Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Puslaidininkių fizikos katedra

Žydrūnas Bautronis

LAZERIO IMPULSAIS VALDOMO TERAHERCINIŲ IMPULSŲ GENERAVIMO GALIO ARSENIDE TYRIMAS

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos
studijų programa

Studentas	Žydrūnas Bautronis
Darbo vadovas	dr. Ramūnas Adomavičius
Recenzentas	dr. Linas Minkevičius
Katedros vedėjas	prof. habil. dr. Gintautas Tamulaitis

VILNIUS, 2017

Turinys

Įvadas 3

1. Teorinis įvadas 5

1.1. THz spinduliuotė ir jos taikymai 5

Elektromagnetiniai terahercinio dažnių ruožo impulsai 5

THz spinduliuotės taikymai 5

1.2. THz impulsų emisija iš puslaidininkių paviršiaus 7

Paviršinio elektrinio lauko efektas 8

Foto – Demberio efektas 9

Netiesiniai optiniai efektai 10

2. Bandinio ir eksperimento aprašymas 11

2.1. Tyrimo objektas 11

2.2. Ti:Safyro femtosekundinė lazerinė sistema 11

2.3. THz spinduliuotės detektorius 11

2.4. THz emisijos zondavimo eksperimentas 13

2.5. Optinio žadinimo – terahercinio zondavimo metodo apžvalga 14

2.6. Optinio žadinimo – terahercinio zondavimo eksperimentas 17

3. Eksperimento rezultatai 22

Išvados 27

Literatūros sąrašas 28

Įvadas

Daugeliui cheminių bei biologinių medžiagų turi budingas sugerties linijos terahercinių dažnių (toliau – THz) diapazone, tačiau tik nesenai buvo atrasti tinkami šio diapazono spinduliuotės šaltiniai ir imtuvai. Ši spinduliuotė aktyviai pradėta naudoti objektų vaizdavimo srityje, medicinoje bei farmacijoje, narkotikams aptikt ir identifikavimt, duomenims perduoti ir kitiems tikslams. THz spindulių taikymą lauko sąlygomis smarkiai riboja galingų ir paprastų šio diapazono šaltinių nebuvimas bei didėjantys energijos nuostoliai didėjant dažniui, todėl THz spinduliuotės šaltinių galios ir efektyvumo didinimas buvo ir yra vienas aktualiausių THz fizikos uždavinių. Sėkmingam THz spinduliuotės pritaikymui svarbūs ir kiti uždaviniai. Pavyzdžiui, reikalingi įvairūs manipuliavimo spinduliuote įrenginiai (lęšiai, poliarizatoriai, poliarizacijos keitikliai, intensyvumo moduliatoriai), kurių sukūrimas reikalauja nemažai pastangų ir resursų. Sprendžiant šiuos uždavinius labai svarbi yra puslaidininkių fizika. Jos reikšmė yra didžiulė dėl dviejų priežasčių: modernūs THz impulsų šaltiniai ir imtuvai yra puslaidininkiniai, o pati THz spinduliuotė – labai tinkamas instrumentas puslaidininkių savybėms tirti. Šiame darbe paliečiami abu minėti aspektai.

Šiame darbe tiriamas THz impulsų generavimas didžiavaržio GaAs paviršiuje. Apšvietus puslaidininkio paviršių femtosekundiniais optiniais impulsais atspindžio kampu sugeneruojamas kelių pikosekundžių trukmės impulsas, kurio spektras svyruoja nuo kelių šimtų gigahercų iki kelių terahercų. Šios spinduliuotės prigimtis yra įvairi, ji priklauso tiek nuo optinio impulso parametrų, tiek nuo puslaidininkio savybių. Puslaidininkio paviršių apšvietus dar vienu lazerio impulsu, juo sužadinti krūvininkai gali labai pakeisti THz impulso generavimo sąlygas, o keičiant vėlinimą tarp dviejų optinių impulsų, galima tirti pirmuoju lazerio impulsu sužadintų krūvininkų dinamiką. Šiame darbe parodoma, kad pirmasis optinis impulsas gali labai efektyviai moduliuoti THz impulso generavimo antruoju optiniu impulsu efektyvumą. Galimas netgi THz impulso invertavimas, kuris ankstesniuose darbuose nebuvo stebėtas. Gilesnis šio reiškinio tyrimas padės geriau suprasti krūvininkų dinamikos puslaidininkio paviršiuje ypatybes. Taigi, aprašomi tyrimai gali būti įdomūs tiek taikomojo, tiek fundamentinio mokslo sritims.

