiniai buvo pritvirtinti vienoje plokštumoje prie metalinio rėmelio laisvoje erdvėje, kaip pavaizduota 5.11a pav. Spektroskopiniam atpažinimui buvo užrašyti bandinių vaizdai su 0.585 , 0.762 , 1.40 ,



(a)



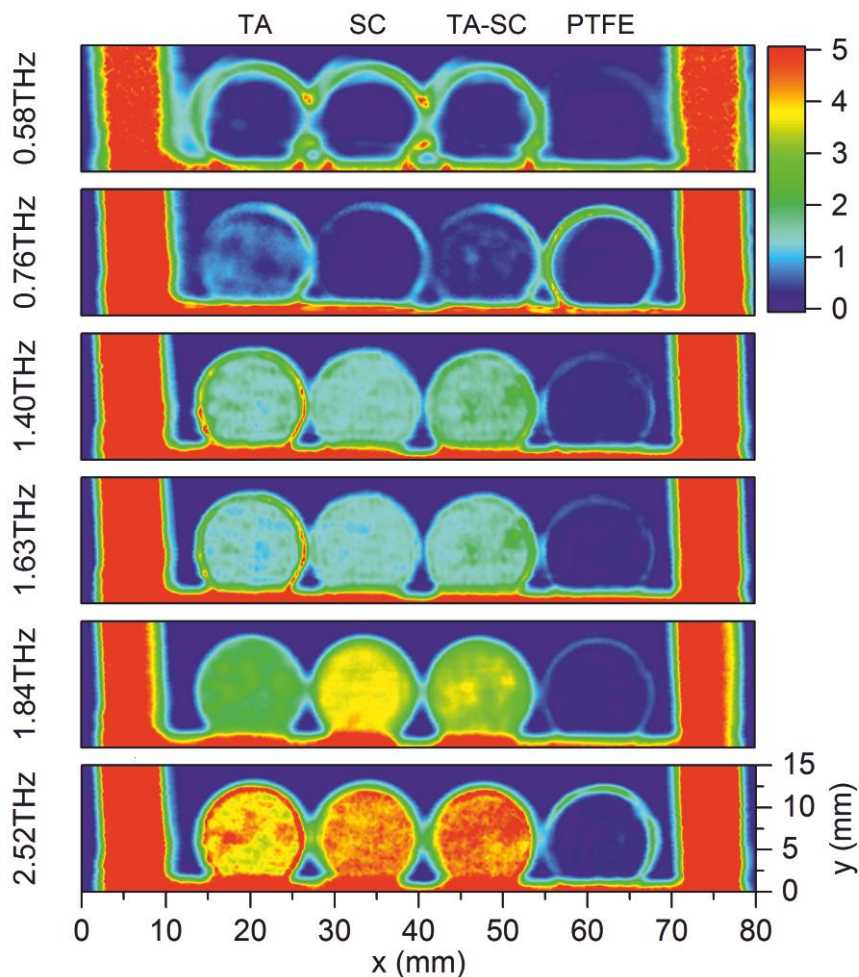
(b)

5.11 pav. Bandinių išdėstymas spektroskopiniam vaizdinimui laisvoje erdvėje (a) ir patalpinus juos į plastikinę HDPE dėžutę (b). Bandiniai: 1 - 10%SC, 2 - 10%TA, 3 - 5%SC-5%TA ir 4 - 100%PTFE. [A2]

1.63, 1.84, ir 2.52 THz dažnio lazerio linijomis. Vaizdinimo metu skenavimo plotas buvo parenkamas taip, kad tilptų ir bandiniai, ir metalinis rėmelis su aplink esančia tuščia erdve. Tai leidžia įvertinti sistemos signalas-triukšmas santykį. Tiriamo objekto THz vaizdai pavaizduoti 5.12 pav.

Vaizdai buvo sudaryti išmatavus bandinių pralaidumą T ir apskaičiavus jo logaritmą $-\lg T$. Išskyrus PTFE bandinį, kuris išlieka mažai sugeriantis, skirtingų bandinių vaizdas tendencingai kinta esant skirtingam THz spinduliuotės dažniui. Spinduliuotės dažniui esant 0.58, 1.40 ir 1.63 THz, TA ir SC tabletės tarpusavyje žymiai nesiskiria. Tačiau 0.76, 1.84 ir 2.52 THz vaizduose bandiniai atrodo skirtingai. TA turinčios tabletės labiau sugeria esant 0.76 THz dažniui, o SC turinčios tabletės pasižymi didesne sugertimi esant dažniui 1.84 THz. Vaizde prie 2.52 THz dažnio trijų tablečių TA, SC, TA-SC sugertis vizualiai atrodo panašaus dydžio, tačiau apskaičiavus vidutinę sugerties vertą buvo nustatyta, kad pirmoji tabletė sugeria mažiausiai iš visų, kas atitinka Furjė spektroskopijos matavimų rezultatus. Iš vaizdų buvo įvertintas sistemos signalas triukšmas santykis, kuris siekė 300 ir daugiau kartų. Palyginus vaizdus, galima teigti, jog vaizduose su aukštesnio dažnio spinduliuote kontūrų linijos ryškesnės dėl aštresnio lazerio pluoštelio fokusavimo, nulemta bangų difrakcijos. Taipogi vaizduose stebimas netolygus sugerties pasiskirstymas kiekvienoje tabletėje. Taip atsitinka dėl nehomogeniško sudedamųjų medžiagų pasiskirstymo tabletėse. Pavyzdžiui, sacharozės pasiskirstymas (SC tabletė) labiau homogeniškas nei vyno rūgšties (TA ir TA-SC tabletės).

Tikslų bandinių sudedamųjų medžiagų (komponentinių) žemėlapių galima sudaryti kiekvienam vaizdo taškui sprendžiant šią perpildytą tiesinių lygčių



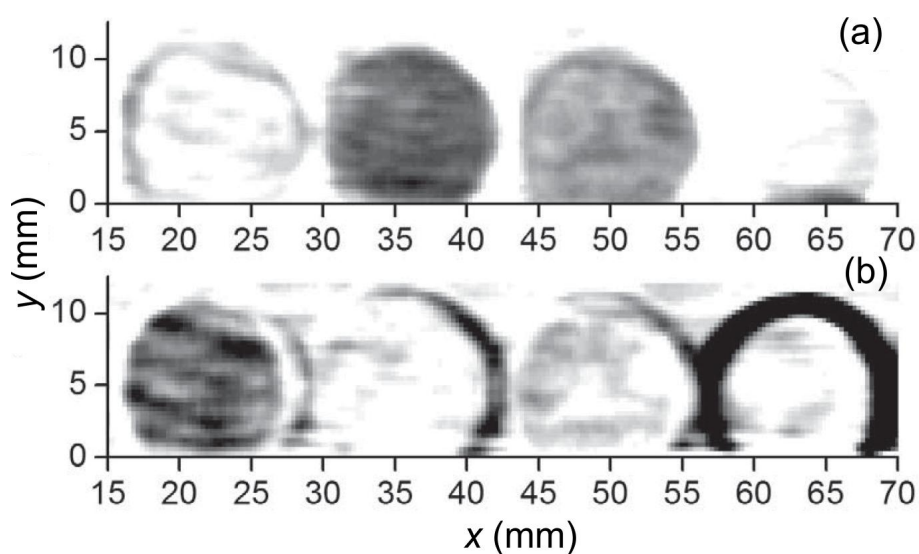
5.12 pav. Bandinių THz pralaidumo logaritmo $-\ln(T)$, kuris proporcingas sugerčiai, vaizdas užrašytas esant skirtingiems THz spinduliuotės dažniams.[A2]

sistemą [76]:

$$Z_{N,M} \cdot X_M = Y_N, \quad (5.1)$$

čia $Z_{N,M}$ yra koeficientų matrica sudaryta iš žinomų sacharozės ir vyno rūgšties pralaidumo verčių ($M = 2$, komponentų skaičius), X_M - ieškomų verčių stulpelis, kuris yra ieškomas komponentinis žemėlapis kiekvienam komponentui M , Y_N - pralaidumo verčių stulpelis, išmatuotas kiekvienam dažniui N . $Z_{N,M}$ buvo sudarytas iš Furjė spektroskopijos matavimų, o Y_N buvo išmatuotas su spektroskopine vaizdinimo sistema ties $N = 6$ skirtingais dažniais. X_M buvo rasti atliekant standartinę aproksimaciją mažiausių kvadratų metodu. Rasti medžiagų komponentiniai vaizdai pateikti 5.13 pav. Kiekvienai tabletei buvo paskaičiuotos koncentracijos vidurkio ir standartinio nuokry-

pio vertės iš kvadrato formos srities, apribotos tabletės kontūrais. Rezultatai, pateikti 5.1 lentelėje, parodė, jog spektroskopinis vaizdinimas su BT diodais leido identifikuoti sacharozę ir vyno rūgštį bei gana tiksliai nustatyti jų koncentraciją bandiniuose. Apskaičiuotos koncentracijos vertės paklaidų ribose sutampa su pirminėmis koncentracijomis, naudotomis ruošiant mišinius tabletėms TA, SC ir PTFE. Tabletėje TA-SC atskirų komponentų koncentracijos nesutampa su pirminėmis, tačiau suminė abiejų komponentų koncentracija paklaidų ribose sutampa. Toks neatitikimas siejamas su netolygiu medžiagų pasiskirstymu mišinyje.

