

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Lukas Povilaitis

FOTOLAIDŽIŲ TERAHERCINIŲ ANTENŲ KONTAKTŲ KONFIGŪRACIJŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Lukas Povilaitis

Leista gintis

2023.05.26

Darbo vadovas

Dr. Ignas Nevinskas

Lazerinių tyrimo Centro direktorė

Dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2023

Turinys

1. Įvadas	3
2. Literatūros apžvalga.....	5
2.1. Terahercinė spinduliuotė elektromagnetiniame spektre	5
2.2. Terahercinės spinduliuotės taikymai	6
2.3. Su pagreičiu judantis krūvis.....	6
2.4. Fotolaidžios antenos	8
2.4.1. THz emisija ir detekcija	8
2.4.2. Kontaktų konfigūracijos.....	12
2.5. Fotojautrūs puslaidininkiai	16
2.6. Šotki barjeras ir ominis kontaktas.....	17
3. Eksperimentų metodika ir aparatūra	18
3.1. THz - TDS stendas.....	18
3.2. THz interferometrijos stendas.....	18
3.3. THz spinduliuotės pluošto matavimų stendas	19
4. Eksperimento rezultatai	20
4.1. THz - TDS tyrimo matavimai.....	20
4.2. THz spinduliuotės galios matavimai, kintant pridėtinės įtampos sukurtam elektriniam laukui	22
4.3. Terahercinės spinduliuotės pluošto matavimai.....	23
4.4. THz interferometrijos matavimai	24
4.5. Elektrinio lauko linijų pasiskirstymo modeliavimas	26
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	27
Literatūra.....	28

1. Įvadas

Terahercinės spinduliuotės diapazonas laikomas nuo 0.1 THz iki 10 THz [1], atitinkamai bangos ilgis nuo 3 mm iki 30 μm . Žemesni dažniai priskiriami mikrobangoms, aukštesni – infraraudonajai spinduliuotei. Ilgą laiką terahercinė spinduliuotė buvo mažai naudojama tiek moksliniuose tyrimuose, tiek praktiniame panaudojime todėl, kad nebuvo gerų terahercinių šaltinių, nei tinkamų detektorių. Susidomėjimas terahercinių dažnių sritimi išaugo 1990 metais – atlikta daug tyrimų, bandant pagerinti terahercinės spinduliuotės efektyvumą. Sparčią pažangą šioje srityje daugiausia lėmė fotonikos pažanga, kurios dėka atsirado efektyvesni terahercinių bangų aptikimo ir generavimo sprendimai. Ši pažanga sustiprino motyvaciją toliau dėti pastangas siekiant išgauti kuo geresnius terahercinių dažnių generavimo parametrus, kas leistų dar labiau atverti plačią jų pritaikymo sritį. Nors iki šios dienos per paskutinius trisdešimt metų padaryta pažanga yra labai didelė, šiai dienai plačiai naudoti terahercines bangas praktiniam pritaikymui vis dar trukdo pakankamai efektyvių terahercinių emiterių nebuvimas.

Šiame darbe tyrinėsime paviršines fotolaidžias antenas- pridėtines įtampos kontaktų konfigūracijos įtaką sukuriamam elektriniam laukui bei terahercinio spinduliavimo našumui, taip pat ištirsime naują, dar netyrinėtą žematemperatūrio galio arsenido emiterį, kurio kontaktai yra ne ant fotolaidininko paviršiau, o įleisti į jį. Tyrimams naudosime terahercinės laikinės spektroskopijos metodą, terahercinę interferometriją.

Tikslas

Charakterizuoti emituojančios LT-GaAs fotolaidžios antenos su įleistais kontaktais THz spinduliuotės intensyvumą, spektrą ir pluošto parametrus, bei palyginti šiuos su įprastine koplanarine THz antena.

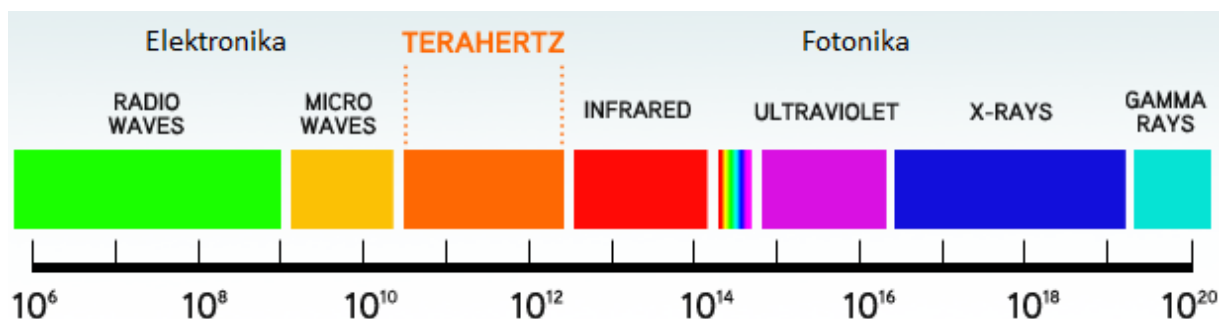
Uždaviniai

1. Surinkti terahercinės spinduliuotės laikinės skyros spektroskopijos standą (angl. Terahertz Time-Domain Spectroscopy).
2. Su THz-TDS stendu ištirti emituojamus THz antenų impulsus bei jų spektrus esant skirtingai pridėtinei įtampai, kai THz emiterio kontaktai įleisti ir paviršiniai, palyginti gautus rezultatus.
3. Sumodeliuoti teorines elektrinio lauko pasiskirstymo linijas abiem atvejais- kai kontaktai įleisti ir kai paviršiniai.
4. Atlikti emituojamos terahercinės spinduliuotės pluošto matavimus.

2. Literatūros apžvalga

2.1. Terahercinė spinduliuotė elektromagnetiniame spektre

Elektromagnetinių bangų spektras yra labai platus ir skirtingi jų parametrai, tokie kaip bangos ilgis, dažnis ar intensyvumas, gali būti panaudojami skirtingiems tikslams. Nuo šių parametru priklauso medžiagos, kurią veikiame spinduliuote, sugertis (skverbti), be to, ir skirtingas medžiagos atsakas į skirtingus bangos ilgius. Pavyzdžiui, vieno bangos ilgio bangas medžiaga gali sugerti, kito ne. Šiuo metu gebama sugeneruoti labai įvairaus bangos ilgio elektromagnetines bangas. Didesnė problema yra kai kurių dažnių generavimo naudingumo koeficientas, ypač terahercinių (0,1-10 THz), kuris tesiekia procento dalis. Elektriškai generuojant tokių dažnių bangas sudėtinga dėl to, nes tai per dideli dažniai, o optiškai- per maži. Todėl juos sugeneruoti su dideliu naudingumu yra iššūkis. Pavyzdžiui, sparčiausi šiuo metu tranzistoriai geba keisti savo būseną apie 800 GHz dažniu [2], tačiau tai tik prototipai, kurie realiam panaudojimui dar nepritaikomi. Taip pat, tokių dažnių generavimas ypatingas tuo, kad ši sritis atsiduria tarp elektronikos ir optikos, kadangi į žemesnių dažnių sritį patenka elektroniškai sugeneruoti dažniai, o didesnių dažnių sritį optiniam diapazonui priskiriami dažniai. Elektromagnetinių bangų spektras pavaizduotas 1 pav:



1 pav. Elektromagnetinių bangų spektras.

Kaip matome, mūsų generuojami dažniai yra nematomi žmogaus akiai.

Šiuo metu labiausiai paplitęs būdas žadinti terahercinę spinduliuotę, yra pasitelkiant femtosekundinius lazerio impulsus, kuriais apšviečiamas puslaidininkių paviršius ir indukuojama ultrasparta fotosrovė, taip pat terahercinės antenos, kurios gali būti kaupinamos šviesolaidiniu lazeriu.

2.2. Terahercinės spinduliuotės taikymai

Terahercinė spinduliuotė gali lengvai prasiskverbti į daugelį medžiagų, tokių kaip popierius, plastikas, tekstilė ar putplastis. Nors terahercinių bangų slopinimas terpėje dažnai yra stipresnis nei mikrobangų, vaizdo gylis yra labiau ribojamas. Kita vertus, trumpesni bangos ilgiai leidžia išgauti didesnę erdvinę skiriamąją gebą. Kitaip nei rentgeno spinduliai, terahercinių impulsų fotonų energija yra per maža ir nejonizuojanti, todėl yra saugi [3]. Nepaisant to, tiek oro molekulės, tiek vandens garai stipriai sugeria terahercinę spinduliuotę [4]. Tai yra vienas iš ribojančių veiksnių, mažinantis terahercinių dažnių pritaikymą.

Terahercinės spinduliuotės skenavimas gali būti pritaikomas neardomajai medžiagų kontrolei. Pavyzdžiui, kosminis laivas „Columbia“ 2003 m. patyrė baisią avariją, kurios priežastis siejama su paslėptais putplasčio medžiagos pažeidimais [5]. Panaudojus terahercinės spinduliuotės skenavimą, būtų galima tam tikras kosminio laivo dalis nuskenuoti ir rasti defektus jų neardant. Taip pat, ne retai pasitaiko atveju, kai lėktuvas gauna žaibo išlydį. Įsivertinti, ar tai padarė žalos, kartais gali būti sunku, kadangi iš išorės lėktuvas gali atrodyti sveikas, tačiau vidus - pažeistas, juo labiau, kad lėktuvo dalims gaminti naudojamos sudėtingos medžiagų kompozicijos, norint išgauti reikalingas savybes, tokias kaip lengvumas ir stiprumas. [6].

Kitas pritaikymas yra lėktuvo keleivių saugumo patikrinimas- ginklų ir sprogmenų, paslėptų po drabužiais, aptikimas [7], [3].

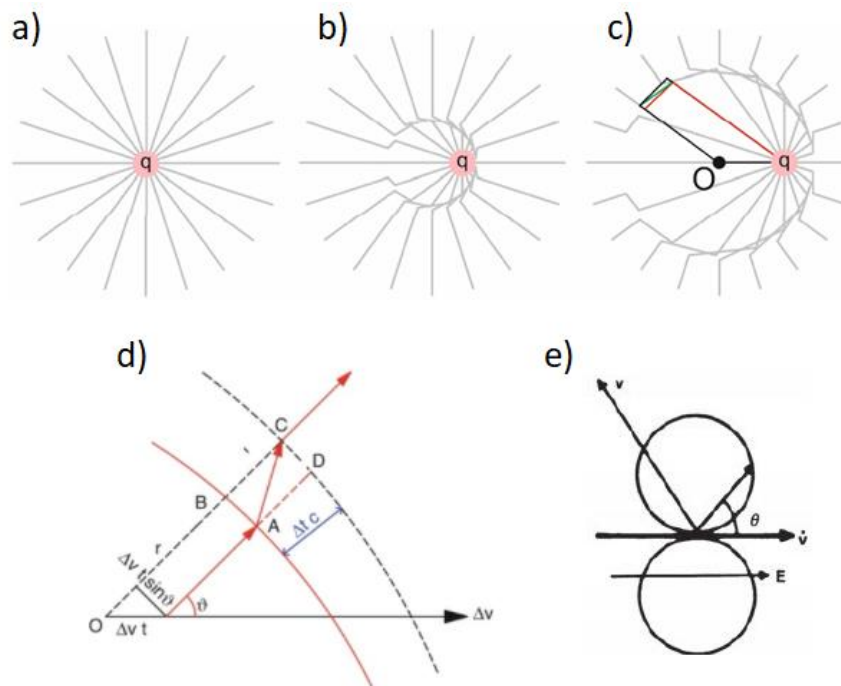
Bevielės informacijos perdavimas. Terahercinę spinduliuotę kabeliais perduoti sunku dėl didelio slopinimo, tam naudojami brangesni mikrostruktūriniai tuščios šerdies šviesolaidžiai [8]. Tačiau ji daug paprasčiau sklinda ore, nereikia brangių perdavimo linijų, todėl tinka bevielėms komunikacijoms [9]. Difrakcija yra silpnesnė nei mikrobangų srityje, todėl gali susidaryti kolimuoti pluoštai su mažesniu plėtimusi.

Medicina - taip pat viena iš terahercinės spinduliuotės pritaikymo sričių. Ją galima pritaikyti DNR sekos tyrimams, vėžinių audinių atpažinimui, baltyminių struktūrinių būsenų stebėjimui, dantų ėduonies ankstyvam nustatymui [10].