Darbo tikslas

- Optinio žadinimo - terahercinio generavimo metodu ištirti GaAs paviršiuje generuojamo THz impulso moduliacijos ypatybes.

Darbo uždaviniai

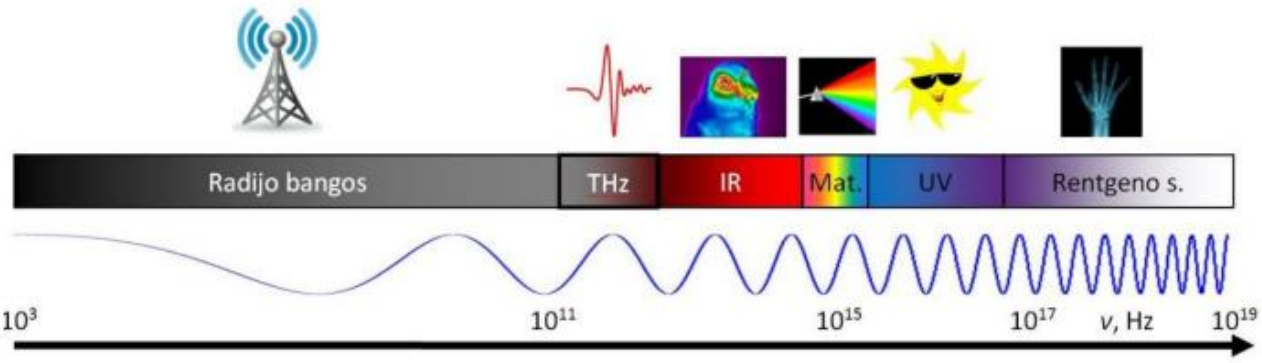
- Išsiaiškinti THz impulsų generacijos femtosekundinio lazerio impulsais apšviestų puslaidininkių paviršiuje pagrindinius mechanizmus.
- Įsisavinti optinio žadinimo – terahercinio impulso generavimo metodiką bei optinio žadinimo – terahercinio zondavimo metodikas. Surinkti šių matavimo metodikų stendus ir atlikti didžiavaržio GaAs padėklo tyrimus. Išsiaiškinti THz impulso emisijos efektyvumo dinamikos priklausomybę nuo žadinimo intensyvumo.

1. Teorinis įvadas

1.1. THz spinduliuotė ir jos taikymai

Elektromagnetiniai terahercinio dažnių ruožo impulsai

Terahercinės spinduliuotės sritis yra įsispraudusi tarp radijo ir infraraudonųjų bangų. Jos dažnis yra 10^{12} eilės dydis, iš čia ir kilo šios srities pavadinimas (1 THz = 10^{12} Hz). Nors nėra griežto susitarimo, kur ši sritis prasideda ir kur baigiasi, tačiau dažniausia laikoma, kad šis diapazonas yra nuo 0,1 iki 10 THz, o bangos ilgis kinta nuo 30 μm iki 3 mm (1.1.1 pav.).



1.1.1 pav. Elektromagnetinių bangų spektras [11].

THz spinduliuotės, kaip elektromagnetinių bangų sritis, pradėta tyrinėti vėliausiai. Taip nutiko dėl kelių fundamentalių priežasčių. Pagrindinis faktorius ribojęs tyrimus bei taikymus šioje srityje buvo efektyvių šaltinių bei detektorių trūkumas. Kitas svarbus aspektas, kad šiame intervale stipriai pasireiškia atmosferoje esančių, pagrinde vandens, molekulių sugertis, kas įtakoja didelį sugerties koeficientą, kuris lemia signalo dydžio sumažėjimą net penkiomis ar daugiau eilių.