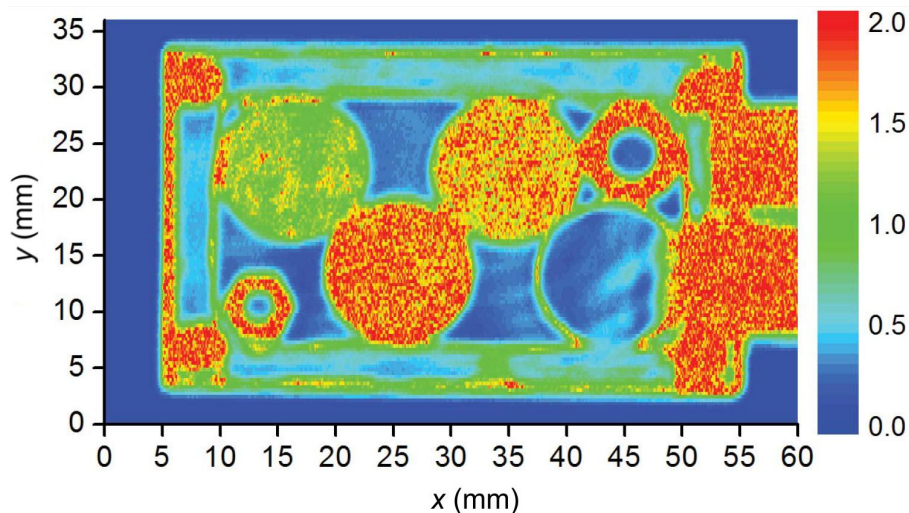


5.13 pav. Sacharozės (a) ir vyno rūgšties (b) koncentracijos erdvinio pasiskirstymo vaizdas. Juoda spalva žymima didžiausia koncentracija, balta - mažiausia. [A2]

5.1 lentelė. Sacharozės ir vyno rūgšties koncentracijos bandiniuose išmatuotos su spektroskopinio vaizdinimo sistema.

Komponentas	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
Sacharozė (%)	0.1 ± 1.1	0.0 ± 0.9	6.1 ± 0.8	-0.3 ± 0.9
Vyno rūgštis (%)	9.9 ± 0.7	10.1 ± 1.4	2.5 ± 1.3	0.3 ± 1.4

Aukščiau pateiktuose spektroskopinio vaizdinimo rezultatuose tiriamas objektas yra patalpintas laisvoje erdvėje. Praktiniams taikymams dažnai yra svarbu identifikuoti paslėptą objektą. Šiuo tikslu eksperimentas buvo papildytas tų pačių objektų, supakuotų į uždarą plastikinę dėžutę, vaizdinimu. Dėžutė buvo pagaminta iš optiškai neskaidraus 2 mm storio didelio tankio polietileno (angl. *high density polyethylene*, HDPE). Bandinių išdės-

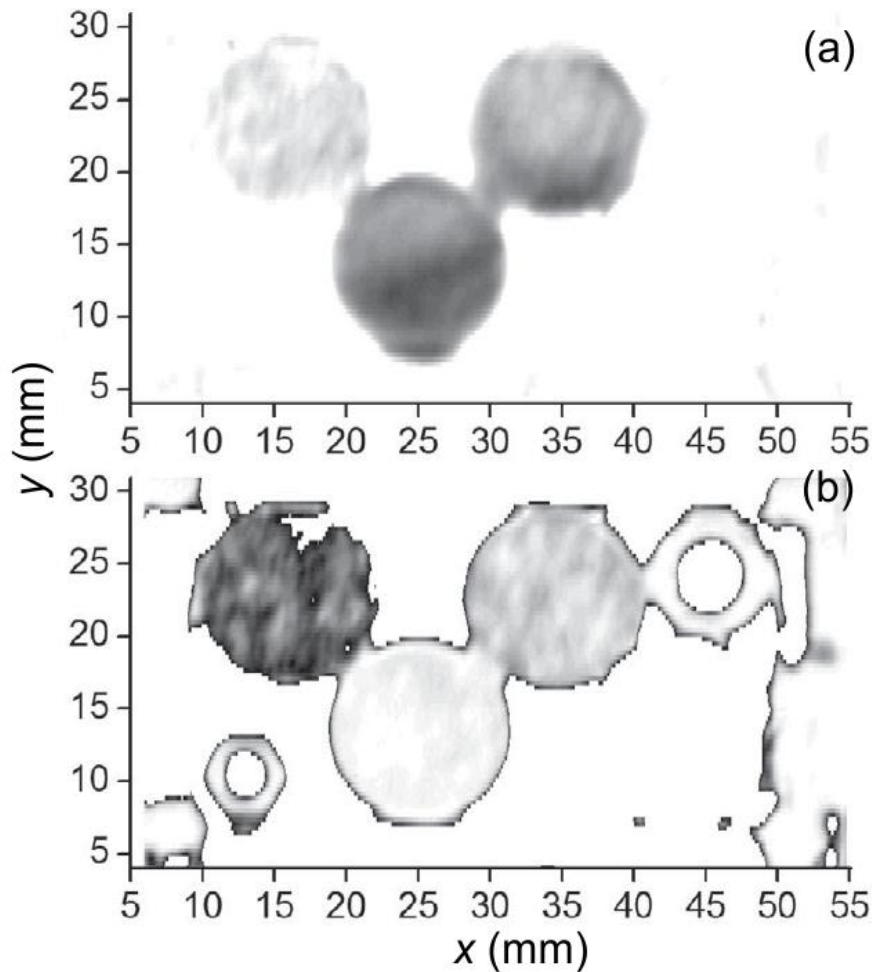


5.14 pav. Tiriamų bandinių, supakuotų HDPE dėžutėje THz vaizdas, užrašytas su 1.84 THz dažnio spinduliuote. [A2]

tymo dėžutėje tvarka pateikta 5.11b pav. Dėžutėje taip pat buvo patalpinti ir du metaliniai objektai: veržlė ir poveržlė. HDPE dėžutė praleidžia apie 80% THz spinduliuotės visame tiriamų dažnių ruože.

Supakuoti į dėžutę objektai buvo, kaip ir laisvos erdvės atveju, spektroskopškai vaizdinami esant skirtingam spinduliuotės dažniui. Pasirinktas THz vaizdas ties 1.84 THz dažniu pavaizduotas 5.14 pav. Prie šio dažnio tabletės su sacharozė pasižymi didesne sugertimi nei likusios. Apskaičiuotos vidutinės sugerties vertės gerai koreliuoja su Furjė spektroskopijos rezultatais. Užrašyti vaizdai buvo panaudoti sprendžiant 5.1 sistemą prieš tai iš kiekvieno vaizdo eliminuojant HDPE dėžutės sugertį. Rezultatai pateikti 5.15 pav. Buvo pastebėta, kad dėl įpakavimo komponentiniuose vaizduose susidaro interferencinės juostos. Nepaisant to skirtingos tabletės gali būti atpažintos ir nustatytas komponentų kiekis jose net jei jos supakuotos į optiškai neskaidrią HDPE talpą.

Ištirta spektroskopinio vaizdinimo sistema su asimetriškai susiaurintu In-GaAs detektoriumi leidžia užrašyti spektroskopinius vaizdus dažnių ruože iki 2.52 THz. Aukštų dažnių ribą didžiajia dalimi nulemia detektoriaus dažnių sritis. Išmatuota detektoriaus dažninė jautrio charakteristika yra pateikta 5.16 pav. Dažnių srityje iki 1 THz detektoriaus jautris mažai keičiasi ir išlieka apie 10 V/W. Virš 1 THz detektoriaus jautris sparčiai mažėja galimai dėl impulso relaksacijos trukmės ir antenos efektyvumo sumažėjimo [97]. Šioje spektroskopinėje vaizdinimo sistemoje darbinę dažnių sritį

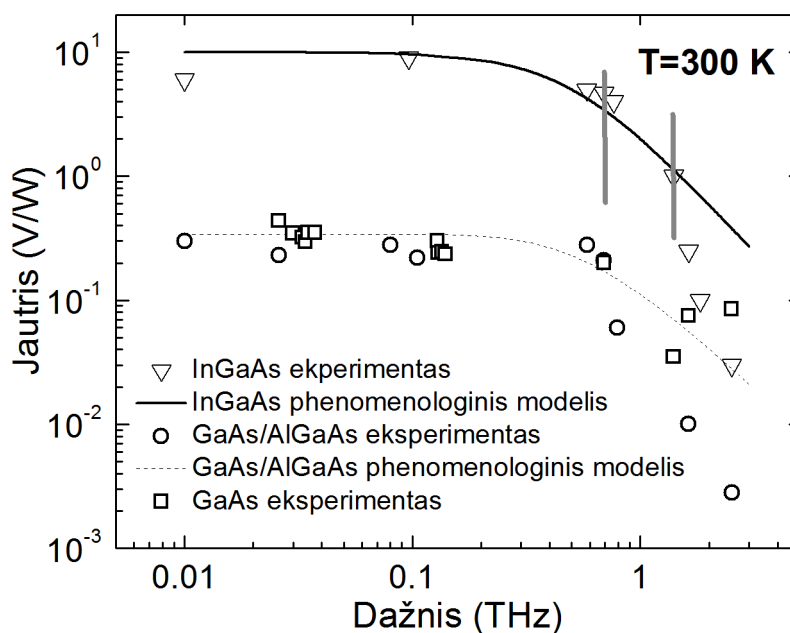


5.15 pav. Sacharozės (a) ir vyno rūgšties (b) koncentracijos erdvinio pasiskirstymo vaizdas uždaroje HDPE dėžutėje. Juoda spalva žymima didžiausia koncentracija, balta - mažiausia. [A2]

būtų galima išplėsti panaudojant plazminių bangų maišymą rezonansiniuose lauko tranzistoriuose.