2.3. Su pagreičiu judantis krūvis

Kai krūvininkas yra stacionarioje būsenoje, jis aplink save generuoja elektrinį lauką. Elektronui judant, atsiranda srovė. Ši srovė yra konstanta, kadangi elektronas juda nekintančiu greičiu. Kai krūvininkas juda su pagreičiu, jis suvirpina elektromagnetinį lauką. Maksvelo

lygtimis galima apskaičiuoti elektrinių ir magnetinių laukų potencialus taške, nutolusiame tam tikru atstumu nuo šaltinio. Tačiau J.J. Thomsonas pateikia paprastesnį vaizdą apie elektromagnetinės spinduliuotės kilmę, o rezultatai sutampa su Maksvelo lygčių rezultatais.



2 pav. a), b) ir c) parodyta, kas vyksta su elektrinio lauko linijomis skirtingais laiko momentais, d) – reikalingi dydžiai, norint rasti elektrinio lauko stiprumą taške C, e) – su pagreičiu judančio krūvininko sklaidžiamos spinduliuotės polinė diagrama [11].

Laikant, jog krūvininko greičio pokytis Δv laiko intervale Δt yra mažas, lyginant su šviesos greičiu c , galime daryti prielaidą, kad lauko linijos yra spindulinės po laiko Δt . Krūvininko elektrinio lauko linijos pradiniu laiko momentu, lyginant po tam tikro laiko, yra sutrikdytos. Šis sutrikdymas išspinduliuojamas elektromagnetiniu impulsu. Elektrinis laukas, išspinduliuotas su pagreičiu judančio krūvio, gali būti rastas iš geometrijos. Iš stačiakampio kraštinių santykių dydžių galima pastebėti, kad nuo kampo priklausomas sutrikdytas elektrinis laukas E_0 yra spinduliuojamas dipolio impulsas. Šis dipolio aproksimavimas nereliatyvistiniu atveju, pavyzdžiui, THz spinduliuavimui iš puslaidininkių paviršių, yra paprasčiausias modelis įvertinti spinduliuotei ir suteikia kokybinį spinduliuotės reiškinių aprašymą. Verta atkreipti dėmesį į tai, jog intensyviausia spinduliuotė yra ta kryptimi, kuri yra statmena krūvininko judėjimo krypčiai [12].

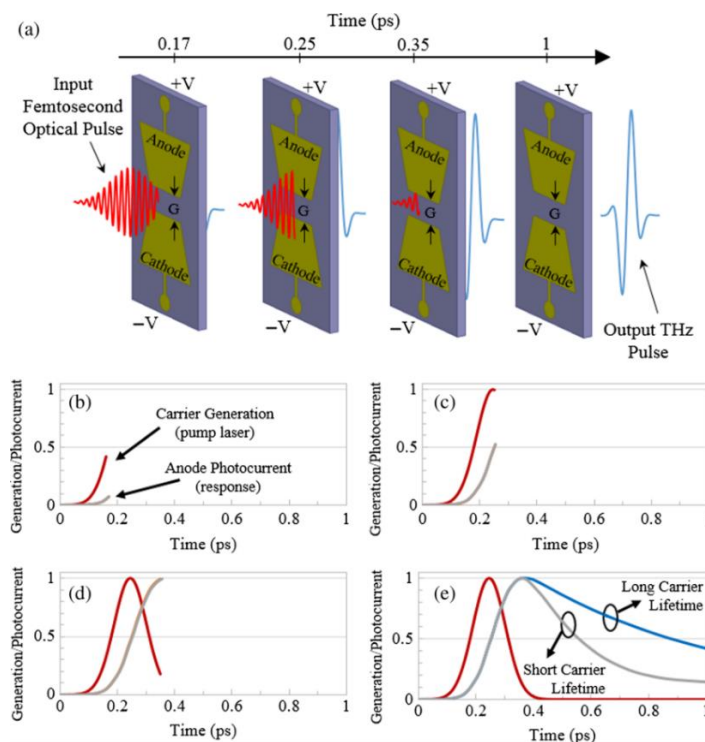
2.4. Fotolaidžios antenos

2.4.1. THz emisija ir detekcija

Terahercinės fotolaidžios antenos yra vieni labiausiai žadančių įrenginių, kurie padėtų panaudoti unikalias terahercinės dažnių juostos savybes apsaugos sistemose, medicinoje, biologijoje, medžiagų spektroskopijoje, jutikliuose, farmacijoje, taip pat ir ultrasparčiame duomenų perdavime [13], [14]. Nepaisant visų terahercinės spinduliuotės privalumų, plačiam jų panaudojimui trukdo efektyvių, kompaktiškų ir energiją taupančių terahercinių šaltinių, veikiančių kambario temperatūroje, nebuvimas [14]. Dėl šios priežasties tyrinėjamos įvairios antenų kontaktų konfigūracijos, taip pat ir medžiagos, siekiant išgauti kuo geresnes antenų savybes.

Pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos vertinama fotolaidi antena, yra signalas- triukšmas santykis, terahercinio impulso intensyvumas, terahercinio impulso spektro plotis (angl. Bandwidth) ir optinio žadinančiojo impulso galios santykis su sugeneruoto terahercinio impulso galia, arba kitaip - efektyvumas [15].

Terahercinės spinduliuotės emisija ir detektavimas panaudojant fotolaidžią anteną pirmą kartą buvo atlikti 1983 metais [16]. Tyrimo metu femtosekundinio lazerio, kurio impulso trukmė mažesnė nei 1 ps, pluoštas nukreiptas į terahercinį fotoemiterį, taip kaip pavaizduota 3 paveiksle.:



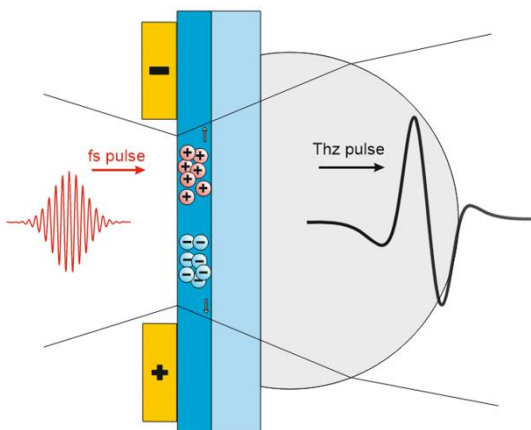
3 pav. THz impulsų generavimas fotolaidžioje antenoje [17].

Fotolaidi antena sudaryta iš fotolaidžios medžiagos (angl. photoconductive substrate), ant kurios uždėti du metaliniai kontaktai, tarp kurių prijungta pridėtinė įtampa. Optinis impulsas nukreipiamas į tarpą tarp kontaktų, kuris plinta į fotolaidžią medžiagą, kurioje yra sugeriamas, tuo metu sugeneruojantis fotokrūvininkus. Sugeneruoti fotokrūvininkai įgreitinami ant kontaktų prijungtos pridėtinės įtampos elektrinio lauko pagalba. Dėl fotokrūvininkų judėjimo su pagreičiu, indukuojamos trumpalaikės fotosrovės, dėl kurių krūvininkai išspinduliuoja terahercinius impulsus [18]. Tai grafiškai atvaizduota trečio paveikslo (b-e) dalyse. Kai optinis impulsas sugeriamas fotolaidžioje medžiagoje, krūvininkų generacijos laikas proporcingas optinio impulso trukmei (raudona kreivė) [17]. Sugeneruoti fotokrūvininkai, reaguodami į pridėtinį elektrinį lauką, įgreitinami kontaktų kryptimi, indukuodami fotosroves, kurių kilimo laikas (angl. rise time) beveik proporcingas krintančio optinio impulso kilimo laikui (pilka kreivė). Kai pasiekiamas fotosrovės pikas (angl. peak), kreivės kritimas (fotosrovės mažėjimas) nebepriklauso nuo optinio impulso, o nuo fotolaidžios medžiagos elektrinių savybių [17]. Tai parodyta 3 paveikslo (e) dalyje. Fotolaidžioje medžiagoje fotokrūvininkai, sugeneruoti optinio impulso, rekombinuoja per tiek laiko, kokia yra jų krūvininkų gyvavimo trukmė. Tačiau jeigu fotolaidi medžiaga pasižymi ilga krūvininkų gyvavimo trukme, tuomet fotokrūvininkai toliau indukuoja fotosroves, net kai optinis impulsas yra pilnai sugertas. Dėl šios priežasties fotosrovės impulsas tampa platesnis, o tai savo ruožtu sumažina bendrą sugeneruoto terahercinio impulso dažnio spektrą [17]. Kad to išvengti, naudojami fotolaidininkai, kurių krūvininkų gyvavimo trukmė yra maža. Dažniausiai naudojamas žematemperatūris galio arsenidas (LT-GaAs) [19].

Fotolaidžios antenos skirstomos į emiterius ir detektorius. Emiteriai skirti terahercinei spinduliuotei generuoti, detektoriai – detektuoti. Jų sandara labai panaši, esminis skirtumas yra tas, jog emiteriuose metaliniai kontaktai naudojami pridėtinei įtampai sukurti, detektoriuose jie jungiami prie detektavimo elektronikos.

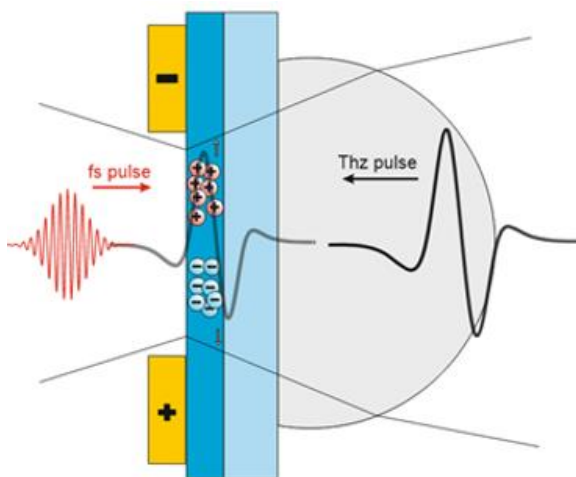
Terahercinio emiterio struktūrinė schema pavaizduota 4 paveiksle. Ją sudaro fotolaidi medžiaga, pridėtinės įtampos kontaktai ir silicio lęšis. Teraherciniai impulsai sugeneruojami tarpe tarp kontaktų, ten kur sugeriamas femtosekundinio lazerio impulsas. Dalis terahercinio impulso sklinda ta pačia kryptimi, kaip ir žadinančios spinduliuotės, silicio lęšio kryptimi, tačiau kita dalis sklinda priešingai. [20]. Silicio lęšis tuomet iš dalies sukolimuoja terahercinius impulsus, kurie nukreipiami į laisvą erdvę, kur vėliau gali būti nukreipti į detektorių ar į tiriamąją medžiagą. Paprastai, kontaktų ilgis svyruoja nuo kelių iki 10 milimetrų, antenos

dipolio atstumas tarp kontaktų apie $100\ \mu\text{m}$, o sritis, apšviečiama optiniu impulsu, nuo kelių iki $100\ \mu\text{m}$ [17].



4 pav. Terahercinis emiteris su kolimuojančiu lęšiu [12].

Terahercinis detektorius pavaizduotas 5 paveiksle. Detektoriuje femtosekundinio impulso pagalba sugeneruotus fotokrūvininkus terahercinis impulsas nukreipia link kontaktų. Terahercinis impulsas hemisferinio silicio lęšio pagalba sukolinuojamas. Terahercinio impulso pikas bus gaunamas, kai terahercinio impulso maksimumas erdvėje persiklos su fotosužadintais krūvininkais detektoriuje. Norint atvaizduoti visą terahercinį impulsą, jį reikia strobuoti, tai reiškia, keisti terahercinio ir optinio impulso padėtį laike vienas kito atžvilgiu. Apie tai plačiau aprašyta laikinės terahercinės spektroskopijos skyriuje.

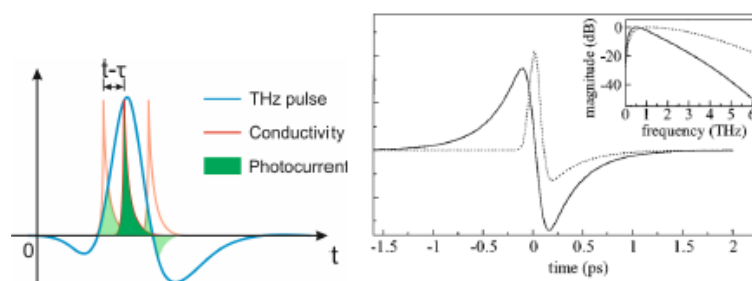


5 pav. Terahercinis detektorius su kolimuojančiu lęšiu [12].