THz spinduliuotės taikymai

Fizikiniu požiūriu THz dažnio diapazonas patrauklus įvairių sričių taikymuose dėl THz spinduliuotės pasižymėjimo radijo bangų bei optinio diapazono savybėmis. Radijo bangų atmosferos molekulės sugerti negali ir erdve jos, sklinda be nuostolių, nepaisant sklaidos ir

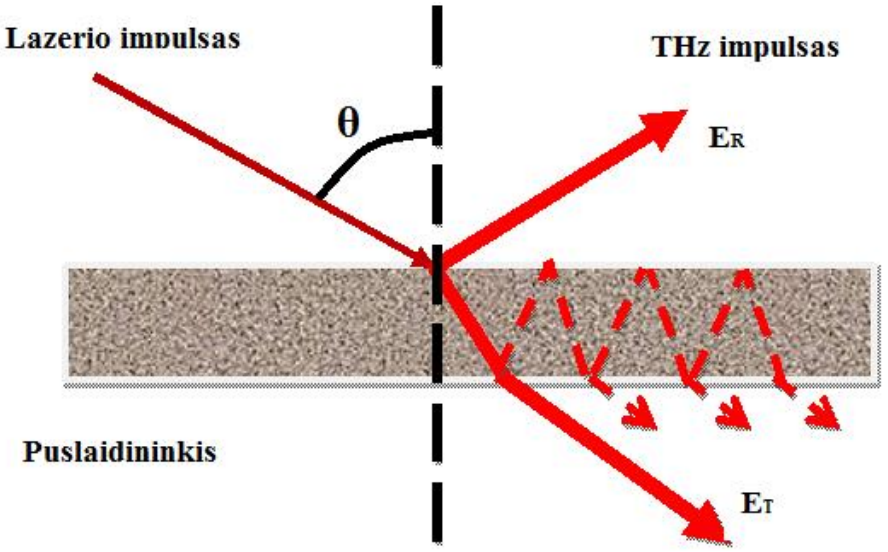
interferencijos, o IR spektro privalumas yra mažas bangos ilgis, kuris leidžia išskirti daugumą šio pasaulio objektų bei gebėjimas atpažinti medžiagas, kadangi kiekviena pasižymi unikaliu sugerties spektru šioje srityje.

- Viena populiariausių THz spinduliuotės taikymo sričių yra objektų vaizdavimas [1]. Ilgainiui buvo pasiūlyta keletas vaizdavimo būdų. Paminėtina THz tomografija, kuri geba atkurti trimatį objekto vaizdą artimajame lauke [2], kas leidžia padidinti skyrą nemažint bangos ilgio.
- Medicinoje THz spinduliuotė pritaikoma ėduonies pažeistų dantų aptikime dar ankstyvoje fazėje arba identifikuojant vėžio audinius paviršiniuose žmogaus kūno sluoksniuose [3], kur vandens kiekis nedidelis. Lyginant su rentgeno spinduliais THz spinduliai pasižymi tuo, kad yra visiškai nepavojingi žmogaus sveikatai ir nesukelia jokių šalutinių pasekmių.
- THz pagalba galima užregistruoti paslėptus ginklus, kadangi dauguma nepolinių, nemetalinių medžiagų yra skaidrios THz spinduliuotei. Taip pat, dauguma sprogstamųjų [4] bei narkotinių medžiagų [5] turi būdingas sugerties linijas THz srityje, o tai leidžia THz spindulius pritaikyti minėtų medžiagų detekcijai, kas šiuo metu ypač svarbu užtikrinant saugumą viešo susibūrimo vietose.
- THz spinduliai leidžia tirti kosmoso kūnus, kadangi termiškai sužadinti atomai bei molekulės, galaktikos dujos ir dulkės, 10-100 K temperatūros kūnai spinduliuoja THz diapazono spinduliuotę [6].
- Duomenų perdavimas panaudojus elektroninius THz spnduliuotės generacijos būdus jau pasiekė 10Gbit/s perdavimo greitį laboratorinėmis sąlygomis daugiau nei 100 m atstumu [7]. Tačiau smarkiai didėjantys nuostoliai didėjant dažniui, intensyvių šaltinių trūkumas ir kitos problemos vis dar neleidžia efektyviai panaudoti THz diapazono duomenų perdavimui.