5.4 Spektroskopinis vaizdinimas su rezonansiniais CMOS FET detektoriais

Spektroskopiniam vaizdinimui skirti lauko tranzistorių detektoriai (TeraFET) buvo suprojektuoti H. Roskos vadovaujamos mokslininkų grupės Goethe universitete Frankfurte. Detektoriai buvo pagaminti komercine 90 nm silicio CMOS (angl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) technologija. Detektoriaus dažnių juostos selekciją ir THz spinduliuotės suvedimą į lauko tranzistorių atlieka integruota plokštelės tipo (angl. *patch*) rezonan-



5.16 pav. Peteliškės formos InGaAs, GaAs/AlGaAs (paimta iš [95]) ir GaAs (paimta iš [99]) detektorių dažninių jautrio charakteristikų palyginimas. [B1]

sinė antena. Detektoriai buvo projektuoti keliems skirtingiems dažniams, kurie buvo parinkti taip, kad sutaptų su monochromatinėmis THz lazerio linijomis: 2.52 THz, 3.18 THz ir 4.25 THz. Skirtingo dažnio TeraFET detektoriai buvo pagaminti ant vieno lusto ir sumontuoti į kompaktines mikroschemas, leidžiančias keisti aktyvų detektorių. Daugiau informacijos apie TeraFET detektorius, jų veikimo principą ir kitas savybes galima rasti [100] darbe ir jame cituojamoje literatūroje.

Pirmiausia buvo įvertinti TeraFET detektorių jautris ir NEP. Šiuo tikslu kiekvienu detektoriumi ties jo rezonansiniu dažniu buvo užrašomas THz šaltinio pluošto erdvinis profilis. Kadangi visa THz šaltinio galia buvo sukalibruota galios matuokliu, iš išmatuoto profilio buvo rastos jutiklių jautrio ir NEP vertės. Matavimų rezultatai pateikti 5.2 lentelėje.

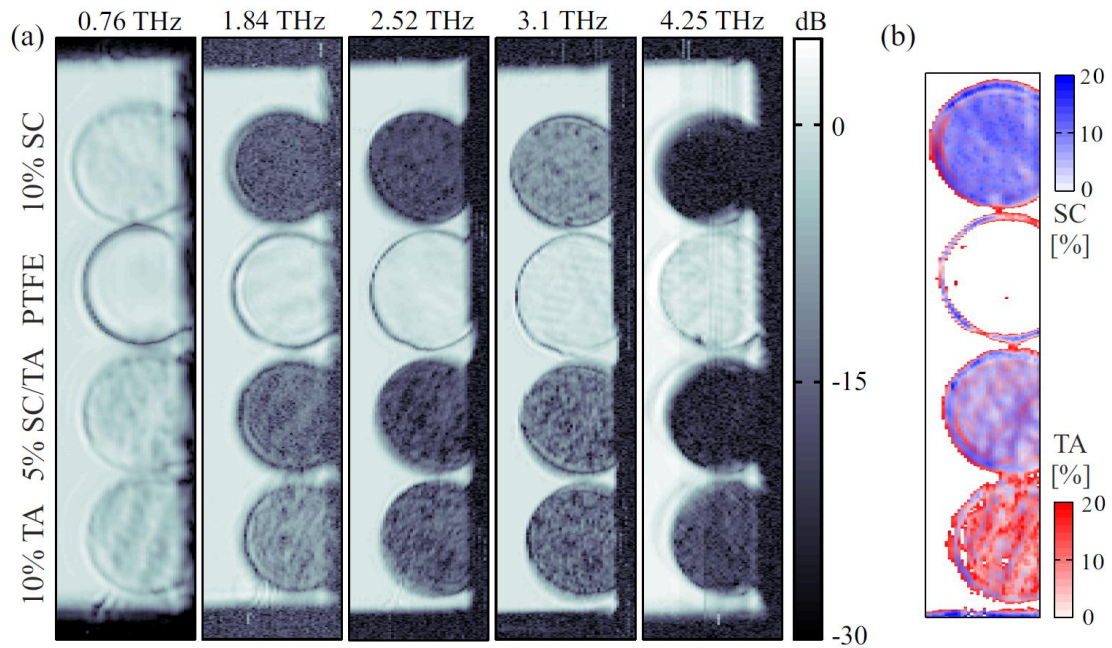
5.2 lentelė. TeraFET detektorių jautris ir triukšmų ekvivalentinė galia (NEP).

Dažnis (THz)	Jautris (V/W)	NEP(pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
2.52	336	63
3.12	308	85
4.25	230	110

Pasirinkti TeraFET detektoriai buvo naudojami sprogmėnų imitatorių, aprašytų 5.2.3 skyriuje, spektroskopiniam vaizdinimui. Tablečių pralaidumo vaizdai buvo užrašyti ties šiomis lazerio linijomis: 0.76, 1.84, 2.52, 3.11, ir 4.25 THz. Žemesnio dažnio THz linijų 0.76, 1.84 atveju buvo panaudoti papildomi detektoriai, kurių rezonansinis dažnis yra šalia linijos, atitinkamai 0.65 ir 1.63 THz. Tačiau ir tokiomis sąlygomis detektoriai išlieka pakankamai jautrūs THz vaizdinimui. Šiame darbe detalesni šių detektorių tyrimai nebuvo atlikti.

Vaizdai buvo užrašomi pralaidumo geometrijoje 5.5 pav. pateikta schema. Užrašyti vaizdai pateikti 5.17 pav. Eksperimento metu bandiniai buvo pritvirtinti atviroje erdvėje prie metalinio laikiklio. Matavimai buvo atliekami prie skirtingo THz spinduliuotės dažnio keičiant lazerio rezonatoriaus dujas ir jo padėtį. Kiekvieną kartą pakeitus THz dažnį, buvo perjungiamas atitinkamo dažnio detektorius ir suderinama jo padėtis siekiant gauti maksimalią signalo vertę. Užrašyti vaizdai rodo 22 dB ir, kai kuriais atvejais, didesnę dinaminę diapazoną. Tik 1.84 THz atveju pastebimas didesnis triukšmas ir 18 dB mažesnis dinaminis diapazonas. Manome, kad taip atsitiko dėl to, kad nesutapo spinduliuotės ir rezonansinio detektoriaus dažniai. SC ir TA tablečių vaizdų kontrastas skiriasi ties dažniais 0.76, 1.84, 3.11 ir 4.25 THz. SC tabletė pasižymi didesniu pralaidumu ties dažniais 0.76 ir 3.11 THz, tuo tarpu, TA tabletė labiau praleidžia 1.84 ir 4.25 THz spinduliuotę. Prie 2.52 THz skirtumas tarp šių bandinių mažiau pastebimas, nors TA tik šiek tiek daugiau praleidžia THz spinduliuotės nei SC. Taip pat buvo pastebėta, kad ties 4.25 THz sacharozės sugertis tokia didelė, kad tiek grynos SC, tiek SC-TA mišinio bandiniai parodė artimą nuliui pralaidumo vertę. PTFE tabletė visuose vaizduose pasižymėjo nedidele sugertimi, todėl buvo naudojamas kaip atraminis bandinys pralaidumo įvertinimui tolimesniam duomenų apdorojimui.

Atlikus THz vaizdinimą prie 5 skiriančių dažnių kiekvienam bandiniui buvo apskaičiuotos vidutinės pralaidumo vertės (5.3 lentelė). Vidurkinimui buvo pasirenkamas visas tabletės plotas, išskyrus kraštus, kuriuose galimi netikslumai dėl difrakcijos. Vaizdinimo ir skaičiavimų rezultatai gerai koreliuoja su Furjė spektroskopijos matavimais. Pastebėtas bandinių kontrastų skirtumas ties 0.76, 1.84, 3.11 ir 4.25 THz dažniais susidaro dėl skirtingos sacharozės ir vyno rūgšties sugerties šiuose dažniuose. Kontrasto prie 2.52 THz nesimato dėl abiejų komponentų stiprios sugerties.



5.17 pav. (a) Sprogmenų imitatorių THz pralaidumo spektroskopiniai vaizdai užrašyti su rezonansiniais TeraFET detektoriais. (b) Apskaičiuotas sacharozės (SC) ir vyno rūgštis (TA) koncentracijos erdvinis pasiskirstymas bandiniuose. [A1]

5.3 lentelė. Bandinių pralaidumas prie matuotų dažnių, išmatuotas su TeraFET detektoriais ir Furjė spektroskopija. [A1]

f [THz]	TeraFETs				Furjė spektroskopija			
	10% TA	MIX	PTFE	10% SC	10% TA	MIX	PTFE	10% SC
0.76	0.489	0.573	1	0.772	0.410	0.488	0.798	0.724
1.84	0.130	0.046	1	0.030	0.133	0.048	0.838	0.028
2.52	0.030	0.017	1	0.017	0.038	0.021	0.858	0.017
3.1	0.040	0.052	1	0.116	0.038	0.051	0.844	0.118
4.25	0.015	0.006	1	0.004	0.022	0.009	0.792	0.002

Spektroskopinis vaizdinimas leidžia nustatyti plokštuminį cheminių komponentų pasiskirstymą tabletėse su sąlyga, kad spinduliuotės pluošto dydis yra didesnis nei cheminių komponentų dalelių dydis. Kaip matyti 5.17a pav. THz pralaidumas yra netolygus kiekvienos tabletės viduje. Toks kitimas yra dėl netolygaus aktyviosios medžiagos pasiskirstymo PTFE matricoje, kuris keičia sugertį ir sklaidą. Pastarasis efektas mažai tikėtinas, nes tankio pokyčiai pakankamai nedideli. Pasitelkus komponentinę analizę iš THz vaizdų buvo sudarytas bandinių komponentinis žemėlapis. 5.17b pav. skirtingomis spalvomis pavaizduotas sacharozės ir vyno rūgštis kiekio erdvinis (plokštuminis) pasiskirstymas visuose bandiniuose. Buvo nustatyta, kad vienkom-

ponenčiuose bandiniuose medžiagos pasiskirstė nehomogeniškai maišant jas su PTFE milteliais. Tuo tarpu spalvoti 100%PTFE tabletės kraštai tik patvirtina difrakcijos efektą ties tablečių kontūrais.

5.5 Mikrobolometrinių detektorių taikymas terahercinių dažnių spektroskopinėse vaizdinimo sistemose su optoelektroniniais spinduliuotės šaltiniais.