Naudojant terahercinės- laikinės spektroskopijos schemą (15 pav), galima atvaizduoti visą terahercinį impulsą. Femtosekundinio lazerio pluoštas yra padalinamas į dvi šakas. Viena nukreipama į vėlinimo liniją, ir keliauja į detektorių. Detektorius pagamintas iš puslaidininkinės medžiagos, kuri pasižymi trumpa krūvininkų gyvavimo trukme ($< 1\ \text{ps}$), taip

pat jos draustinės energijos juostos tarpas turi būti mažesnis nei apšviečiančio lazerio fotono energija.

Kita lazerio šaka nukreipiama į terahercinį emiterį, kur dėl utragreitų fotosrovių sugeneruojamas kelių pikosenkundžių trukmės terahercinis impulsas, kuris nukreipiamas į detektorius. Padalinto pluošto optiniai keliai turi būti vienodi ir susitikti detektoriuje, kur terahercinio impulso elektrinis laukas ir sugeneruoti laisvi krūvininkai persikloja. Elektrinis terahercinio impulso laukas fotokrūvininkus išjudina atitinkama kryptimi ir taip suindukuoja fotosrovę detektoriuje. Tuomet sinchroninis stiprintuvas šią fotosrovę užregistruoja. Galiausiai, judinant vėlinimo liniją, terahercinio impulso elektrinis laukas strobuojamas fotokrūvininkais detektoriuje. Tokiu būdu gaunamas visas terahercinio impulso vaizdas, o atlikus Furjė transformaciją ir jo spektras:



6 pav. Terahercinio impulso detektavimas (kairėje) bei sugeneruoto ir detektuoto impulso palyginimas (kairėje)

Ši procedūra matematiškai apibūdinama kaip konvoliucijos operacija:

$$E_{THz,reg} \propto I_{det}(t) \propto E_{THz}(t) \otimes n_{det}(t) \quad (1)$$

Kaip matome iš 6 paveikslo, registruotas terahercinis impulsas yra iškraipytas palyginus su sugeneruotu. Kuo ilgesnė laisvųjų krūvininkų trukmė, tuo registruotas terahercinis impulsas gaunamas stipriau išsklaidytas laike. Tai atitinkamai susiaurina registruojamą THz impulso spektrą. Idealiu atveju, įsivaizduojant be galo trumpą laisvųjų krūvininkų trukmę, būtų detektuojamas identiškas signalas kaip sugeneruotas. Sumažinti laisvųjų krūvininkų trukmę galima sukūrus defektų paviršiniame sluoksnyje, dėl ko atsirastų daugiau trikdžių krūvininkams judėti. Tačiau sumažinus laisvųjų krūvininkų gyvavimo laiką sumažėtų jų judris ir indukuota fotosrovė. Siekiama užauginti epitaksinį sluoksnį su trumpa krūvininkų gyvavimo trukme ir dideliu judriu.

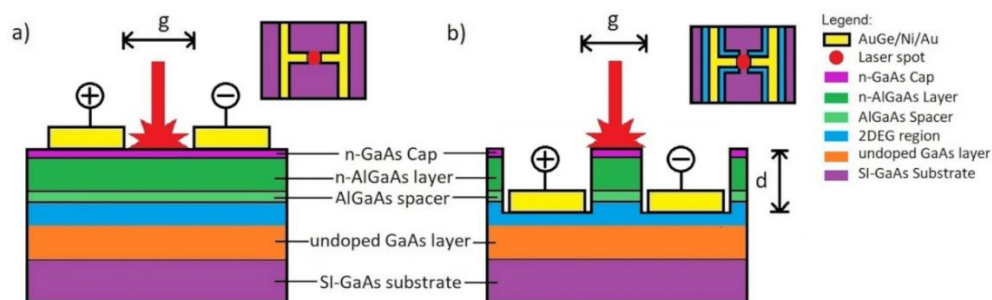
2.4.2. Kontaktų konfigūracijos

Viena iš pagrindinių priežasčių, ribojanti terahercinių antenų technologijų vystymąsi, sotinimasis esant aukštomis optinio žadinimo galioms [21]. Nesant optiniam poveikiui, fotolaidininkas turi fiksuotą krūvininkų koncentraciją N_D ir N_A , kur N_D – donorinės priemaišos krūvininkų koncentracija, o N_A – akceptorinės. Fotolaidininką veikiant optine spinduliute, jame indukuojasi optinių krūvininkų koncentracija (angl. optical carrier concentration), N_{opt} , kuri įtakoja suminę krūvininkų koncentraciją $N_{tot} = N_{D,A} + N_{opt}$ [17]. Medžiagos krūvininkų koncentracijos kitimas proporcingai keičia fotolaidininko elektronines savybes. Kai $N_{opt} \geq N_{D,A}$, atsiranda netiesinis atspindžio didėjimas fotolaidininko paviršiuje (angl. screening effect) [22]. Todėl esant tokiai optiniam galiui, pasiekiamas įsisotinimo taškas, kai didinant optinę galią, terahercinė spinduliuotė nustoja didėti.

Siekiant gauti kuo efektyvesnius terahercinių impulsų generavimo parametrus, yra išbandyta įvairios pridėtinės įtampos kontaktų konfigūracijos [14], [17], [23]. Dėl ant kontaktų prijungtos pridėtinės įtampos kinta elektrinio lauko linijų pasiskirstymas, priklausomai nuo kontaktų parametru, formos, atstumo bei įtampos dydžio. Tai savo ruožtu turi didelės įtakos terahercinės emisijos kryptį, efektyvumui, spektrui ir terahercinio impulso galiui. Todėl visada svarbus pridėtinės įtampos dydis, dėl kurio kinta elektrinio lauko stiprumas, verčiantis krūvininkus judėti su pagreičiu ir išspinduliuoti terahercinius impulsus. Taip pat, pridėtinę įtampą riboja pramušimo tikimybė.

2.4.2.4. Fotolaidžios antenos su įleistais kontaktais

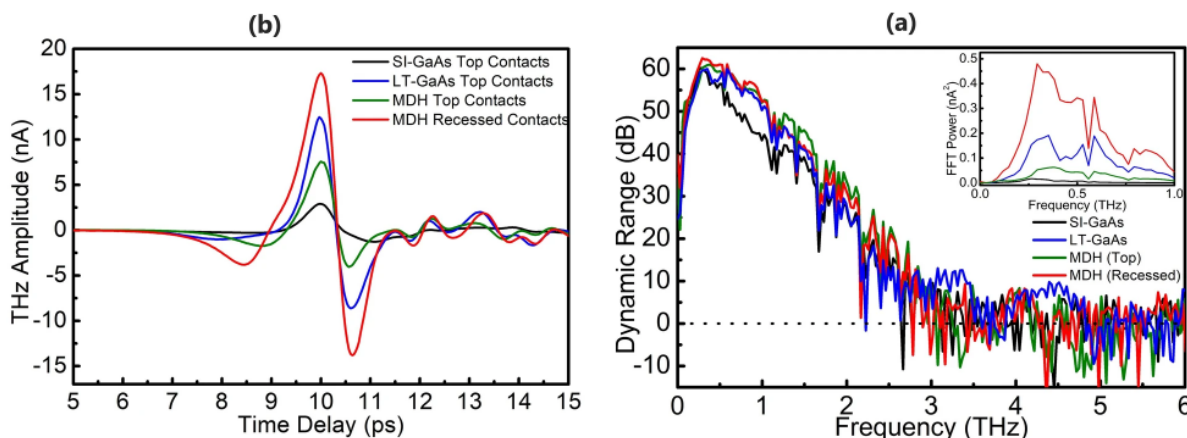
Antenos su įleistais kontaktais- tai tokios, kurių elektrodai ne ant fotolaidininko, o įleisti į jį. Tam tikslui fotolaidininkas paruošiamas išėsdinant griovelius, ir juose metaliniai elektrodai užgaminami (7 pav.).



7 pav. Fotolaidi antena, elektrodai paviršiniai (a) ir fotolaidi antena, kai kontaktai įleisti (b) [24].

Kaip minėta anksčiau, pridėtinė įtampa ant elektrodų sukuria elektrinį lauką, kuris verčia sugeneruotus fotokrūvininkus judėti link kontaktų. Tačiau tiek elektrinio lauko stiprumas, tiek elektrinio lauko linijų pasiskirstymas yra priklausomas nuo kontaktų formos, dydžio bei padėties. Paslinkus elektrodų padėtį į fotolaidininko tūrį, elektrinis laukas pasiskirstys skirtingai, nei tuo atveju, kai elektrodai paviršiniai. Įleistų kontaktų atveju, pridėtinė įtampa ant elektrodų yra efektyvesnė, kadangi sukurtas elektrinis laukas, kuris stipriausias būna tiesia kryptimi tarp kontaktų, tiesiogiai veikia fotolaidų tarpą [24]. Kai kontaktai paviršiniai, stipriausias elektrinio lauko linijos atsiduria nebe puslaidininkyje, o ore.

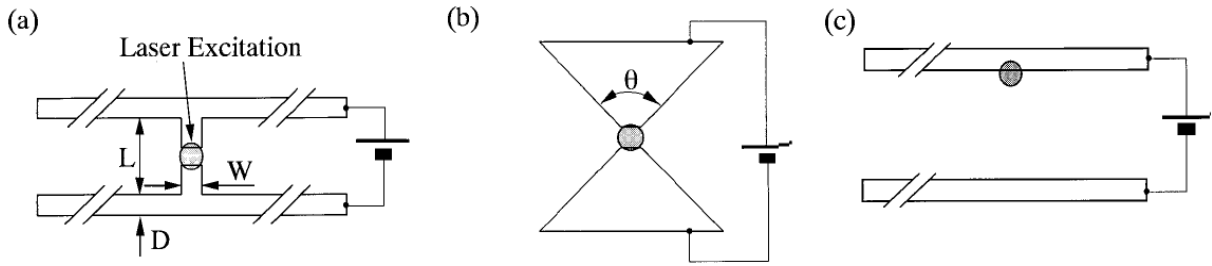
Tyrime buvo ištirtos fotolaidžios antenos keturiais atvejais- kai elektrodai paviršiniai o fotolaidininkas – SI-GaAs bei LT-GaAs, ir kai fotolaidininkas sudarytas iš heterostrukūros, esant paviršinių bei įleistų kontaktų atveju [24]. Kad atvaizduoti visą terahercinį impulsą, buvo panaudota terahercinės - laikinės spektroskopijos sistema. Rezultatai pavaizduoti 9 paveiksle. Juose matosi, jog iš visų minėtų atvejų didžiausia terahercinių impulsų amplitudė buvo pasiekta su heterostrukūrine įleistais elektrodais antena. Taip pat matosi, jog paviršinių žematemperatūrio galio arsenido fotolaidininko elektrodų atveju terahercinė emisija viršijo paviršinės heterostrukūrinės antenos emisiją. Terahercinė emisija įleistų elektrodų heterostrukūrinės antenos atveju visame spektro plotyje (0-6 THz) buvo aukščiausia.



8 pav. Išmatuota THz impulso forma (a), fotolaidžių antenų spektras (b) [24].

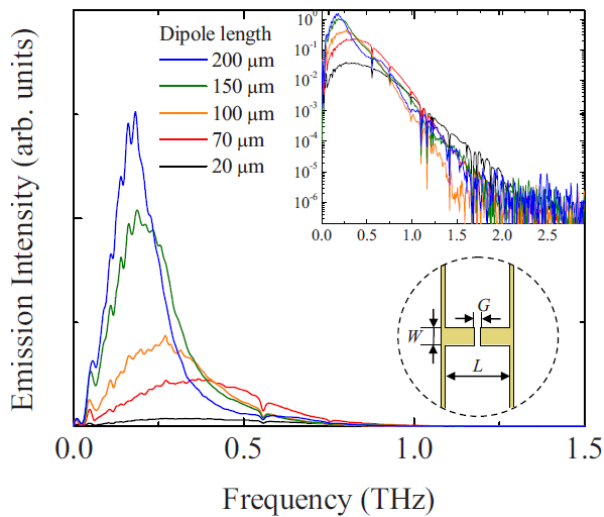
2.4.2.5. Fotolaidžios dipolinės, varlytės formos ir mikrojuostelinės antenos

Priklausomai nuo antenos elektrodų parametrų, kinta ir sugeneruoto terahercinio impulso parametrai. Siekiant optimizuoti antenos dizainą individualiam praktiniam pritaikymui, tai yra vienas iš svarbiausių klausimų [25]. Dipolinė, varlytės formos ir mikrojuostelinės antenos pavaizduotos 10 paveiksle.