THz technologijos yra mažai išvystytos ir platesiam naudojimui kol kas nėra tinkamos lyginant su kitomis sritimis. Tačiau padidėjęs susidomėjimas THz spinduliuote skatina vis daugiau gamintojų siūlyti THz srities prietaisus, nors kol kas didžioji dauguma gaminamos THz diapazono įrangos yra skirta moksliniams tyrimams. Netolimoje ateityje tikimasi THz spinduliuotę pritaikyti ir kasdieniniame gyvenime.

1.2. THz impulsų emisija iš puslaidininkių paviršiaus

THz impulsų generavimo šaltinių yra daug ir skirtingų: tai įvairūs kristalai, dipolinės siauro [8] ir plataus tarpo fotolaidžios antenos [9], įvairūs greitintuvai ir dauguma kitų. Tačiau vienas labiausiai paplitusių ir paprasčiausių būdų generuoti THz impulsus panaudojant femtosekundinio lazerio impulsus yra puslaidininkio paviršiaus žadinimas [10]. THz spinduliuotės generacijai naudojant puslaidininkių paviršius medžiagos savybės dažniausiai nėra tokios svarbios kaip fotolaidžios antenos atveju. Puslaidininkių paviršiuose atsirandanti spinduliuotė yra reikšminga ne tik taikymams, bet ir fundamentiniams emituojančių medžiagų tyrimams. Puslaidininkio emituojamas THz signalas atspindi ultrasparčius poliarizacijos ir laidumo srovės pokyčius indukuojamus ultraspartaus optinio sužadinimo. Tai suteikia tiesioginės informacijos apie sparčius krūvininkų savybių ir poliarizacijos pokyčius tiriamoje sistemoje.



1.2.1 pav. THz generacija iš puslaidininkio paviršiaus.

THz emisiją, apšvietus puslaidininkio paviršių femtosekundiniais lazerio impulsais pagrinde daro įtaką dvi fizikinių mechanizmų grupės:

- Netiesiniai optiniai efektai (optinis lyginimas (OR- optical rectification), poslinkio srovė arba elektriniu lauku indukuotas optinis lyginimas (EFIOR- Electrical field induced optical rectification).

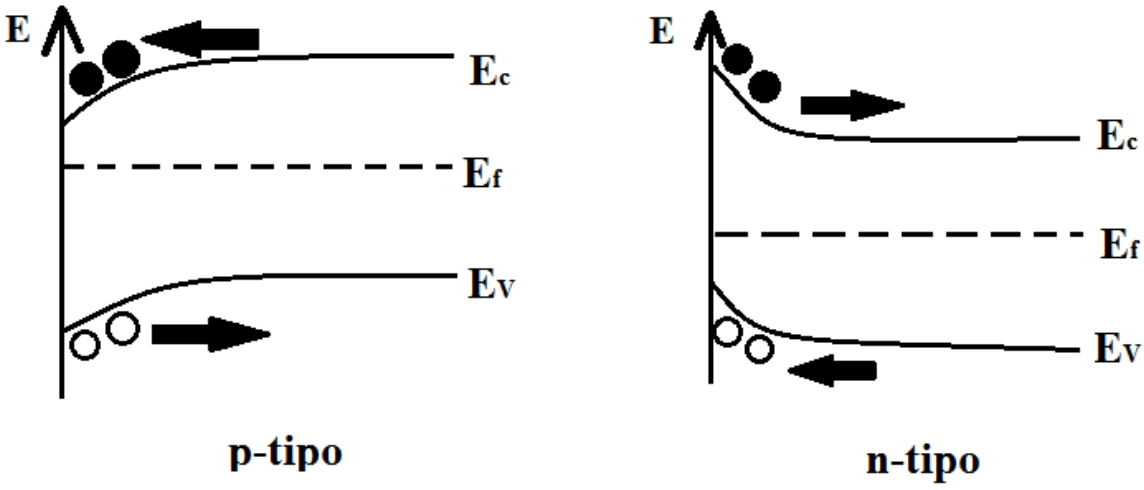
- Srovės efektai (THz emisiją gali nulemti fotosrovės bangos efektas, sąlygotas paviršiniu elektriniu lauku ir/arba foto Demberio efektu dėl elektronų ir skylučių judrio skirtumo. Itin spartus elektrinio lauko pokytis arti paviršiaus gali inicijuoti išorinių krūvininkų osciliacijas, kas sustiprina THz bangą.)