Šiuo metu vienas iš pagrindinių būdų matuoti spektrus ir vaizdus THz dažnių diapazone remiasi laikine terahercine spektroskopija (angl. *Terahertz time-domain-spectroscopy*, THz-TDS). Šiose sistemose THz spinduliuotės impulsai yra generuojami ir registruojami pasitelkiant femtosekundiniais lazerio impulsais aktyvuojamus optoelektroninius emiterius ir detektorius, tokius kaip, pavyzdžiui, fotolaidžios dipolinės antenos, pagamintos iš puslaidininkių su trumpesnėmis už 1 ps krūvininkų gyvavimo trukmėmis [101, 102]. THz-TDS sistemos leidžia atlikti spektrinius matavimus kambario temperatūroje, nenaudojant kriogeninių detektorių; jos užtikrina pakankamai gerą, didesnę nei 60 dB signalo ir triukšmo santykį plačiame terahercinių dažnių ruože [103].

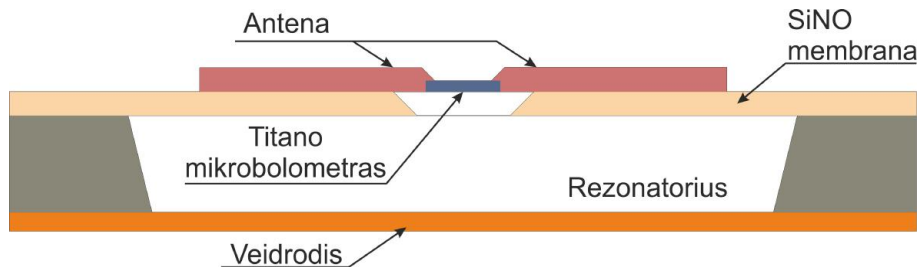
THz-TDS sistemose objekto vaizdai prie tam tikrų THz diapazono dažnių yra gaunami paėiliui išmatavus paėjusius (arba atsispindėjusius) THz impulsus įvairiuose jo paviršiaus taškuose, po to atlikus impulso laikinės priklausomybės Furjė transformaciją ir galų gale išskyrus iš gautųjų spektrų pageidaujama dažnį atitinkančias norimo parametro vertes. Šis THz vaizdinimo būdas turi keletą akivaizdžių trūkumų. Vienas jų yra susijęs su būtinumu naudoti keičiamo ilgio optinę vėlinimo liniją. Viena vertus, ji reikalauja eilės papildomų optinių ir elektrinių jungčių tarp įvairių sistemos elementų, kurios daro sistemą gerokai kompleksiškesne, sudėtingesne ir ją ženkliai pabrangina. Kita vertus, kiekviename matuojamo vaizdo taške ši linija turi skenuoti THz impulsą tam tikrame vėlinimo laikų diapazone, kurio dydis apspręs gaunamo vaizdo spektrinę skyrą. Kadangi optinės linijos paprastai yra mechaniniai prietaisai, o reikalingas vėlinimo laikų keitimo

diapazonas yra nuo 10 ps iki 100 ps, jų veikimo dažnis, kuris neviršija kelių dešimčių Hz, tampa svarbiausiu visos vaizdinimo sistemos spartą ribojančiu faktoriumi.

Kompaktiški THz jutikliai veikiantys tiesioginės (nekoherentinės) detekcijos principais kambario temperatūroje galėtų būti gera alternatyva koherentiniams detektoriams THz-TDS sistemose. Tai ženkliai supaprastintų ir paspartintų vaizdų užrašymą. Pagrindinis sunkumas sprendžiant tokių uždavinių yra pakankamai maža vidutinė optoelektroninio emiterio emituojama galia. O tokiai mažai galiai detektuoti optoelektroniniai emiteriai nėra tinkami dėl mažo jautrio tiesioginėje detekcijoje. Išėjis galėtų būti pakankamai jautrūs antena kaupinami titano mikrobolometrai.

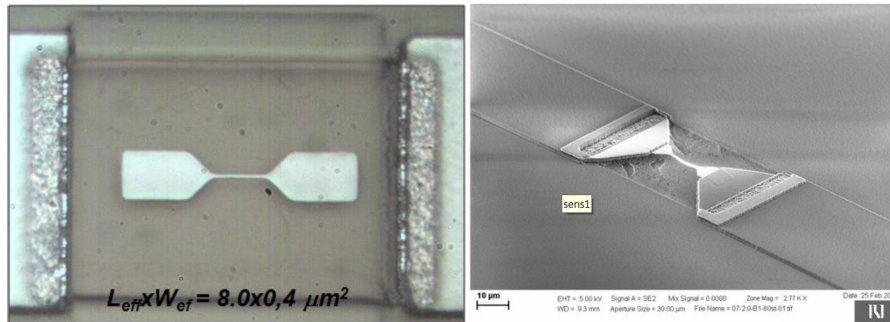
Mikrobolometriniai detektoriai

Pagrindinis reikalavimas keliamas detektoriumi, galinčiam registruoti optoelektroninių emiterių generuojamą spinduliuotę, yra pakankamai didelis jautris ir tuo pačiu žema NEP vertė. Šiai sąlygai patenkinti eksperimentui mikrobolometriniai jutikliai ¹ buvo pagaminti ir optimizuoti atsižvelgiant į tam tikrus kriterijus, keliamus bolometro medžiagai: didelis temperatūrinis koeficientas, mažas triukšmas, gamybos technologija suderinama su pramonine silicio apdirbimo technologija, ilgalaikis stabilumas. Kūrimo procese atlikti tyrimai [104, 105] parodė, kad tinkamiausia medžiaga jutiklio termistoriui gaminti yra titanas. Šalia medžiagos parinkimo buvo atliekama ir bolometro geometrijos optimizacija, leidžianti pagerinti jutiklio parametrus. Optimizuoto mikrobolometrinių jutiklio skerspjūvis pavaizduotas 5.18, o optinio bei elektronų mikroskopo vaizdai 5.19 paveiksluose.



5.18 pav. THz spinduliuotės detektoriaus su titano mikrobolometru schematinis brėžinys.

¹Mikrobolometriniai detektoriai buvo sukurti ir pagaminti J. Trontelj grupėje Liubianos universitete.



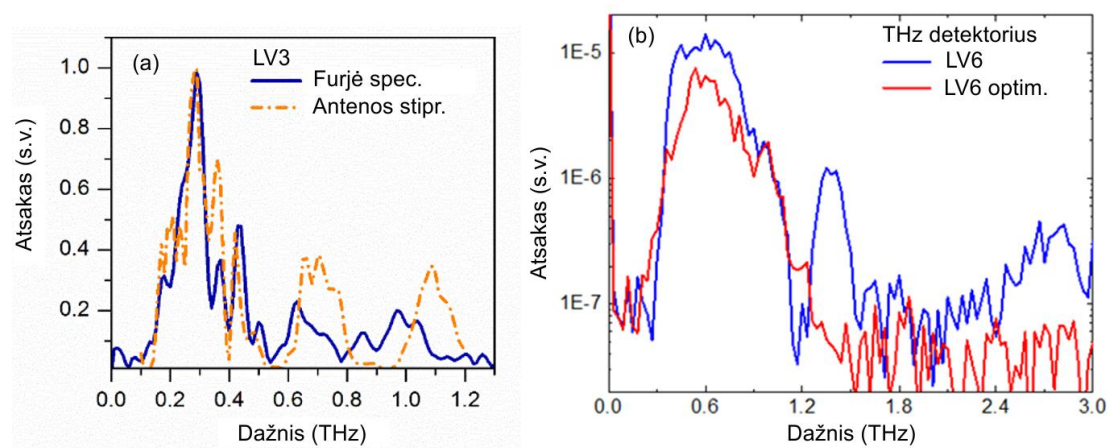
5.19 pav. Mikrobolometrinių detektorių aktyvioji sritis - titano bolometras. [104]

Jutiklio veikimo principas pagrįstas termistoriaus elektrinės varžos pokyčiu dėl elektromagnetinių bangų sukkelto temperatūrinio kaitimo. Termistorius, $\sim 0.5 \mu\text{m}$ pločio ir $\sim 10 \mu\text{m}$ ilgio titano sluoksnis, pakabintas ore, norint sumažinti šiluminius nuostolius į aplinką ir taip pagerinti bolometro jautrį. Elektromagnetinės bangos suvedimui į termistorių naudojamos planarinės antenos, kurių tipas ir matmenys nulemia dažnines detektoriaus charakteristikas. Vaizdinimo sistemoje, naudojant plačiajuostį emiterį, vaizdams prie tam tikrų dažnių užrašyti reikalingi siaurajuosčiai detektoriai, veikiantys prie tam tikro rezonansinio dažnio. Šiuo tikslu detektoriai buvo sujunti su rezonansinėmis dipolinėmis antenomis. Antena ir termistorius yra suformuoti ant silicio nitrido membranos taip sumažinant šilumos bei anteninius nuostolius į padėklą. Antenos selektyvumui pagerinti bolometro apačioje yra papildomai suformuotas $\lambda/4$ storio rezonatorius. Gamyboje naudojamos silicio apdirbimo technologijos suteikiančios galimybę detektorius gaminti pramoniniu būdu.