9 pav. Dipolinė antena (a), varlytės formos (b) ir mikrojuostelinė (c) [25].

Dipolinės antenos parametrų įtaka plačiau buvo nagrinėta 2010 metais [26]. Fotolaidininkas panaudotas žematemperatūris galio arsenidas. Kai dipolio ilgis didėja, terahercinės spinduliuotės intensyvumas auga. 10 paveiksle pavaizduotas terahercinės emisijos intensyvumas, dipolio ilgiui kintant nuo 20 μm iki 200 μm . Iš rezultatų matosi, jog kai dipolio ilgis buvo didžiausias, buvo gaunama intensyviausia terahercinė spinduliuotė.



10 pav. Terahercinės emisijos spektras, kintant dipolio ilgiui [26]

Tačiau efektyvumas taip pat priklauso ir nuo dipolio ilgio ir pločio santykio:

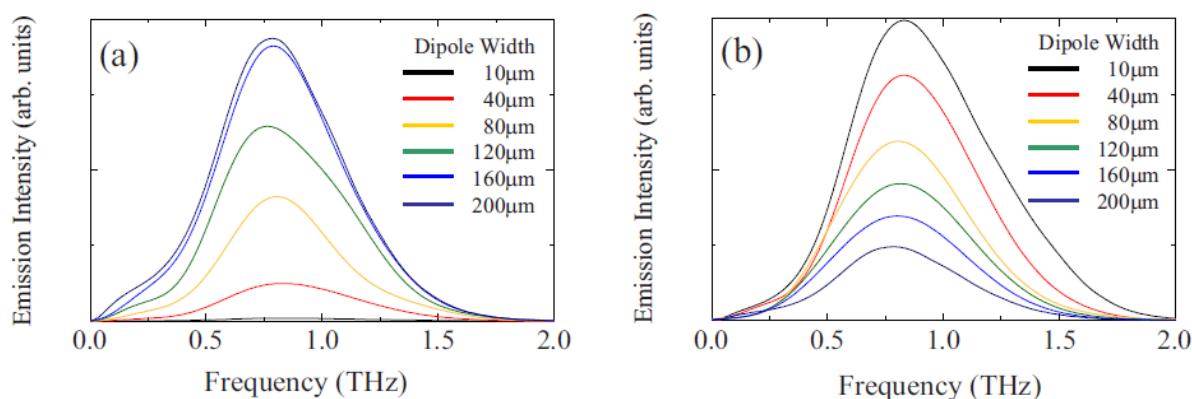
$$n = \frac{L}{W}, (2)$$

čia L – dipolio ilgis, W – dipolio plotis.

Kai dipolio ilgis didėja, terahercinės emisijos pikas juda į žemesnių dažnių sritį [26]. Tačiau tam didelę reikšmę turi ir lazerio impulso parametrai. Kintant lazerio impulso ilgiui, keičiasi ir elektrinio lauko kitimas laike. Tai savo ruožtu turi įtakos terahercinio impulso spektro pločiui – kuo optinio impulso trukmė mažesnė, tuo spektrinis plotis didesnis. Pridėtinio elektrinio lauko linijos pasiskirsto tolygiai per visą dipolio ilgį. Kai dipolio ilgis trumpas, o pridėtinės įtampos kiekis yra konstanta, elektrinio lauko linijų tankis ploto vienetu didesnis – dėl šios priežasties krūvininkai yra stipriau įgreitinami, dėl ko fotokrūvininkų virpėjimai

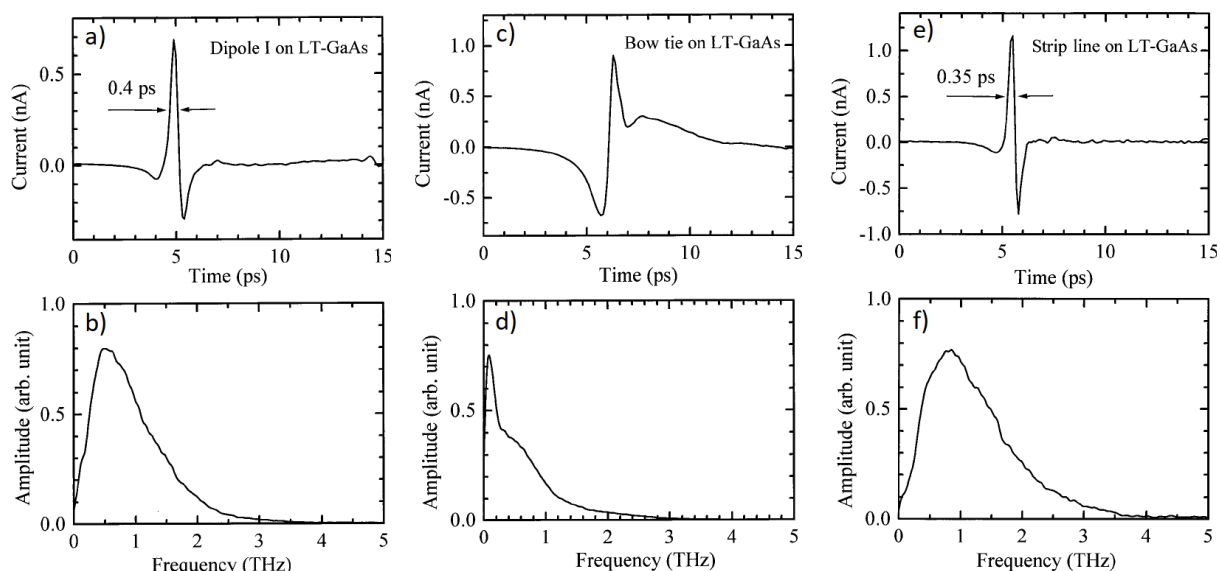
stipresni, ir sugeneruojamas terahercinis impulsas, kurio pikas yra aukštesnių dažnių srityje. Ilgesnio dipolio atveju išvengiama įsisotinimo ir padidinamas aktyvus fotolaidininko plotas. Didesniame plote tos pačios įtampos sugeneruotas pridėtinis elektrinis laukas yra ne toks tankus, dėl ko jis silpniau įgreitina fotokrūvininkus. Tačiau dėl didesnio dipolio ilgio (aktyvios terpės ploto), sugeneruojama daugiau fotokrūvininkų, kurie dėl silpnesnio elektrinio lauko sugeneruoja terahercinį impulsą, kurio dažnių pikas žemesniuose dažniuose.

Kitame tyrime buvo skaičiuojama dipolio pločio įtaka terahercinės emisijos intensyvumui. Plotis buvo keičiamas nuo 10 μm iki 200 μm , kai dipolio ilgis visais atvejais buvo lygus 30 μm . Skaičiavimas buvo atliktas esant dviem atvejais: kai pridėtinė įtampa didinama, didėjant dipolio pločiui (12 pav. a), ir kai pridėtinė įtampa kintant dipolio pločiui vienoda (12 pav. b). Pirmu atveju terahercinės spinduliuotės pikas buvo pasiektas kai dipolio plotis pasiekė 200 μm . Tai reiškia, kad padidint terahercinį spinduliuotės intensyvumą galima didinat dipolio plotį, bet reikia atkreipti dėmesį, jog turi būti pakankamas optinės žadinančios spinduliuotės intensyvumas. Antru atveju, kai optinė spinduliuotė vienoda, tačiau dipolio plotis didėja, terahercinė spinduliuotė mažėja [26]. Tai reiškia, jog terahercinės emisijos efektyvumas mažėja pagal (2) išraišką.



11 pav. Terahercinės emisijos spektro priklausomybė kintant dipolio pločiui bei elektriniam laukui (a) ir terahercinės emisijos intensyvumo priklausomybė kintant dipolio pločiui, kai elektrinis laukas vienodas (b) [26].

Taip pat dipolinė antena buvo palyginta su varlytės formos bei mikrojuosteline antenomis, kur buvo stebima, kaip kinta terahercinio impulso parametrai esant kitų formų elektrodams (12 pav.) [25]. Antenų išmatavimai nurodyti 1 lentelėje.



12 pav. Dipolinės antenos terahercinis impulsas laiko skalėje (a), dipolinės antenos spektras (b), varlytės formos antenos terahercinis impulsas laiko skalėje (c), bei jos spektras (d), mikrolinijinės antenos terahercinis impulsas laiko skalėje (e), bei jos spektras (f) [25].

Iš 12 paveikslėlio matome, jog mikrojuostelinės antenos terahercinio impulso amplitudė didžiausia, taip pat ir jos spektras plačiausias.

Device Type	Antenna Length and Width (L/W)	Photo-conductive Gap (μm)	Transmission Line Width (D) (μm)
Dipole I	30/20 μm	5	10
Bow tie	1 mm/ $\theta = 90^\circ$	10 \times 10	
Strip line		80	10

1 lentelė. Dipolinės, varlytės formos ir mikrojuostelinės antenos išmatavimai [25].

2.5. Fotojautrūs puslaidininkiai

Puslaidininkiai, naudojami fotolaidžiose antenose, turi pasižymėti šiomis savybėmis: sub-pikosekundinė krūvininko gyvavimo trukmė, didelis krūvininkų judris, atitinkamas draustinės juostos tarpas, aukšta pramušimo įtampa bei didelė tamsinė varža. Visi šie veiksniai turi įtaką antenos terahercinių impulsų galiai, maksimaliai leistinai optinio impulso galiai ir įtampai ant pridėtinių kontaktų [13], [27].

Kaip jau buvo minėta, viena iš dažniausiai naudojamų medžiagų fotolaidžioms antenoms yra žematemperatūris galio arsenidas (LT-GaAs) [19]. Jis pasižymi draustinės juostos tarpu, kuris kambario temperatūroje atitinka 1.424 eV (871 nm) [17], kas leidžia naudoti titano-safyro

femtosekundinių impulsų lazerius optiniam žadinimui. Galio arsenido puslaidininkiai dažniausiai būna trijų formų: Si-GaAs, LT-GaAs, ir su jonų implantavimu, pavyzdžiui GaAs:N³⁻ [17]. Tyrimai parodė, jog galio arsenido kristalo auginimo temperatūra turi įtakos krūvininkų gyvavimo trukmei [28], [29]. Žematemperatūris galio arsenidas (LT-GaAs), augintas molekulinio pluošto epitaksijos būdu, 200-250°C temperatūroje, pasižymi didelės eilės kristališkumu, dėl to padidėja krūvininkų judrumas, taip pat dėl didesnio As⁺³ jonų kiekio padidėja taškinių defektų skaičius, dėl ko sumažėja krūvininkų gyvavimo trukmė [17]. Taip pat buvo pasiekta didelė pramušimo įtampa, siekianti 200 kV/cm, stipriai padidėjo tamsinė varža, lyginant su Si-GaAs emiteriu.

Kita fotolaidžioms antenoms naudojama medžiaga yra indžio-galio arsenidas (In_xGa_{x-1}As) [30]. Šios medžiagos privalumas yra tas, jog pasiekiamas 0.8 eV draustinės juostos tarpas, kas leidžia naudoti 1.55 μm optinius impulsus. Tai įgalina žadinimui naudoti šviesolaidinius lazerius be dispersijos efekto. Nors žematemperatūris galio arsenido antenas taip pat galima žadinti 1.55 μm ilgio bangos impulsais [31], jų efektyvumas, palyginus su žadinimu 800 nm bangos ilgiu, ženkliai sumažėja [17]. Indžio- galio arsenidas gali būti legiruojamas geležiu (Fe²⁺), norint sumažinti krūvininkų gyvavimo trukmę [32].