THz signalo interpratacija yra pakankamai sudėtinga, kadangi vienu metu gali veikti keli fizikiniai mechanizmai.

Paviršinio elektrinio lauko efektas

Dėl paviršinių lygmenų užpildymų daugumoje puslaidininkių formuojasi nuskurdinta sritis, valentinė ir laidumo juostos užlinksta, ir puslaidininkio paviršiuje susidaro stiprus, statmenas paviršiui elektrinis laukas [11]. Lauko stiprumas priklauso nuo Šotkio barjerinio potencialo ir legiravimo lygio. Kai trumpas lazerio impulsas apšviečia puslaidininkio paviršių arba sandūrą su energija, didesne negu puslaidinkio draustinių energijų tarpas, sugerti fotonai sugeneruoja elektronų ir skylučių poras. Jie yra greitinami išilgai vidinio elektrinio lauko, kuris sukuria sparčiai laike kintančią elektros srovę, kuri gali būti THz spinduliuotės šaltiniu.

Paviršiuje susidariusio elektrinio lauko kryptis priklauso nuo legiruojančių priemaišų tipo ir nuo paviršinių būsenų padėties Fermi lygmens atžvilgiu. THz impulsų generavimui svarbus faktas, kad energijų juostų užlinkimas arti paviršiaus yra priešingos krypties n ir p-tipo bandiniuose.



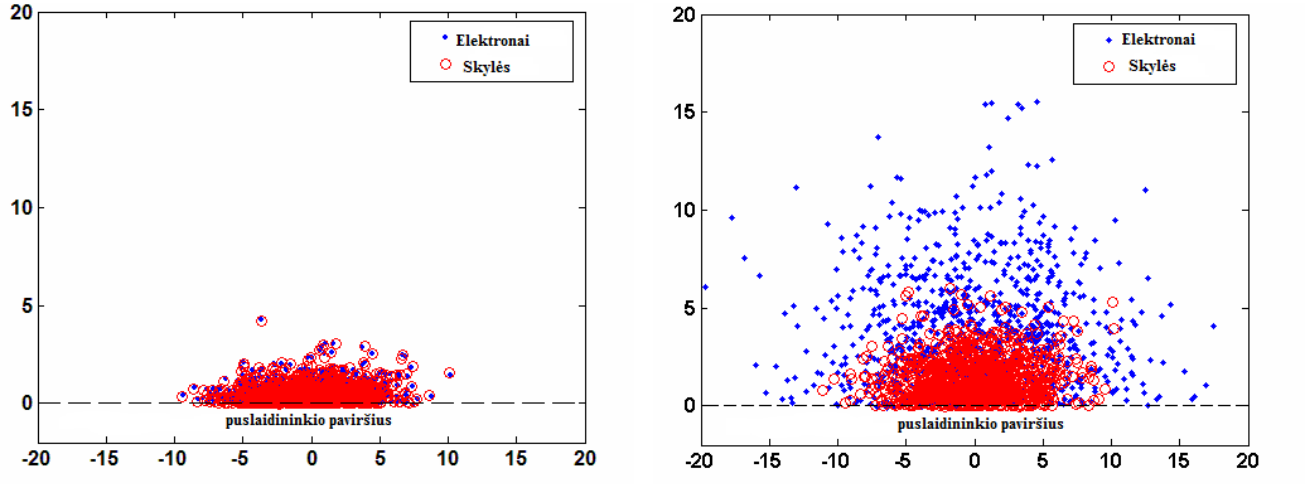
1.2.2 pav. Paviršinė elektrinio lauko sritis