Šiame darbe buvo tiriami rezonansiniai 0.3 THz ir 0.6 THz dažnio detektoriai (atitinkami žymenys LV3 ir LV6). Eksperimentams buvo paruošti eile išdėstytų keturių detektorių lustai su integruotomis stiprintuvų schemomis. Detektoriai pasižymi šiomis charakteristikomis: atsako trukmė ne daugiau $1 \mu\text{s}$, jautris iki 300 V/W ir triukšmų ekvivalentinė galia iki $14 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Tokie parametrai leidžia tikėtis panaudoti tokius detektorius Furjė spetrokopijoje ir THz-TDS sistemose. Furjė spektrometru išmatuotos detektorių atsako dažninės charakteristikos pateiktos 5.20 pav. LV3 detektoriaus atveju (5.20a pav.) palyginimui grafike pateikta antenos stiprinimo dažninė charakteristika, suskaičiuota ANSYS HFSS programiniu paketu ². Eksper-

²Skaičiavimai atlikti Liublianios universitete

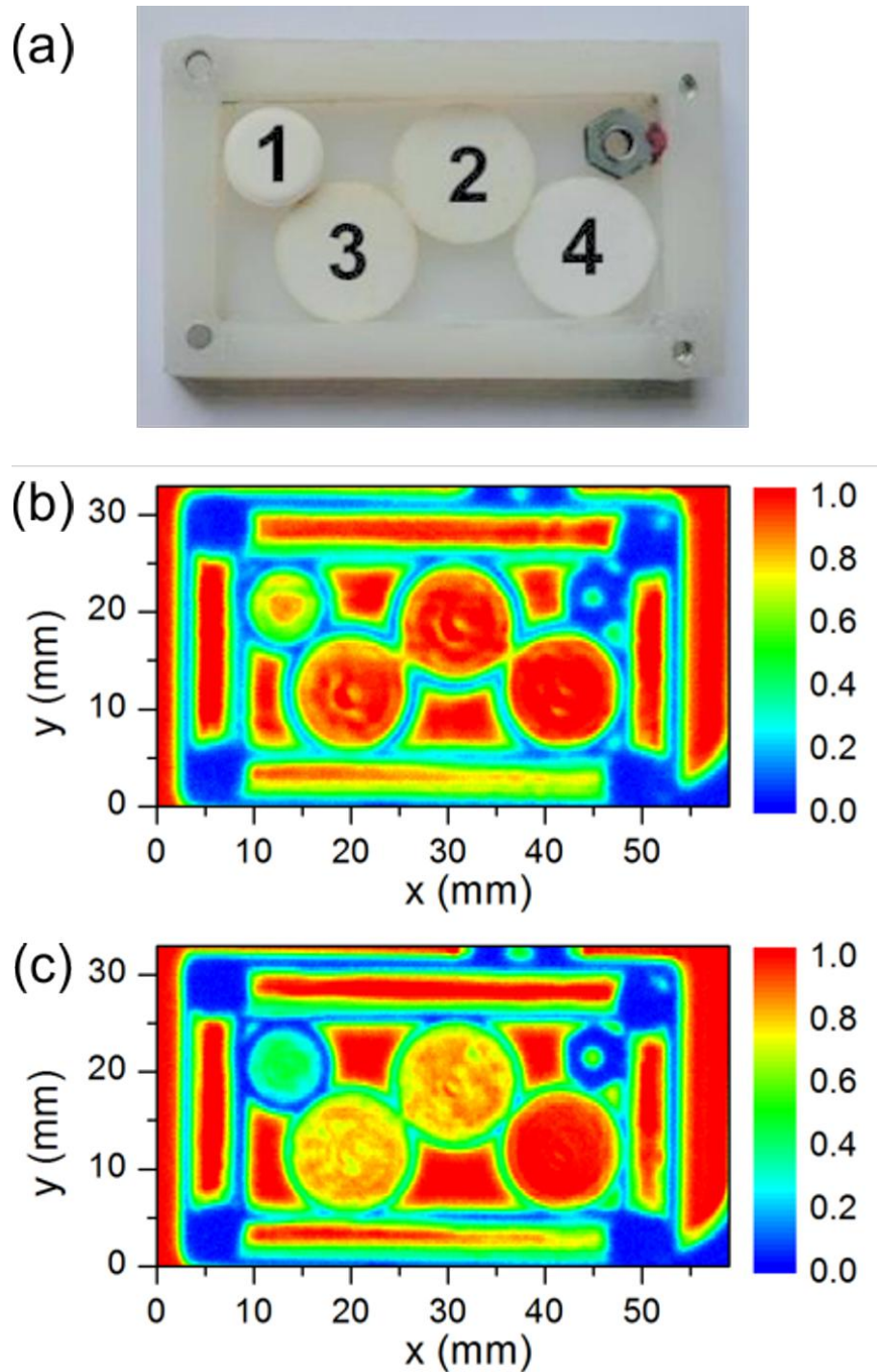
imentiniai ir skaičiavimo rezultatai rodo panašios formos charakteristiką su vienodu rezonansiniu dažniu ties 300 GHz. Skaičiavimų rezultatai taip pat patvirtina ir papildomų pikų buvimą aukštesnių dažnių srityje iki 1.3 THz. LV6 detektoriaus atsako dažninė charakteristika pateikta 5.20b pav. Išmatuota detektoriaus dažninė charakteristika pasižymi dviem pikais. Be pagrindinio piko ties 0.6 GHz, matomas ir šalutinis gana intensyvus pikas ties 1.3 THz dažniu. Pastarasis paaiškinamas ne visai optimaliu rezonatoriaus veikimu, kadangi palyginimui pateiktoje detektoriaus su optimizuotu rezonatoriumi charakteristikoje tokio piko nėra. Tolimesnėje šio darbo eigoje antrasis pikas nedaro daug įtakos, nes tiek optoelektroninio šaltinio galia, tiek ir tiriamų bandinių pralaidumas dažnių srityje virš 1 THz ryškiai sumažėja.



5.20 pav. Mikrobolometrinių detektorių LV3 (a) ir (LV6) dažninės charakteristikos išmatuotos su Furjė spektrometru. LV3 atveju pateiktas ir apskaičiuotas antenos stiprinimo spektras. [C4]

Spektroskopinis vaizdinimas su optoelektroniniu emiteriu ir mikrobolometriniais detektoriais

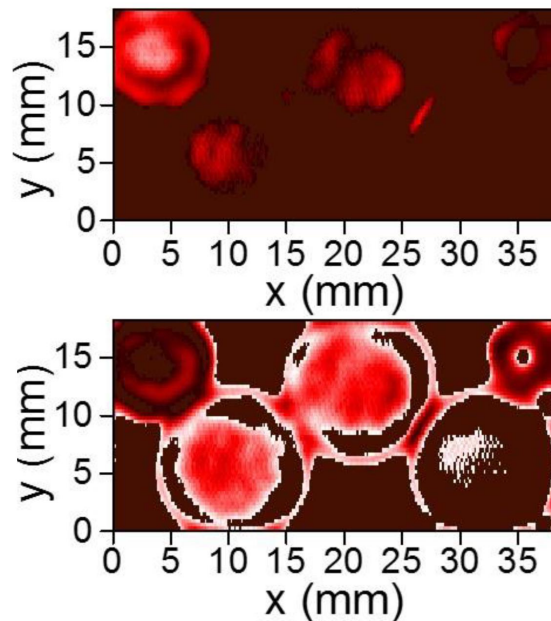
Tiriami mikrobolometriniai titano detektoriai buvo pritaikyti spektroskopinio vaizdinimo sistemoje su optoelektroniniu emiteriu. Sistemos principinė schema beveik tokia pati kaip anksčiau pateikta vaizdinimo schema (5.4 pav.). Šiuo atveju vietoje THz lazerio buvo naudojama optiniais femtosekundinės trukmės impulsais žadinama plačiajuostė LTG-GaAs fotolaidi antena. Toks emiteris generuoja plataus spektro THz spinduliuotę su vidutine galia apie $1.2 \mu\text{W}$.



5.21 pav. Supakuotų į HDPE dėžutę objektų foto nuotrauka (a) ir THz vaizdai užrašyti su 300 GHz (b) ir 600 GHz (c) rezonansiniais detektoriais. Objektų išdėstymo tvarka: 1 - laktozės rūgštis, 2 - vyno rūgštis, 3 - vyno rūgštis ir sacharozės mišinys, 4 - PTFE. [C4]

Sistemos testavimui buvo atliktas plastikinėje dėžutėje supakuotų skirtingos cheminės sudėties objektų, sprogmenų imitatorių, spektroskopinis vaizdinimas. Bandinių išdėstymas ir vaizdinimo rezultatai yra pateikti 5.21 pav.

Vaizdai prie skirtingų dažnių užrašomi panaudojant skirtingų dažnių savybių detektorius. Kaip matyti objektai THz vaizduose atrodo skirtingai. Laktozės rūgštis tiek prie 300 GHz, tiek prie 600 GHz turi mažesnę pralaidumą nei kitos tabletės. Tačiau tabletės, turinčios sudėtyje vyno rūgštis, elgiasi skirtingai apšvietus jas THz spinduliuote - 300 GHz vaizde atrodo labai mažai sugeriančios, o 600 GHz vaizde - mažai praleidžiančios. Tokie rezultatai koreliuoja su Furjė spektroskopijos duomenimis, kur laktozės rūgštis turi pralaidumo minimumą ties ~ 0.53 THz dažniu, o vyno rūgštis ties ~ 1.07 THz dažniu. Taipogi svarbu atkreipti dėmesį ir į THz vaizdų signalas-triukšmas santykį, kuris demonstruoja visos sistemos dinaminį diapazoną. Užrašant vaizdus buvo nustatyta, kad šis santykis tiek prie 300 GHz, tiek prie 700 GHz yra apie 33, o tai yra pakankama objektų atskyrimui ir cheminiai sudėčiai nustatyti.



5.22 pav. Laktozės rūgštis (viršuje) ir vyno rūgštis (apačioje) pasiskirstymas HDPE dėžutėje supakuotose bandiniuose. [C4]

Atlikus supakuotų objektų THz vaizdinimą skirtingo dažnio detektoriais (5.21 pav.) analogiškai kaip ir 5.3 skyriuje buvo atlikta komponentinė analizė. Laktozės rūgštis ir vyno rūgštis pasiskirstymas HDPE dėžutėje supakuotose bandiniuose yra pavaizduotas 5.22 pav. Šviesesnė spalva reiškia

didesnę medžiagos koncentraciją. Pateikti rezultatai gerai koreliuoja su bandinių sudėtimi. Daugiausiai LA nustatyta 1-oje tabletėje, kai tuo tarpu TA 2-oje tabletėje.