2.6. Šotki barjeras ir ominis kontaktas

Šotki barjeras- elektronų potencinės energijos skirtumas, kurie susidarė metalo ir puslaidininkio sandūroje [33]. Oro dielektrinė konstanta yra 1, o galio arsenido- 12.9 [29]. Kuo dielektrinė konstanta aukštesnė, tuo medžiaga mažiau priešinasi išoriniam elektriniam laukui. Kai fotolaidininkas apšviečiamas lazerine spinduliuote, pasipriešinimas elektriniam laukui išnyksta- elektrinio lauko linijos sustiprėja. Kadangi oro dielektrinė konstanta gerokai mažesnė nei galio arsenido, jis stipriau priešinasi elektriniam laukui, taip pat ir elektrinio lauko linijų kiekis fotolaidininke, dėl kontaktų padėties yra mažesnis, nei įleistų kontaktų atveju. Kai antenos kontaktai įleisti, elektrinio lauko linijų kiekis puslaidininkyje padidėja. Dėl to, optiškai paveikus fotolaidininką, elektrinio lauko linijų įtaka fotokrūvininkams fotolaidžioje medžiagoje su įleistais kontaktais yra didesnė.

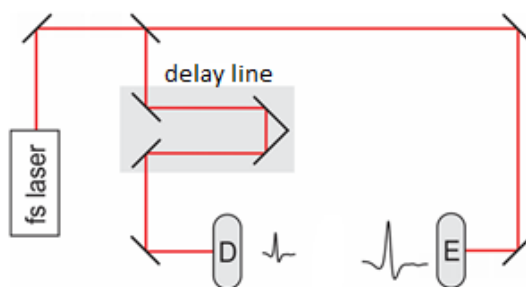
Ominis kontaktas – mažos varžos jungtis, užtikrinanti srovės laidumą iš metalo į puslaidininkį ir atvirkščiai. Tokiu atveju, srovė didėja ir mažėja tiesiškai, priklausomai kaip kinta įtampa.

3. Eksperimentų metodika ir aparatūra

3.1. THz - TDS stendas

Laikinės terahercinės spektroskopijos sistemai panaudojome šiuos pagrindinius elementus:

1. Femtosekundinis lazeris
2. Mechaninė vėlinimo linija
3. Terahercinės spinduliuotės emiteris
4. Terahercinės spinduliuotės detektorius



13 pav. THz laikinės spektroskopijos schema.

Stendo veikimas aprašytas 2.4.1. skyrelyje. Pradžioje stendas sureguliuojamas taip, jog būtų fiksuojamas didžiausias galimas intensyvumas. Tokiu būdu žinome, jog abiem šakomis atėjusių impulsų nueitas kelias yra identiškas.

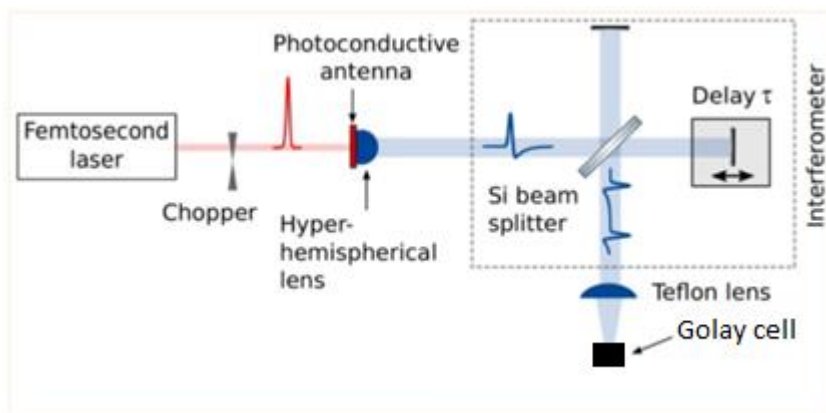
3.2. THz interferometrijos stendas

Pagrindinės interferometrijos stendo dalys:

5. Femtosekundinis lazeris (femtosecond laser)
6. Mechaninis modulatorius
7. Fotolaidi antena (photoconductive antenna)
8. Pluošto daliklis (beam splitter)
9. Vėlinimo linija
10. Golay cell detektorius

Femtosekundinis impulsas yra moduluojamas signalo atkirtikliu, norint padidinti signalas/triukšmas santykį. Vėliau, šis impulsas fotolaidžioje antenoje sugeneruoja terahercinius impulsus, kurie padalinami į dvi dalis. Viena iš jų vadinama atraminė, kurios kelio ilgis fiksuotas, kita dalis patenka į vėlinimo liniją, kurios atstumą iki pluošto daliklio galima keisti. Vėliau, abi dalys nukreipiamos į teflono lęšį, kur yra sukolimuoamos ir vėliau, detektoriuje užregistruojamos. Kai atramine ir vėlinimo linija sklindančių pluoštų keliai bus

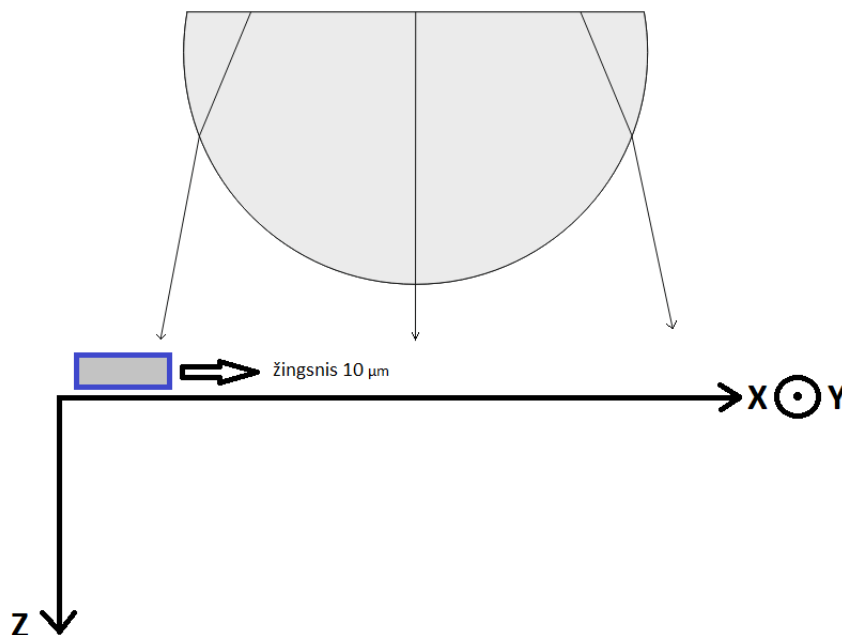
vienodi, tuomet bus gaunamas interferencinis maksimumas – registruojama maksimali impulso galia. Atlikus signalų autokoreliaciją, atliekama Furjė transformacija ir apskaičiuojamas terahercinio impulso spektras.



14 pav. Naudotas interferometrijos stendas

3.3. THz spinduliuotės pluošto matavimų stendas

Atlikti antenos su įleistais ir neįleistais kontaktais spinduliuotės pluošto matavimai. Priešais silicio lęšį buvo pastatytas į šilumą reaguojantis detektorius – tranzistorinis (TeraFet). Jis pasižymi tiesiniu spektriniu atsaku nuo 0.1 iki 20 THz ruože. X ir Y ašimis nuskenutas buvo 30 mm plotas, o Z ašimi rezultatai registruoti esant trimis vertėms – kai atstumas 50, 100 ir 150 mm.

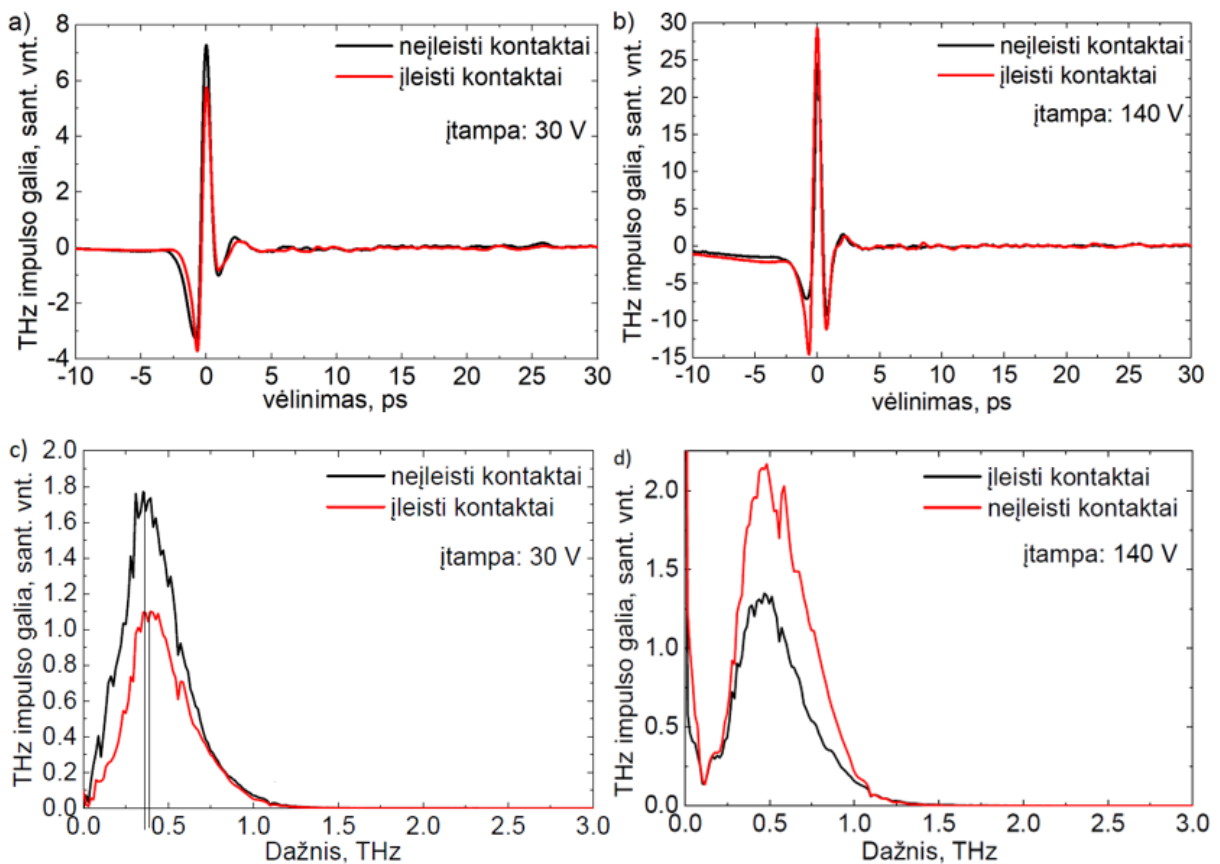


15 pav. THz spinduliuotės pluošto matavimas

4. Eksperimento rezultatai

4.1. THz - TDS tyrimo matavimai

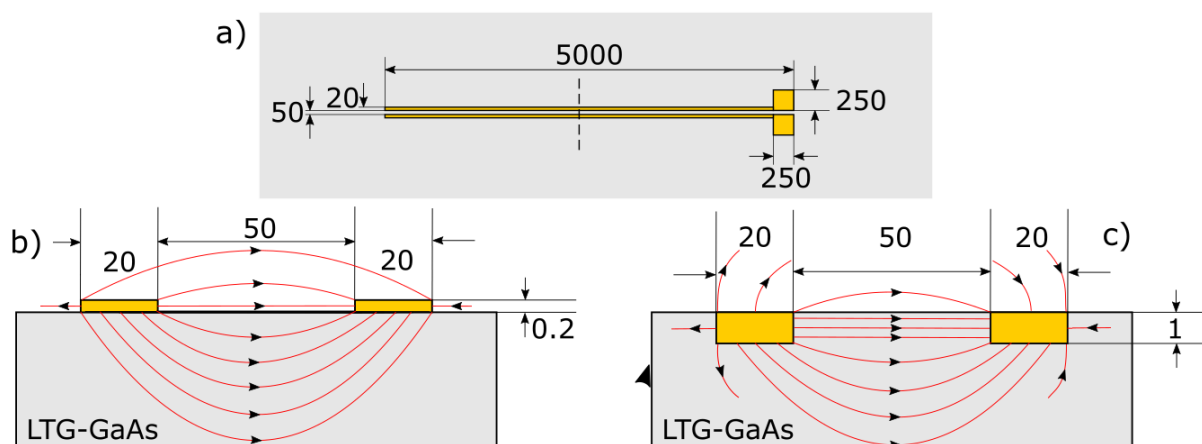
Šiame skyriuje aprašyta terahercinio impulso intensyvumo priklausomybė nuo pridėtinės įtampos. Matavimai atlikti esant 30 V ir 140 V pridėtinės įtampos vertėms. Optinės spinduliuotės parametrai abiem atvejais buvo vienodi. Tyrimas pakartotas dviem atvejais – kai fotoemiterio kontaktai įleisti į puslaidininkį, ir kai paviršiniai, bei atlikta Furjė transformacija spektro atvaizdavimui.



16 pav. Įleistų ir neįleistų kontaktų emiterių terahercinės emisijos intensyvumas, kai pridėtinė įtampa 30 V (a), kai pridėtinė įtampa 140 V (b), bei spektrai, esant pridėtinei įtampai 30 V (c) ir 140 V (d).

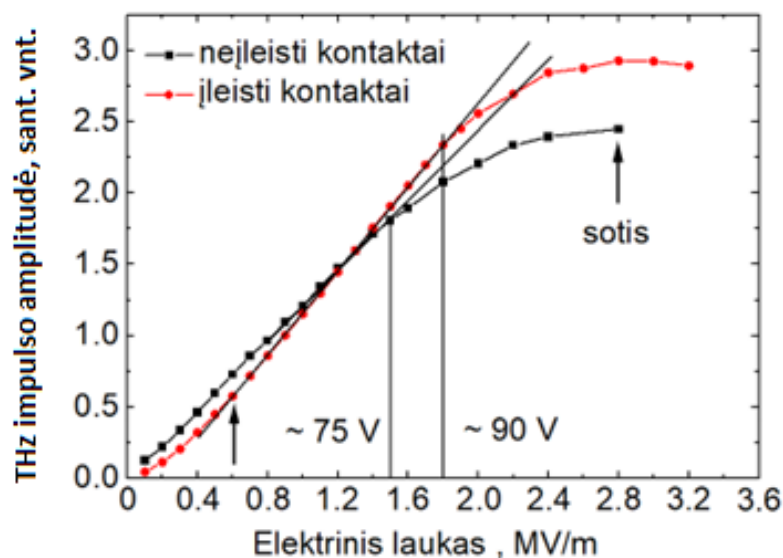
Terahercinio impulso intensyvumas ties 30 V pridėtinės įtampos verte buvo gerokai didesnis neįleistų kontaktų atveju, tačiau kai pridėtinė įtampa buvo 140 V, pastebėtas įleistų kontaktų emiterio terahercinės emisijos pranašumas. 30 V pridėtinės įtampos atveju išryškėja Šotki barjero efektas. Rezultatai taip pat patvirtina literatūrinę medžiagą, jog antenų su įleistais kontaktais elektrinis laukas pasiskirsto kryptingiau kontaktų atžvilgiu, dėl ko į detektorių atėjęs impulsas yra mažiau išsiplėtęs erdvėje ir yra intensyvesnis. Kadangi naudojamo detektoriaus fotojautrus tarpelis ženkliai mažesnis negu terahercinio impulso sufokusuota dėmelė,

užregistruojamas didesnio intensyvumo impulsas įleistų kontaktų atveju. Iš vienos pusės galima teigti, jog dėl šios priežasties impulso galia mažai kinta- kitaip tariant, naudojant detektorius, kuris surinktų didesnės skėsties impulsą, būtų registruojama panaši galia. Tačiau, iš kitos pusės, pridėtinės įtampos sukuriamas elektrinis laukas ne tik keičia terahercinio impulso kryptį, bet ir krūvininkai yra įgreitinami intensyvesniame pridėtiniame lauke. Dėl to pastarieji, judėdami su didesniu pagreičiu, gali generuoti didesnio intensyvumo terahercinius impulsus



17 pav. Nagrinėtų fotolaidžių antenų matmenys (a), paviršinių kontaktų (b), įleistų kontaktų (c). Raudonos linijos – elektrinio lauko pasiskirstymo linijos.

Šotki barjero įtampa tiek esant 30 voltų, tiek 140 voltų pridėtinei įtampai nekinta, todėl didesnę įtaką turi, kai pridėtinė įtampa mažesnė. Jai augant, Šotki barjero įtaka mažėja, kadangi jo įveikimui reikalingos įtampos reikšmė viršijama didesniu skirtumu ir įtaka tampa beveik neįtampa. Dėl šios priežasties, ties 140 voltų pridėtine įtampa, ir didesnio elektrinio poveikio tiesiai į fotolaidininką, terahercinė spinduliuotė įleistų kontaktų atveju tampa gerokai intensyvesnė.



18 pav. Soties ribos nustatymas įleistų kontaktų ir paviršinių kontaktų antenų konfigūracijų atvejais.

Iš 18 paveikslo matosi, jog emiteris su paviršiniais kontaktais pradeda soti ties 75 V, o su įleistais kontaktais – 90 V. Taigi, antenos su įleistais kontaktais konfigūracija leido padidinti įsisotinimo ribą.

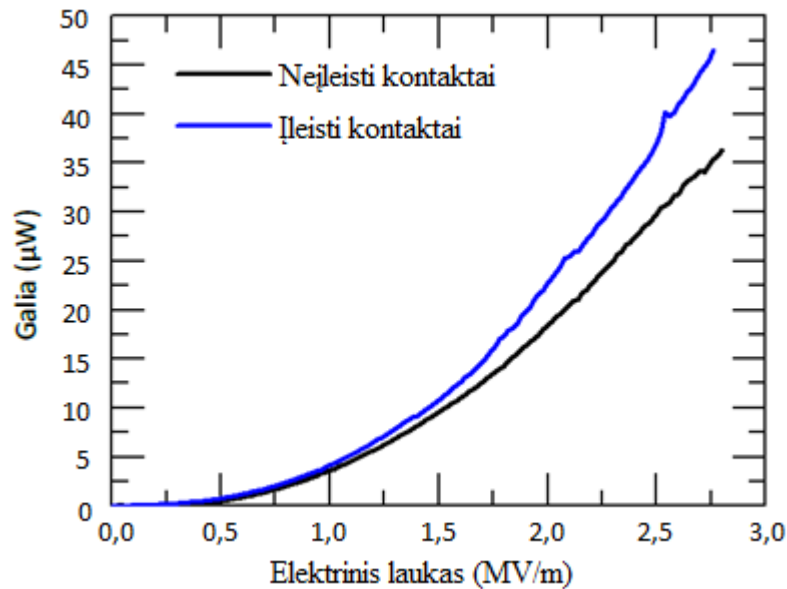
Kai kontaktai neįleisti, dėl skirtingo elektrinio lauko pasiskirstymo, elektrinio lauko linijos ne tokios kryptingos kontaktų atžvilgiu, lyginant su įleistais kontaktais. Dėl to sugeneruoti fotokrūvininkai juda su mažesniu pagreičiu, generuodami mažesnio intensyvumo ir kryptingumo terahercinį impulsą. Sugeneravus fotokrūvininkus, tačiau nepriverčiant jų judėti sparčiai, pasiekama sotis. Įsisotinimas pasiekiamas atsiradus netiesiniam atspindžiui. Kai kontaktai įleisti, fotokrūvininkai juda didesniu greičiu, todėl savo kiekiu nesukelia netiesinio atspindžio efekto. Sotis priklauso ir nuo lazerinio impulso galios, kadangi tai nusako sugeneruotų fotokrūvininkų skaičių. Todėl norint išvengti įsisotinimo, sugeneruotus fotokrūvininkus reikia kuo greičiau „patraukti“ link kontaktų. Taip pat reikėtų nepamiršti ir krūvininkų gyvavimo trukmės, kuriai mažėjant, krūvininkai rekombinuoja greičiau, todėl didėja įsisotinimo riba.

Taip pat matome, jog elektriniam laukui esant iki 1.4 MV/m, antenos su įleistais kontaktais terahercinio impulso amplitudė mažesnė, tačiau vėliau išauga, lyginant su antena neįleistais kontaktais. Tai gali būti paaiškinta Šotki barjero įveikimu.

Lyginant 18 ir 19 paveikslėlių rezultatus, matosi, jog amplitudė pasiekia sotes ribą, tačiau galia- ne. Nors lyginti galią su amplitude nėra visai tinkama, šie dydžiai yra stipriai nuo vienas kito priklausomi, todėl duoda mums reikiamos informacijos. Taip gali būti dėl detektoriaus įsisotinimo- amplitudės matavimuose buvo panaudotas terahercinis detektorius, o galios matavime- piroelektrinis.

4.2. THz spinduliuotės galios matavimai, kintant pridėtinės įtampos sukurtam elektriniam laukui

Siekiant nustatyti elektrinio lauko stiprumo įtaką terahercinės spinduliuotės galiai, keičiant pridėtinę įtampą, buvo matuojamas elektrinio lauko stiprumas tarp kontaktų, bei stebimos konkrečios jo reikšmės ir įtaka terahercinės spinduliuotės galiai. Detektavimas atliktas su plačiajuosčiu piroelektriniu galios matuokliu.

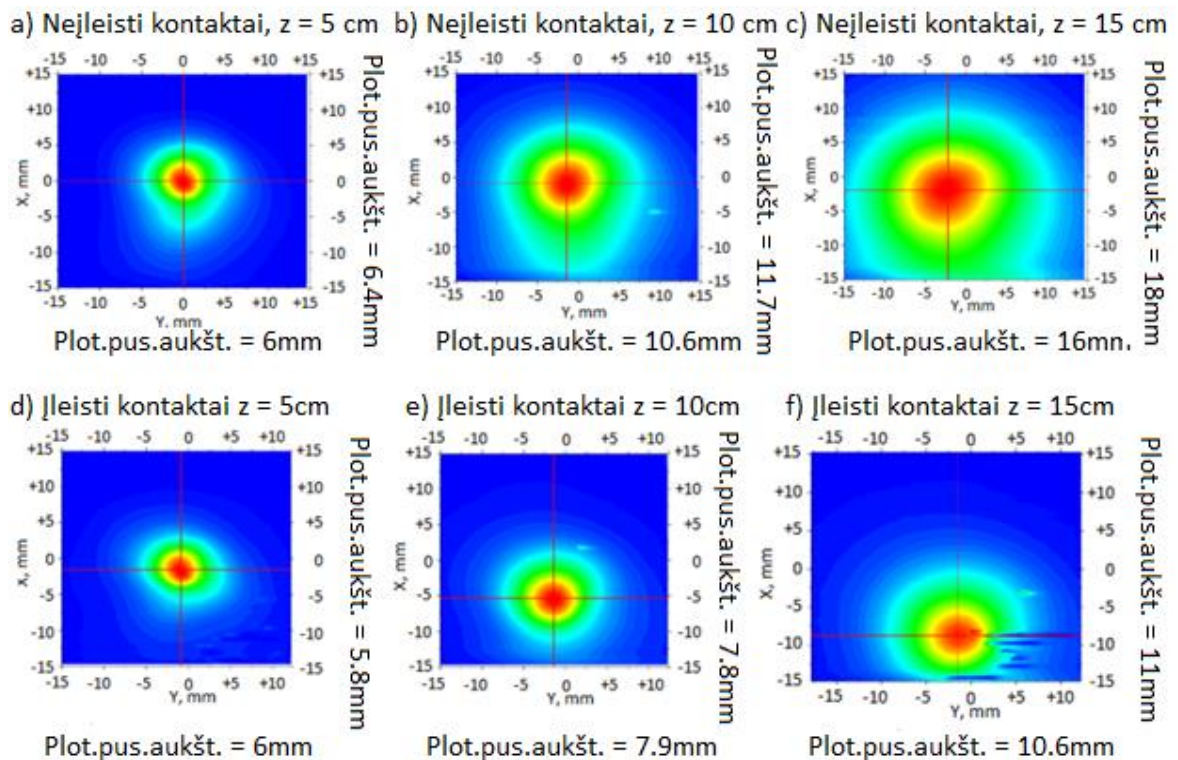


19 pav. Terahercinės spinduliuotės galios priklausomybė, kintant elektrinio lauko stiprumui.

Kaip matome, įleistų kontaktų atveju, elektrinio lauko stiprumo reikšmei pasiekus apie 2.75 MV/m, terahercinės spinduliuotės galia yra didesnė, nei tokio pačio dydžio elektrinio lauko stiprumui, kai kontaktai paviršiniai. Iš to galime teigti, jog elektrinio lauko linijos įleistų kontaktų atveju pasiskirsto kryptingiau, šitaip labiau veikdamos fotolaidininką, dėl ko gaunama didesnė terahercinės spinduliuotės galia. Skirtumas pradeda ryškėti didėjant pridėtinei įtampai, dėl Šotki barjero įveikimo.

4.3. Terahercinės spinduliuotės pluošto matavimai

Šiame skyriuje pateikiami terahercinės spinduliuotės pluošto matavimai. Šiuo tyrimu sužinosime, kaip terahercinis impulsas sklinda erdvėje, jo divergenciją, bei kokią įtaką tam turi antenų konfigūracija.