Atlikto eksperimento rezultatai demonstruoja, kad rezonansiniai Ti mikrobolometrai gali būti panaudojami THz vaizdinimo sistemose su optoelektroniniais terahercinės spinduliuotės emiteriais. Remiantis šio tyrimo rezultatais buvo sukurtas išradimas „Terahercinių dažnių juostos vaizdinimo sistema“, kuris užpatentuotas Lietuvos Respublikos valstybiniame patentų biure [B2].

Skyriaus apibendrinimas

Abibendrinant skyriaus rezultatus galima teigti, jog inovatyvūs kambario temperatūros kompaktiški terahercinės spinduliuotės detektoriai buvo pritaikyti spektroskopiniam vaizdinimui tiesioginės detekcijos schemose. Asimetriškai susiaurinti InGaAs detektoriai buvo panaudoti sacharozės ir vyno rūgšties bandinių vaizdinimui ir jų komponentinės sudėties nustatymui dažnių ruože nuo 0.5 iki 2.52 THz. Vaizdinimui naudojama dažnių sritis buvo išplėsta iki 4.25 THz panaudojant, detektorius su antenomis kaupinamais lauko tranzistoriais, veikiančiais plazmoninio maišymo principais. THz vaizdinimo sistemoms su mažos vidutinės galios optoelektroniais emiteriais buvo pritaikyti antena kaupinami titano mikrobolometrai. Nustatyta, kad jų maža $10 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ eilės triukšmų ekvivalentinė galia leidžia juos panaudoti optoelektroninių emiterių THz spinduliuotės pluoštui skenuoti bei objektų spektroskopiniam vaizdinimui THz dažnių ruože.

Remiantis šiais rezultatais buvo suformuluoti *4-asis ir 5-asis ginamieji teiginiai*, atitinkamai:

4. InGaAs „peteliškės“ formos diodai yra tinkami kambario temperatūros aktyviam spektroskopiniui vaizdinimui teraherciniame dažnių ruože, jei yra naudojami milivatų eilės galios emiteriai. Vaizdinimo dažnių ruožo viršutinę ribą apibrėžia elektronų impulso relaksacijos laikas. Dažnių ruožas spektroskopiniam vaizdinimui gali būti išplėstas panaudojant plazmoninio maišymo reiškinius nanometriniuose lauko tranzistoriuose.
5. Nekoherentiniai kambario temperatūros detektoriai yra tinkami naudoti spektroskopinio vaizdinimo sistemose su optoelektroniniais terahercinės spinduliuotės emiteriais jei jų triukšmų ekvivalentinė galia yra $10 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ eilės.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Pirmą kartą pagaminta ir eksperimentiškai ištirta A. Reklaičio (Phys. Rev. B 77, 153309, 2008) pasiūlyta delta-profilu legiruota *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterosandūra, skirta efektyviam terahercinės spinduliuotės generavimui žadinant ją femtosekundinės trukmės optiniais impulsais. Nustatyta, kad tokie dariniai yra efektyvūs terahercinės spinduliuotės emiteriai, kurių galia viršija InGaAs ir InAs paviršinių emiterių emisiją, jei optinio žadinimo srautai neviršija $0.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir $7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, esant atitinkamiems 82 MHz ir 1 kHz žadinančio lazerio pasikartojimo dažniams.
2. Atlikus z-skenavimo eksperimentus THz dažnių ruože nustatytos žadinimo sąlygos, leidžiančios pasiekti efektyvią THz emisiją iš delta-profilu legiruotų *p-i-n-i* GaAs/AlGaAs heterostruktūrų. Gauti rezultatai yra palyginti su tomis pačiomis sąlygomis žadinamų InGaAs ir InAs paviršinių emiterių duomenimis.
3. Pasinaudojant kontroliuojamos injekcijos teoriniais principais sub-kritiniams Gunn stiprintuvams, sukurtas analitinis teorinis modelis diodui su supergardele. Surastos sąlygos, kada tokioje struktūroje galima sukurti vienalytį elektrinį lauką. Nustatyta, kad jei tokia struktūra turi blokuojantį kontaktą, vienalytis elektrinis laukas injekciniam diode gali būti sukuriamas plačiame pridėtos įtampos ruože, t. y. taip vadinamas Kroemer taškas sub-kritiniams Gunn stiprintuvams išplinta į Kroemer intervalą.
4. Ištirta GaAs/AlGaAs supergardelė, turinti asimetrinius injektuojančius/blokuojančius kontaktus – Schottky kontaktą ir GaAs/AlGaAs heterosandūrą. Parodyta, kad toks kontroliuojamos injekcijos supergardelių diodas leidžia sukurti vienalytį elektrinį lauką GaAs/AlGaAs supergardelėje, esant atitinkamam pridėtos išorinės įtampos interva-

- lui.
5. Parodyta, jog kontroliuojamos injekcijos stipriai susietų GaAs/AlGaAs supergardenių diode esant vienalyčiam elektriniam laukui, sukurtam nanosekundinės trukmės įtampos impulsais tiek tiesiogine, tiek atvirkštine kryptimi kambario temperatūroje mikrobangų ruože gali būti stebimas Blocho stiprinimas.
 6. Trumpo židinio nuotolio fokusuojančio optikos elemento panaudojimas vaizdinimo sistemoje su šaltiniu spinduliuojančiu TEM₀₁ modos terahercinės spinduliuotės pluoštą leidžia užrašyti kokybiškus terahercinius vaizdus su rezoliucija artima difrakcijos ribai.
 7. TEM₀₁ lazerio moda buvo pritaikyta silicio saulės elementų vaizdinimui. Pademonstruota, jog parinkus tinkamą fokusuojančią optiką galima užrašyti aukštos kokybės vaizdus esant daugiamodžiam lazerio veikimui.
 8. InGaAs „peteliškės“ tipo diodai gali būti pritaikyti kambario temperatūros spektroskopiniam vaizdinimui, jei yra naudojami milivatų eilės galios emiteriai. Vaizdinimo dažnių ruožo viršutinę ribą apibrėžia elektronų impulso relaksacijos laikas.
 9. Panaudojant spektroskopinį vaizdinimą ir komponentinės analizės metodus galima nustatyti medžiagų komponentinių pasiskirstymą terahercinei spinduliuotei skaidriuose dariniuose. Tai buvo pademonstruota sprogmenų imitatoriams – cukrozei ir vyno rūgščiai – įpresuotiems į politetrafluoretileno tabletes.
 10. Spektroskopinio vaizdinimo terahercinių dažnių ruožas, aprėpiamas su InGaAs „peteliškės“ tipo diodais, gali būti išplėstas panaudojant plazmoninio maišymo reiškinius nanometriniuose lauko tranzistoriuose, naudojant 90 nm CMOS technologiją ir integruojant skiautės (angl. *patch*) tipo antenas.
 11. Parodyta, jog nekoherentiniai kambario temperatūros detektoriai – titano mikrobolometrai – yra tinkami optoelektroninių terahercinės spinduliuotės emiterių spinduliuotei detektuoti ir spektroskopiškai vaizdinti teraherciniame dažnių ruože, jei jų triukšmų ekvivalentinė galia yra 10 pW/√Hz eilės.

Literatūra

- [1] M. Tonouchi, Cutting-edge terahertz technology, *Nature photonics* **1**(2), 97–105 (2007).
- [2] Q. Lu, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, M. Razeghi, Room temperature single-mode terahertz sources based on intracavity difference-frequency generation in quantum cascade lasers, *Applied Physics Letters* **99**(13), 131106 (2011).
- [3] M. A. Belkin, F. Capasso, New frontiers in quantum cascade lasers: high performance room temperature terahertz sources, *Physica Scripta* **90**(11), 118002 (2015).
- [4] M. Razeghi, Q. Lu, N. Bandyopadhyay, W. Zhou, D. Heydari, Y. Bai, S. Slivken, Quantum cascade lasers: from tool to product, *Optics express* **23**(7), 8462–8475 (2015).
- [5] L. Esaki, R. Tsu, Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors, *IBM Journal of Research and Development* **14**(1), 61–65 (1970).
- [6] V. G. Lyssenko, G. Valušis, F. Löser, T. Hasche, K. Leo, M. M. Dignam, K. Köhler, Direct Measurement of the Spatial Displacement of Bloch-Oscillating Electrons in Semiconductor Superlattices, *Physical Review Letters* **79**(2), 301–304 (1997).
- [7] A. Reklaitis, Coherence of terahertz emission from photoexcited electron-hole plasma: Hydrodynamic model and Monte Carlo simulations, *Phys. Rev. B* **77**(15), 153309 (2008).
- [8] M. Inguscio, G. Moruzzi, K. Evenson, D. Jennings, A review of frequency measurements of optically pumped lasers from 0.1 to 8 thz, *Journal of applied physics* **60**(12), R161–R192 (1986).