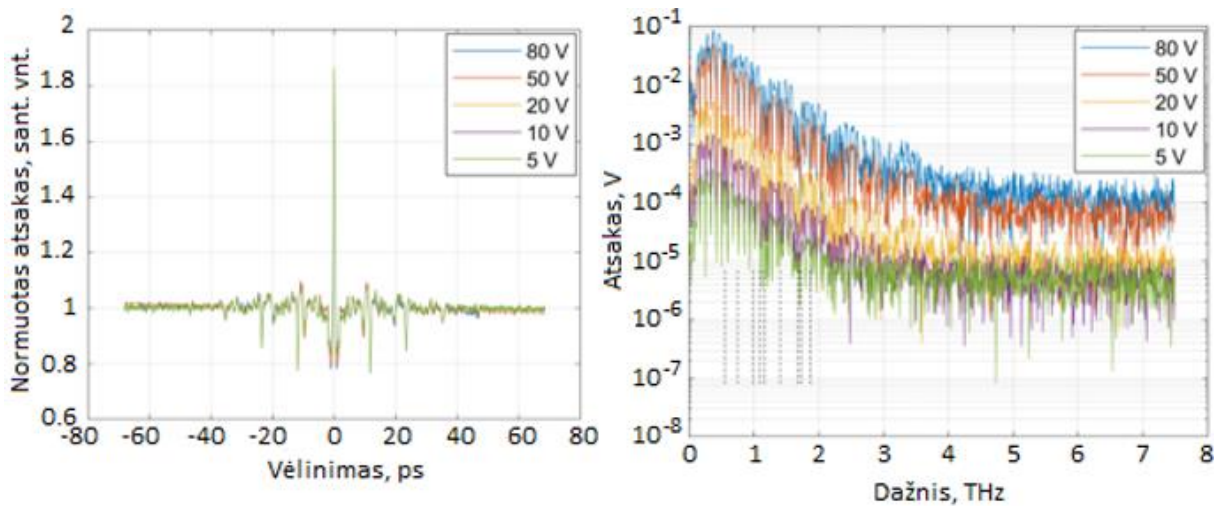


20 pav. Terahercinės spinduliuotės pluošto matavimai neįleistų kontaktų atveju, kintant detektoriaus padėčiai – X ir Y ašimis – kas 50 μm , Z ašimi – ties 5 cm (a), 10 cm (b) ir 15 cm (c) atstumais, bei leistų kontaktų atveju, ties 5 cm (d), 10 cm (e) ir 15 cm (f) atstumais.

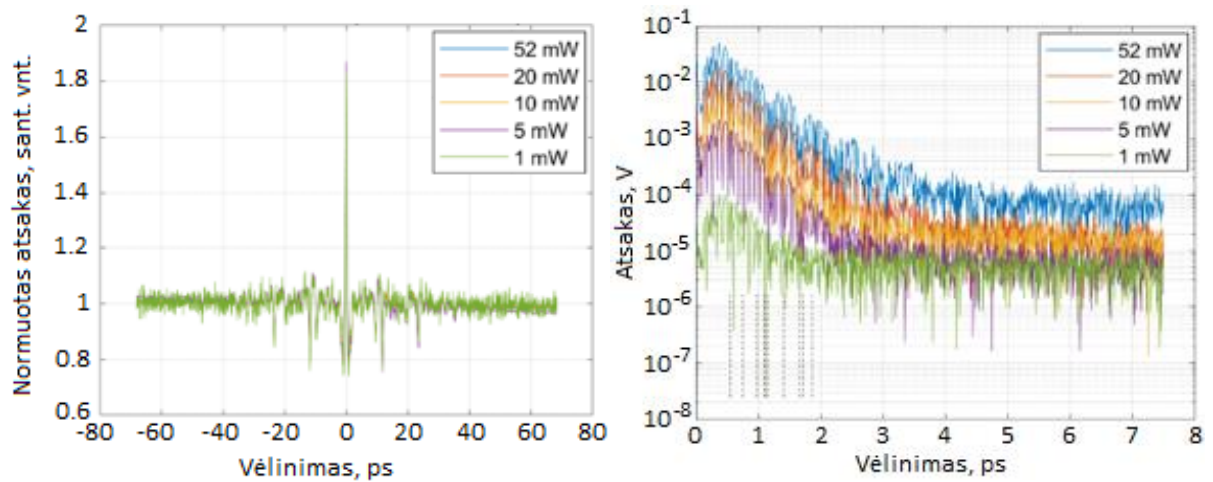
Palyginus įleistų ir paviršinių antenų kontaktų konfigūracijų rezultatus, matome, jog atstumu $Z = 5$ cm. pluošto parametrai abiem atvejais išliko panašūs. Kai $Z = 10$ ir 15 cm., plotis pusės aukštyje, ir X, ir Y ašimis gerokai sumažėjo įleistų kontaktų atveju. Tai rodo, jog antenų kontaktų konfigūracija turi įtakos teraherciniam impulsui- dėl kryptingesnių elektrinio lauko linijų terahercinis impulsas tampa labiau sukolimuotas, mažiau išsklaidytas erdvėje. Norint dar labiau sumažinti skėstį, būtų galima panaudoti elipsoidinį lęšį terahercinio impulso kolimavimui. Tačiau tokie lęšiai mažiau sutinkami dėl savo kainos ir sudėtingesnės gamybos.

4.4. THz interferometrijos matavimai

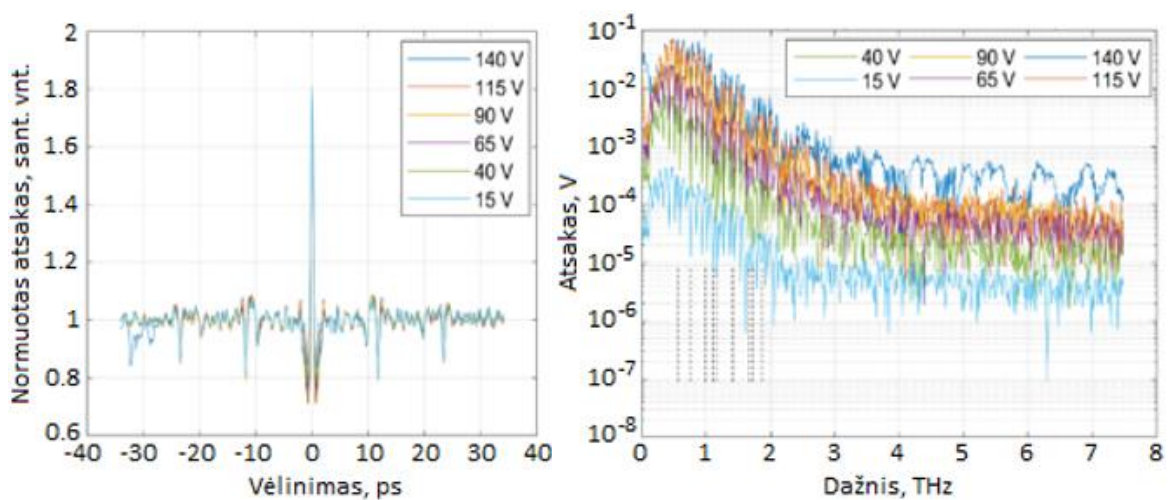
Panaudojus THz interferometrijos standą, išmatuota, kaip kinta terahercinės emisijos spektras, pirmu atveju keičiant įtampą ant antenos kontaktų, kitu atveju- lazerinės spinduliuotės galią. Vėliau atlikta autokoreliacija, bei atlikus Furjė transformaciją, atvaizduotas spektras.



21 pav. Įprastinė antena, keičiant pridėtinę įtampą. Autokoreliacijos rezultatas (a), bei atlikus Furjė transformaciją, atvaizduotas spektras (b)



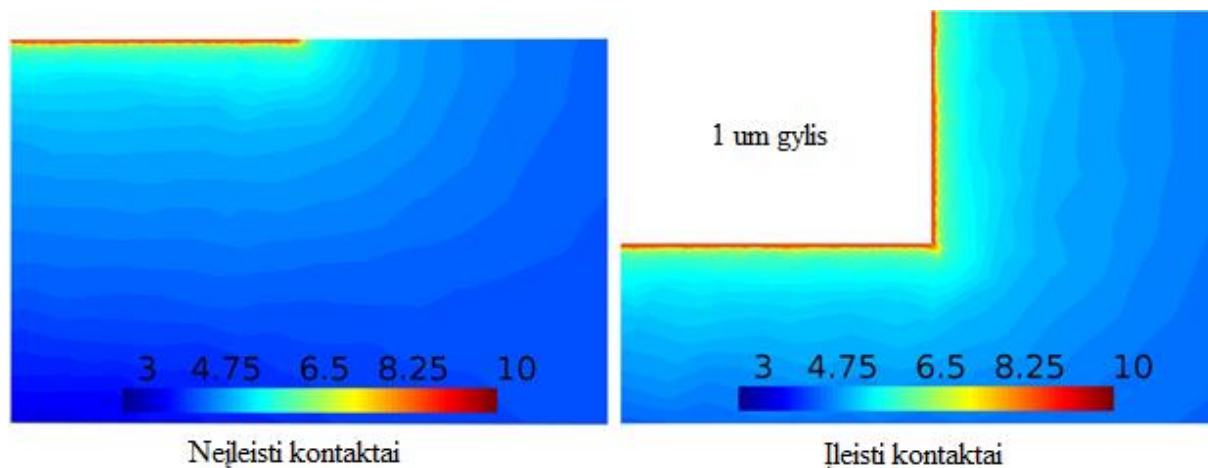
22 pav. Įprastinė antena, keičiant lazerio galią. Autokoreliacijos rezultatas (a), bei atlikus Furjė transformaciją, atvaizduotas spektras (b).



23 pav. Antena su įleistais kontaktais, keičiant pridėtinę įtampą ant antenos kontaktų. Autokoreliacijos rezultatas (a), bei atlikus Furjė transformaciją, atvaizduotas spektras (b).

4.5. Elektrinio lauko linijų pasiskirstymo modeliavimas

„Lumerical device“ aplinkoje sumodeliuotas elektrinio lauko linijų pasiskirstymas abiem atvejais, norint įsitikinti, jog emiterio su įleistais kontaktais atveju elektrinis laukas yra kryptingesnis pridėtinės įtampos kontaktų atžvilgiu.



24 pav. Elektrinio lauko linijų pasiskirstymas, kai kontaktai paviršiniai ir kontaktai įleisti į fotolaidininką.

Iš rezultatų matosi, jog įleistų kontaktų atveju elektrinio lauko linijos sklinda ne tik į tūrį, bet ir tiesiai link kito elektrodo. Dėl kryptingesnio elektrinio lauko kontaktų atžvilgiu fotokrūvininkai veikiami stipriau, kryptingiau, todėl ir išspinduliuojamas terahercinis impulsas taip pat intensyvesnis bei kryptingesnis. Didinant kontaktų gylį, kaip minėta anksčiau, būtų galima sugeneruoti didesnę elektrinio lauko linijų skaičių, tačiau tuo pačiu mažėtų ir lazerinės spinduliuotės įtaka toliau nuo paviršiaus esantiems krūvininkams. Galio arsenido sugerties gylis žadinant 780 nm spinduliuote yra apie 1 mikrometras. Tokiame gylyje buvo ir mūsų įleisti kontaktai. Sugerties gylio apibrėžimas teigia, jog kai spinduliuotės intensyvumas nukrenta 63 %, tokiame gylyje laikome spinduliuotę sugertą. Vadinasi, likusi spinduliuotės dalis yra giliau, nei mūsų įleistų kontaktų gylis. Fotolaidininke išėsdinus griovelius, būtų galima padidinti puslaidininkio plotą, į kurį krenta lazerinis impulsas, nekeičiant tarpo tarp kontaktų. Tokiu atveju būtų galima panaudoti ir griovelių šonus. Tačiau tokiu būdu terahercinio impulso kryptis taptų labai sudėtinga, chaotinė, kadangi į griovelio šoną kritusi lazerinė spinduliuotė sugeneruotų terahercinį impulsą kitomis kryptimis. Kad tiksliai atsakyti, ar sumoje būtų gautas geresnis rezultatas, reiktų atlikti modeliavimus ir bandymus.

5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Išmatuota impulso galia esant įleistiems ir neįleistiems kontaktams. Iš rezultatų galima spręsti, jog antena su įleistais kontaktais esant 140 V pridėtinei įtampai pademonstravo didesnės galios terahercinę emisiją. Taip pat, gautas įleistų kontaktų spektras, atlikus Furjė transformaciją, platesnis.

2. Impulso galios priklausomybės nuo elektrinio lauko matavimuose matome, jog antena su įleistais kontaktais įsisotina vėliau. Taip pat pastebėta, jog antena su įleistais kontaktais, esant tam pačiam elektrinio lauko stiprumui, generuoja didesnės galios terahercinius impulsus.

3. Terahercinės spinduliuotės pluošto matavimai parodė, jog įleistų kontaktų atveju terahercinis impulsas yra kryptingesnis.

4. Interferometrijos tyrimo rezultatuose matosi, jog įleistų kontaktų atveju antenos spektras pasižymi ryškesniu signalas/triukšmas santykiu, ypač esant 140 V pridėtinei įtampai.

5. Sumodeliavus elektrinio lauko pasiskirstymo linijas, matosi, jog antenos su įleistais kontaktais elektrinis laukas pasiskirsto kryptingiau kontaktų atžvilgiu, o tai lemia ir kryptingesnę generuojamą terahercinės spinduliuotės pluoštą.

Literatūra

- [1] L. Zhu *et al.*, “Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz orbital angular momentum (OAM) communications,” in *OFC 2014*, 2014, pp. 1–3. doi: 10.1364/OFC.2014.M3K.7.
- [2] P. S. Chakraborty *et al.*, “A 0.8 THz f_{\max} SiGe HBT Operating at 4.3 K,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 2, pp. 151–153, 2014, doi: 10.1109/LED.2013.2295214.
- [3] D. A. Cool, E. Lazo, P. Tattersall, G. Simeonov, and S. Niu, “ICRP Publication 125: Radiological Protection in Security Screening,” *Ann ICRP*, vol. 43, no. 2, pp. 5–40, Jul. 2014, doi: 10.1177/0146645313517031.
- [4] E. Pickwell and V. P. Wallace, “Biomedical applications of terahertz technology,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 39, no. 17, p. R301, 2006, doi: 10.1088/0022-3727/39/17/R01.
- [5] A. Boin and D. Fishbacher-Smith, “The importance of failure theories in assessing crisis management: The Columbia space shuttle disaster revisited,” *Policy Soc*, vol. 30, no. 2, pp. 77–87, May 2011, doi: 10.1016/j.polsoc.2011.03.003.
- [6] A. A. Baker and M. L. Scott, *Composite Materials for Aircraft Structures, Third Edition*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2016. doi: 10.2514/4.103261.
- [7] E. Heinz *et al.*, “Progress report on Safe VISITOR: approaching a practical instrument for terahertz security screening,” in *Proc.SPIE*, Apr. 2010, p. 767005. doi: 10.1117/12.852558.
- [8] A. L. S. Cruz, C. M. B. Cordeiro, and M. A. R. Franco, “3D Printed Hollow-Core Terahertz Fibers,” *Fibers*, vol. 6, no. 3, 2018, doi: 10.3390/fib6030043.
- [9] J. Federici and L. Moeller, “Review of terahertz and subterahertz wireless communications,” *J Appl Phys*, vol. 107, no. 11, p. 111101, Jun. 2010, doi: 10.1063/1.3386413.
- [10] P. H. Siegel, “Terahertz technology in biology and medicine,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 52, no. 10, pp. 2438–2447, 2004, doi: 10.1109/TMTT.2004.835916.
- [11] F. Melia, *High-Energy Astrophysics*, vol. 14. Princeton University Press, 2009. doi: 10.2307/j.ctv21r3q4z.
- [12] Ignas Nevinskas, “Emission of terahertz pulses from the narrow-gap semiconductor structures,” 2017.
- [13] D. Saeedkia, “Terahertz photoconductive antennas: Principles and applications,” in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2011, pp. 3326–3328.
- [14] S. Lepeshov *et al.*, “Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 6624, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-25013-7.
- [15] A. Redo-Sanchez, N. Laman, B. Schulkin, and T. Tongue, “Review of Terahertz Technology Readiness Assessment and Applications,” *J Infrared Millim Terahertz Waves*, vol. 34, no. 9, pp. 500–518, 2013, doi: 10.1007/s10762-013-9998-y.
- [16] D. H. Auston, “Subpicosecond electro-optic shock waves,” *Appl Phys Lett*, vol. 43, no. 8, pp. 713–715, Oct. 1983, doi: 10.1063/1.94486.

- [17] N. M. Burford and M. O. El-Shenawee, "Review of terahertz photoconductive antenna technology," *Optical Engineering*, vol. 56, no. 1, p. 010901, Jan. 2017, doi: 10.1117/1.OE.56.1.010901.
- [18] D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis, and D. A. Kleinman, "Cerenkov Radiation from Femtosecond Optical Pulses in Electro-Optic Media," *Topical Meeting on Ultrafast Phenomena*, 1984.
- [19] A. C. Warren, N. Katzenellenbogen, D. Grischkowsky, J. M. Woodall, M. R. Melloch, and N. Otsuka, "Subpicosecond, freely propagating electromagnetic pulse generation and detection using GaAs:As epilayers," *Appl Phys Lett*, vol. 58, no. 14, pp. 1512–1514, Apr. 1991, doi: 10.1063/1.105162.
- [20] P. Chen, M. Hosseini, and A. Babakhani, "An Integrated Germanium-Based THz Impulse Radiator with an Optical Waveguide Coupled Photoconductive Switch in Silicon," *Micromachines (Basel)*, vol. 10, no. 6, p. 367, May 2019, doi: 10.3390/mi10060367.
- [21] J. T. Darrow, X. -C. Zhang, D. H. Auston, and J. D. Morse, "Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas," *IEEE J Quantum Electron*, vol. 28, no. 6, pp. 1607–1616, 1992, doi: 10.1109/3.135314.
- [22] L. Chen and H. Bagci, "Analysis of Screening Effects on Terahertz Photoconductive Devices Using a Fully-Coupled Multiphysics Approach," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 24, pp. 7876–7884, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3072890.
- [23] S. Winnerl, B. Zimmermann, F. Peter, H. Schneider, and M. Helm, "Terahertz Bessel-Gauss beams of radial and azimuthal polarization from microstructured photoconductive antennas," *Opt Express*, vol. 17, no. 3, pp. 1571–1576, 2009, doi: 10.1364/OE.17.001571.
- [24] J. Afalla *et al.*, "A modulation-doped heterostructure-based terahertz photoconductive antenna emitter with recessed metal contacts," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 19926, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76413-7.
- [25] M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs," *Appl Opt*, vol. 36, no. 30, pp. 7853–7859, 1997, doi: 10.1364/AO.36.007853.
- [26] F. Miyamaru, Y. Saito, K. Yamamoto, T. Furuya, S. Nishizawa, and M. Tani, "Dependence of emission of terahertz radiation on geometrical parameters of dipole photoconductive antennas," *Appl Phys Lett*, vol. 96, no. 21, p. 211104, May 2010, doi: 10.1063/1.3436724.
- [27] K. Moon *et al.*, "Generation and Detection of Terahertz Waves Using Low-Temperature-Grown GaAs with an Annealing Process," *ETRI Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 159–162, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.4218/etrij.14.0213.0319>.
- [28] M. Tani *et al.*, "Spectroscopic Characterization of Low-Temperature Grown GaAs Epitaxial Films," *Jpn J Appl Phys*, vol. 33, no. 9R, p. 4807, 1994, doi: 10.1143/JJAP.33.4807.
- [29] S. Gupta *et al.*, "Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures," *Appl Phys Lett*, vol. 59, no. 25, pp. 3276–3278, Dec. 1991, doi: 10.1063/1.105729.
- [30] M. Suzuki and M. Tonouchi, "Fe-implanted InGaAs photoconductive terahertz detectors triggered by 1.56 μ m femtosecond optical pulses," *Appl Phys Lett*, vol. 86, no. 16, p. 163504, Apr. 2005, doi: 10.1063/1.1901817.

- [31] A. Jooshesh, V. Bahrami-Yekta, J. Zhang, T. Tiedje, T. E. Darcie, and R. Gordon, "Plasmon-Enhanced below Bandgap Photoconductive Terahertz Generation and Detection," *Nano Lett*, vol. 15, no. 12, pp. 8306–8310, Dec. 2015, doi: 10.1021/acs.nanolett.5b03922.
- [32] O. Hatem *et al.*, "Terahertz-frequency photoconductive detectors fabricated from metal-organic chemical vapor deposition-grown Fe-doped InGaAs," *Appl Phys Lett*, vol. 98, no. 12, p. 121107, Mar. 2011, doi: 10.1063/1.3571289.
- [33] S. M. Sze, *Semiconductor devices : physics and technology*, 3rd ed., int'l st... Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013.

Santrauka

Darbo tikslas- charakterizuoti emituojančios LT-GaAs fotolaidžios antenos su įleistais kontaktais THz spinduliuotės intensyvumą, spektrą ir pluošto parametrus, bei palyginti šiuos su įprastine koplanarine THz antena. Šiame darbe, panaudojus terahercinės laikinės spektroskopijos stendą, Lumerical device programinio paketo modeliavimą, THz interferometrijos matavimų stendą, bei THz pluošto matavimų stendą, buvo aiškinamasi terahercinių fotolaidžių antenų kontaktų konfigūracijų įtaka spinduliuojamam teraherciniam impulsui bei jo parametrams. Buvo tiriamos dvi antenos- su paviršiniaisiais kontaktais, bei su į puslaidininkį įleistais kontaktais. THz-TDS tyrimo metu išmatuoti abiejų antenų terahercinio impulso intensyvumai esant skirtingoms pridėtinės įtampos vertėms, bei atlikus Furjė transformaciją, atvaizduotas spektras. Išsiaiškinta, jog antenos su įleistais kontaktais spektras platesnis, o terahercinio impulso intensyvumas kelis kartus didesnis. Tai buvo paaiškinta kryptingesniu elektrinio lauko linijų išsidėstymu tarp pridėtinių kontaktų. Sumodeliavus abiejų antenų elektrinį lauką Lumerical device aplinkoje, buvo rastas elektrinio lauko linijų pasiskirstymo skirtumas dėl skirtingų kontaktų konfigūracijų. Šiuo tyrimu buvo patvirtinta, jog elektrinio lauko linijos įleistų kontaktų atveju yra kryptingesnės. Panaudojus THz interferometrijos stendą, buvo išmatuotas terahercinio impulso intensyvumas esant skirtingoms pridėtinėms įtampoms, atlikta autokoreliacija, bei, atlikus Furjė transformaciją, rastas spektras. Panaudojus pluošto matavimų stendą, išmatuotas terahercinio impulso pluoštas. Pastebėta, jog antenos su įleistais kontaktais terahercinio impulso skėstis mažesnė. Tai paaiškinta kryptingesniu fotokrūvininkų judėjimu tarp kontaktų, kurį paskatino kryptingesnis elektrinis laukas.

Abstract

Investigation of photoconductive terahertz antennas contacts configurations

The aim of the work is to characterize the THz radiation intensity, spectrum and beam parameters of the emitting LT-GaAs photoconductive antenna with embedded contacts, as well as these with a simple coplanar THz antenna. In this work, using the terahertz time-domain spectroscopy stand, Lumerical device software package simulation, THz interferometry measurement stand, and THz beam measurement stand, the influence of terahertz photoconductive antennas contacts configurations on the radiated terahertz pulse and its parameters was investigated. Two antennas were tested- with contacts on surface and with recessed contacts in semiconductor. During the THz-TDS measurements, the terahertz pulse

intensities of both antennas were measured at different added voltage values, and the spectrum was displayed after Fourier transformation. It was found that the spectrum of the antenna with recessed contacts is wider, and the intensity of the terahertz pulse is several times higher. This was explained by a more directional arrangement of the electric field lines between the additional contacts. After modeling the electric field of both antennas in the Lumerical device environment, a difference in the distribution of electric field lines due to different contact configurations was found. This study confirmed that electric field lines are more directional in the case of recessed contacts. Using THz interferometry stand, the intensity of the terahertz pulse was measured at different added voltages, autocorrelation was performed, and the spectrum was found after Fourier transformation. A terahertz pulse beam was measured using a beam measurement stand. It was observed that the spread of the terahertz pulse of the antenna with embedded contacts is lower. This is explained by a more directional movement of photocarriers between contacts, which was induced by a more directional electric field.