- [9] E. R. Mueller, Optically-pumped THz laser technology, prieiga internete <http://www.coherent.com/downloads/opticallypumpedlaser.pdf>, žiūrėta 2016-03-20.
- [10] X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow, D. H. Auston, Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces, *Applied Physics Letters* **56**(11), 1011–1013 (1990).
- [11] A. Bičiūnas, A. Gežutis, A. Krotkus, Terahertz generation by photoconductors made from low-temperature-grown GaAs annealed at moderate temperatures **47**(2), 130 (2011).
- [12] G. Valušis, Spatial and temporal dynamics of Bloch oscillations in GaAs/AlGaAs superlattice, *Lithuanian Journal of Physics* **43**, 5–14 (2003).
- [13] M. Voßbünger, H. G. Roskos, F. Wolter, C. Waschke, H. Kurz, K. Hirakawa, I. Wilke, K. Yamanaka, Radiative decay of optically excited coherent plasmons in a two-dimensional electron gas, *Journal of the Optical Society of America B* **13**(5), 1045 (1996).
- [14] T. Dekorsy, H. Auer, H. J. Bakker, H. G. Roskos, H. Kurz, THz electromagnetic emission by coherent infrared-active phonons, *Physical Review B* **53**(7), 4005–4014 (1996).
- [15] V. L. Malevich, R. Adomavičius, A. Krotkus, THz emission from semiconductor surfaces, *Comptes Rendus Physique* **9**(2), 130–141 (2008).
- [16] X. C. Zhang, D. H. Auston, Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics, *Journal of Applied Physics* **71**(1), 326–338 (1992).
- [17] W. Mönch, *Semiconductor Surfaces and Interfaces*, Springer Series in Surface Sciences (Springer Berlin Heidelberg, 2013).
- [18] A. Bičiūnas, V. Pačebutas, A. Krotkus, Terahertz pulse emission from semiconductor surfaces illuminated by femtosecond Yb:KGW laser pulses, *Physica B: Condensed Matter* **404**(20), 3386–3390 (2009).
- [19] S. L. Chuang, S. Schmitt-Rink, B. I. Greene, P. N. Saeta, A. F. J. Levi, Optical rectification at semiconductor surfaces, *Physical Review Letters* **68**(1), 102–105 (1992).

- [20] W. Sha, A. L. Smirl, W. F. Tseng, Coherent Plasma Oscillations in Bulk Semiconductors, *Phys. Rev. Lett.* **74**(21), 4273–4276 (1995).
- [21] R. Kersting, K. Unterrainer, G. Strasser, H. Kauffmann, E. Gornik, Few-Cycle THz Emission from Cold Plasma Oscillations, *Physical Review Letters* **79**(16), 3038–3041 (1997).
- [22] H. Ito, S. Kodama, Y. Muramoto, T. Furuta, T. Nagatsuma, T. Ishibashi, High-speed and high-output inp-ingaas unitraveling-carrier photodiodes, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **10**(4), 709–727 (2004).
- [23] S. Preu, F. Renner, S. Malzer, G. Dohler, L. Wang, M. Hanson, A. Gossard, T. Wilkinson, E. Brown, G. Doohler, Efficient terahertz emission from ballistic transport enhanced nipnip superlattice photomixers, *Applied physics letters* **90**(21), 212115–212500 (2007).
- [24] T. Löffler, M. Kreß, M. Thomson, T. Hahn, N. Hasegawa, H. G. Roskos, Comparative performance of terahertz emitters in amplifier-laser-based systems, *Semiconductor Science and Technology* **20**(7), S134–S141 (2005).
- [25] R. Venckevičius, *Ekperimentinis heterosandūrinio GaAs/AlGaAs impulsinio terahercinės spinduliuotės emiterio tyrimas*, Magistro studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas (2011).
- [26] J. Feldmann, K. Leo, J. Shah, D. A. B. Miller, J. E. Cunningham, T. Meier, G. von Plessen, A. Schulze, P. Thomas, S. Schmitt-Rink, Optical investigation of Bloch oscillations in a semiconductor superlattice, *Physical Review B* **46**(11), 7252–7255 (1992).
- [27] C. Waschke, H. Roskos, R. Schwedler, K. Leo, H. Kurz, K. Köhler, Coherent submillimeter-wave emission from Bloch oscillations in a semiconductor superlattice., *Physical review letters* **70**(21), 3319–3322 (1993).
- [28] P. Leisching, P. Haring Bolivar, W. Beck, Y. Dhaibi, F. Brüggemann, R. Schwedler, H. Kurz, K. Leo, K. Köhler, Bloch oscillations of excitonic wave packets in semiconductor superlattices, *Physical Review B* **50**(19), 14389–14404 (1994).

- [29] G. Valušis, V. G. Lyssenko, M. Sūdžius, F. Löser, T. Hasche, K. Leo, K. Köhler, Dynamics of Bloch Oscillations: Influence of Excitation Conditions, *Physica Scripta* **T79**(1), 183 (1999).
- [30] M. Dignam, J. Sipe, Exciton Stark ladder in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs superlattices., *Physical review letters* **64**(15), 1797–1800 (1990).
- [31] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho, Quantum cascade laser, *Science* **264**(5158), 553–556 (1994).
- [32] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, a. G. Davies, D. a. Ritchie, R. C. Iotti, F. Rossi, Terahertz semiconductor-heterostructure laser., *Nature* **417**(6885), 156–159 (2002).
- [33] A. Wacker, Lasers: Coexistence of gain and absorption, *Nature Physics* **3**(5), 298–299 (2007).
- [34] S. A. Ktitorov, G. S. Simin, S. VY, Bragg reflections and high-frequency conductivity of an electronic solid-state plasma, *SOVIET PHYSICS SOLID STATE, USSR* **13**(8), 1872 (1972).
- [35] A. A. Ignatov, Y. A. Romanov, Nonlinear Electromagnetic Properties of Semiconductors with a Superlattice, *physica status solidi (b)* **73**(1), 327–333 (1976).
- [36] A. Ignatov, K. Renk, E. Dodin, Esaki-Tsu superlattice oscillator: Josephson-like dynamics of carriers., *Physical review letters* **70**(13), 1996–1999 (1993).
- [37] N. Sekine, K. Hirakawa, Dispersive terahertz gain of a nonclassical oscillator: BLOCH oscillation in semiconductor superlattices., *Physical review letters* **94**(5), 057408 (2005).
- [38] P. G. Savvidis, B. Kolasa, G. Lee, S. J. Allen, Resonant crossover of terahertz loss to the gain of a Bloch oscillating InAs/AlSb superlattice., *Physical review letters* **92**(19), 196802 (2004).
- [39] R. Terazzi, T. Gresch, M. Giovannini, N. Hoyler, N. Sekine, J. Faist, Bloch gain in quantum cascade lasers, *Nature Physics* **3**(5), 329–333 (2007).

- [40] A. Lisauskas, C. Blöser, R. Sachs, H. G. Roskos, A. Juozapavičius, G. Valušis, K. Köhler, Time-resolved photocurrent spectroscopy of the evolution of the electric field in optically excited superlattices and the prospects for Bloch gain, *Applied Physics Letters* **86**(10), 102103 (2005).
- [41] J. McGroddy, P. Guéret, Dynamic bulk negative differential conductivity in semiconductors, *Solid-State Electronics* **14**(12), 1219–1224 (1971).
- [42] H. Kroemer, Theory of the Gunn effect, *Proc. IEEE* **52**, 1736 (1964).
- [43] B. K. Ridley, T. B. Watkins, The Possibility of Negative Resistance Effects in Semiconductors, *Proceedings of the Physical Society* **78**(2), 293–304 (1961).
- [44] C. Hilsum, Transferred Electron Amplifiers and Oscillators, *Proceedings of the IRE* **50**(2), 185–189 (1962).
- [45] W. Shockley, Negative Resistance Arising from Transit Time in Semiconductor Diodes, *Bell System Technical Journal* **33**(4), 799–826 (1954).
- [46] H. W. Thim, M. R. Barber, B. W. Hakki, S. Knight, M. Uenohara, Microwave amplification in a dc-biased bulk semiconductor, *Applied Physics Letters* **7**(6), 167 (1965).
- [47] S. N. F. Mott, R. W. Gurney, *Electronic processes in ionic crystals* (Clarendon Press, 1948).
- [48] S. P. Yu, W. Tantraporn, J. D. Young, Transit-time negative conductance in GaAs bulk-effect diodes, *Electron Devices, IEEE Transactions on* **18**(2), 88–93 (1971).
- [49] D. Dascălu, Small-signal theory of unipolar injection currents in solids, *IEEE Transactions on Electron Devices* **19**(12), 1239–1251 (1972).
- [50] T. Hariu, S. Ono, Y. Shibata, Wideband performance of the injection-limited Gunn diode, *Electronics Letters* **6**(21), 666 (1970).

- [51] R. Dean, A practical technique for controlling field profile in thin layers of n-GaAs, *IEEE Transactions on Electron Devices* **19**(11), 1144–1148 (1972).
- [52] D. Dascălu, *Transit-time Effects in Unipolar Solid-state Devices* (Taylor & Francis Group, 1974).
- [53] H. Kroemer, The Gunn effect under imperfect cathode boundary conditions, *IEEE Transactions on Electron Devices* **15**(11), 819–837 (1968).
- [54] T. Hyart, A. V. Shorokhov, K. N. Alekseev, Theory of parametric amplification in superlattices., *Physical review letters* **98**(22), 220404 (2007).
- [55] T. Hyart, N. V. Alexeeva, J. Mattas, K. N. Alekseev, Terahertz Bloch oscillator with a modulated bias., *Physical review letters* **102**(14), 140405 (2009).
- [56] D. McCumber, A. Chynoweth, Theory of negative-conductance amplification and of Gunn instabilities in "two-valley" semiconductors, *IEEE Transactions on Electron Devices* **ED-13**(1), 4–21 (1966).
- [57] H. Zetsche, Stability criterion for Gunn diodes with injection-limiting cathodes, *IEEE Transactions on Electron Devices* **21**(2), 142–146 (1974).
- [58] N. Demarina, A. Lisauskas, H. Roskos, Electron ensemble coherence and terahertz radiation amplification in a cascade superlattice structure, *Microelectronics Journal* **39**(3-4), 624–627 (2008).
- [59] S.-H. Ding, Q. Li, R. Yao, Q. Wang, High-resolution terahertz reflective imaging and image restoration., *Applied optics* **49**(36), 6834–9 (2010).
- [60] M. I. Amanti, G. Scalari, M. Beck, J. Faist, Stand-alone system for high-resolution, real-time terahertz imaging., *Optics express* **20**(3), 2772–8 (2012).
- [61] H. Richter, M. Greiner-Bär, S. G. Pavlov, A. D. Semenov, M. Wienold, L. Schrottke, M. Giehler, R. Hey, H. T. Grahn, H.-W. Hübers,

- A compact, continuous-wave terahertz source based on a quantum-cascade laser and a miniature cryocooler., *Optics express* **18**(10), 10177–87 (2010).
- [62] M. C. Kemp, Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy - A Bridge Too Far?, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **1**(1), 282–292 (2011).
- [63] Q. Y. Lu, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, M. Razeghi, High performance terahertz quantum cascade laser sources based on intracavity difference frequency generation., *Optics express* **21**(1), 968–73 (2013).
- [64] K. Vijayraghavan, R. W. Adams, A. Vizbaras, M. Jang, C. Grasse, G. Boehm, M. C. Amann, M. A. Belkin, Terahertz sources based on Čerenkov difference-frequency generation in quantum cascade lasers, *Applied Physics Letters* **100**(25), 251104 (2012).
- [65] A. J. L. Adam, I. Kašalynas, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, J. R. Gao, E. E. Orlova, B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J. L. Reno, Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions, *Applied Physics Letters* **88**(15), 151105 (2006).
- [66] N. Yu, R. Blanchard, S. Member, J. Fan, Q. J. Wang, C. Pfl, L. Diehl, T. Edamura, S. Furuta, M. Yamanishi, L. Fellow, H. Kan, F. Capasso, C. Pflugl, Plasmonics for Laser Beam Shaping, *IEEE Transactions on Nanotechnology* **9**(1), 11–29 (2010).
- [67] A. W. Lee, Q. Hu, Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array, *Optics Letters* **30**(19), 2563 (2005).
- [68] Q. Li, S.-H. Ding, R. Yao, Q. Wang, Real-time terahertz scanning imaging by use of a pyroelectric array camera and image denoising., *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision* **27**(11), 2381–6 (2010).
- [69] C. B. Arnold, A. Piqué, Laser direct-write processing, *MRS bulletin* **32**(01), 9–15 (2007).

- [70] A. Vorobyev, C. Guo, Direct creation of black silicon using femtosecond laser pulses, *Applied Surface Science* **257**(16), 7291–7294 (2011).
- [71] W. Steen, K. G. Watkins, J. Mazumder, *Laser material processing* (Springer Science & Business Media, 2010).
- [72] P. Jepsen, D. Cooke, M. Koch, Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications [Laser Photon. Rev. 5, No. 124-166 (2011)], *Laser & Photonics Reviews* **6**(3), 418–418 (2012).
- [73] Riken medžiagų THz spektrų duomenų bazė, prieiga internete <http://www.riken.jp/THzdatabase/>, žiūrėta 2016-03-20.
- [74] X.-C. Zhang, J. Xu, *Introduction to THz wave photonics* (Springer, 2010).
- [75] T. Trzcinski, N. Palka, M. Szustakowski, THz spectroscopy of explosive-related simulants and oxidizers, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* **59**(4), 445–447 (2012).
- [76] Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa, H. Minamide, Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging, *Applied Physics Letters* **83**(4), 800 (2003).
- [77] B. Hu, M. Nuss, Imaging with terahertz waves, *Optics letters* **20**(16), 1716–1718 (1995).
- [78] V. Pačebutas, A. Bičiūnas, S. Balakauskas, A. Krotkus, G. Andriukaitis, D. Lorenc, A. Pugžlys, A. Baltuška, Terahertz time-domain-spectroscopy system based on femtosecond yb: fiber laser and gabias photoconducting components, *Appl. Phys. Lett* **97**(3), 031111 (2010).
- [79] I. Kašalynas, A. Adam, T. Klaassen, J. Hovenier, G. Pandraud, V. Jordanov, P. Sarro, Design and performance of a room-temperature terahertz detection array for real-time imaging, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **14**(2), 363–369 (2008).
- [80] D. P. Neikirk, D. B. Rutledge, Air-bridge microbolometer for far-infrared detection, *Applied Physics Letters* **44**(2), 153–155 (1984).

- [81] E. Ojefors, U. R. Pfeiffer, A. Lisauskas, H. G. Roskos, A 0.65 thz focal-plane array in a quarter-micron cmos process technology, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **44**(7), 1968–1976 (2009).
- [82] T. Yasui, A. Nishimura, T. Suzuki, K. Nakayama, S. Okajima, Detection system operating at up to 7thz using quasioptics and schottky barrier diodes, *Review of Scientific Instruments* **77**(6), 066102 (2006).
- [83] B. Fischer, M. Hoffmann, H. Helm, G. Modjesch, P. U. Jepsen, Chemical recognition in terahertz time-domain spectroscopy and imaging, *Semiconductor Science and Technology* **20**(7), S246–S253 (2005).
- [84] M. J. Golay, A pneumatic infra-red detector, *Review of Scientific Instruments* **18**(5), 357–362 (1947).
- [85] Kompanijos "QMC Instruments" internetinis puslapis, prieiga internete <http://www.terahertz.co.uk>, žiūrėta 2016-03-20.
- [86] Kompanijos "Gentec-EO" internetinis puslapis, prieiga internete <https://www.gentec-eo.com/products/thz-detectors/THZ-B>, žiūrėta 2016-03-20.
- [87] J. Oden, J. Meilhan, J. Lalanne-Dera, J.-F. Roux, F. Garet, J.-L. Coutaz, F. Simoens, Imaging of broadband terahertz beams using an array of antenna-coupled microbolometers operating at room temperature, *Opt. Express* **21**(4), 4817–4825 (2013).
- [88] H. Röser, H. Hübers, T. Crowe, W. Peatman, Nanostructure gaas schottky diodes for far-infrared heterodyne receivers, *Infrared Physics & Technology* **35**(2), 451–462 (1994).
- [89] L. Liu, J. Hesler, H. Xu, A. Lichtenberger, R. Weikle, A broadband quasi-optical terahertz detector utilizing a zero bias schottky diode, *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* **20**(9), 504–506 (2010).
- [90] M. Dyakonov, M. Shur, Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid, *Electron Devices, IEEE Transactions on* **43**(3), 380–387 (1996).

- [91] W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, M. S. Shur, Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors, *Applied Physics Letters* **81**(24), 4637–4639 (2002).
- [92] W. Knap, M. Dyakonov, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, J. Łusakowski, K. Karpierz, M. Sakowicz, G. Valusis, D. Seliuta, I. Kasalynas, A. El Fatimy, Y. M. Meziani, T. Otsuji, Field effect transistors for terahertz detection: Physics and first imaging applications, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **30**(12), 1319–1337 (2009).
- [93] F. Schuster, D. Coquillat, H. Videlier, M. Sakowicz, F. Teppe, L. Dusopt, B. Giffard, T. Skotnicki, W. Knap, Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon cmos detectors, *Opt. Express* **19**(8), 7827–7832 (2011).
- [94] R. Chakkittakandy, J. A. Corver, P. C. Planken, Quasi-near field terahertz generation and detection, *Optics Express* **16**(17), 12794 (2008).
- [95] D. Seliuta, E. Širmulis, V. Tamošiūnas, S. Balakauskas, S. Ašmontas, A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, G. Valušis, A. Lisauskas, H. Roskos, K. Köhler, Detection of terahertz/sub-terahertz radiation by asymmetrically-shaped 2DEG layers, *Electronics Letters* **40**(10), 631 (2004).
- [96] A. Juozapavičius, L. Ardaravičius, A. Sužiedėlis, A. Kozič, J. Gradauskas, J. Kundrotas, D. Seliuta, E. Širmulis, S. Ašmontas, G. Valušis, H. G. Roskos, K. Köhler, Microwave sensor based on modulation-doped GaAs/AlGaAs structure, *Semiconductor Science and Technology* **19**(4), S436–S439 (2004).
- [97] D. Seliuta, I. Kašalynas, V. Tamošiūnas, S. Balakauskas, Z. Martūnas, S. Ašmontas, G. Valušis, A. Lisauskas, H. Roskos, K. Köhler, Silicon lens-coupled bow-tie InGaAs-based broadband terahertz sensor operating at room temperature, *Electronics Letters* **42**(14), 825 (2006).

- [98] I. Kašalynas, D. Seliuta, R. Simniškis, V. Tamošiūnas, K. Köhler, G. Valušis, Terahertz imaging with bow-tie InGaAs-based diode with broken symmetry, *Electronics Letters* **45**(16), 833 (2009).
- [99] A. Suziedelis, J. Gradauskas, S. Asmontas, G. Valusis, H. Roskos, Giga-and terahertz frequency band detector based on an asymmetrically necked n-n+-gaas planar structure, *Journal of applied physics* **93**(5), 3034–3038 (2003).
- [100] A. Lisauskas, M. Bauer, S. Boppel, M. Mundt, B. Khamaisi, E. Socher, R. Venckevičius, L. Minkevičius, I. Kašalynas, D. Seliuta, G. Valušis, V. Krozer, H. G. Roskos, Exploration of Terahertz Imaging with Silicon MOSFETs, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**(1), 63–80 (2014).
- [101] P. R. Smith, D. H. Auston, M. C. Nuss, Subpicosecond photoconducting dipole antennas, *Quantum Electronics, IEEE Journal of* **24**(2), 255–260 (1988).
- [102] N. Katzenellenbogen, D. Grischkowsky, Efficient generation of 380 fs pulses of thz radiation by ultrafast laser pulse excitation of a biased metal-semiconductor interface, *Applied Physics Letters* **58**(3), 222–224 (1991).
- [103] A. Krotkus, Semiconductors for terahertz photonics applications, *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**(27), 273001 (2010).
- [104] J. Trontelj, A. Sešek, Micro-machined millimeter wave sensor array for fm radar application, in *SPIE Security+ Defence* (International Society for Optics and Photonics, 2012), 85440G–85440G.
- [105] A. Seseek, J. Trontelj, M. Macek, A detection system and a method of making a detection system, gB Patent 2513170(A) (2014).