Žadinant tokį puslaidinkį femtosekundiniais lazerio impulsais vyksta erdvinio krūvio atskyrimo efektas paviršiniame elektriniama lauke, ir yra indukuojamas trumpa fotosrovė. Šiame procese formuojamas THz spnduliuotę emituojantis dipolis. Reikia pažymėti, kad skirtinga indukuotos fotosrovės n ir p-tipo bandiniuose kryptis nulemia skirtingą generuojamo nuo puslaidininkio paviršiaus THz signalo poliškumą.

THz spinduliavimo intensyvumas bei forma yra skirtingi priklausomai nuo puslaidininkio. Jie priklauso daugiausia nuo paviršinio elektrinio lauko dydžio, lazerio šviesos sugerties bandinyje ilgio, generuojamas THz spinduliuotės sugerties bei krūvininkų judrio [12].

Foto – Demberio efektas

Krūvininkų kuriama srovė gali būti nulemta ne tik paviršinio elektrinio lauko, bet ir Demberio elektrinio lauko, kuris atsiranda dėl skirtingų elektronų ir skylių judrio (1.2.3 pav.) [13,14].



1.2.3 pav. Monte Carlo simuliacijos, iliustruojančios foto- Demberio efektą [14].

Pradžioje fotosužadinto neigiamo ir teigiamo krūvio centrai sutampa, tačiau vėliau dėl didesnio elektronų judrio, elektronai greičiau difunduoja į tūrį nei skylės taip sukurdami srovę, statmeną puslaidininkio paviršiui. Galiausiai sparčiai difunduojantys elektronai pradeda lėtėti, nes susidaręs elektrinis laukas tarp skylių ir elektronų pasidaro toks stiprus, kad skylės, būdamos daug sunkesnės už elektronus, pradeda juos lėtinti. Galiausiai susiformuoja elektronų ir skylių dipolis, kuris juda kaip kvazineutrali visuma, ko pasekoje, srovės tekėjimas nutrūksta. Taigi, elektrinio lauko susidarymą lemią dvi priežastys: skirtingi elektronų ir skylų difuzijos koeficientai bei struktūrinės asimetrijos.

Netiesiniai optiniai efektai

Visgi dauguma puslaidininkių pasižymi tuo, kad nuo jų sugeneruota THz amplitudė gan stipriai priklauso nuo azimutinio kampo orientacijos. Tas verčia abejoti foto-Demberio efektu, kaip pagrindiniu generacijos mechanizmu, kuriam reikalingas papildomas mechanizmas leidžiantis paaiškinti šią priklausomybę. Tiriant THz spinduliuotės generaciją nuo puslaidininkio paviršiaus esant aukštam sužadinimui pastebėta, kad THz elektrinio lauko amplitudė priklauso nuo bandinio kristalografinės orientacijos. Šis reiškinys buvo nepaaiškintas remiantas fotosrovės bangos efektu. Jis buvo priskirtas anizotropiniam krūvininkų judriui. Vėliau efektas buvo pavadintas optiniu lyginimu (OR), kartais vadinamas atvirkštiniu elektro-optiniu efektu, taip pat dažnai aiškinamas skirtuminio dažnio generavimu. THz spinduliuotės nuo puslaidininkio paviršiaus aiškinimas OR efektu pirmą kartą pasiūlyttas Chuangu ir kt. [15]. Jie teigė, kad puslaidininkio paviršiuje esantis elektrinis laukas gali indukuoti optinį lyginimą sukeldamas THz spinduliuotę. Šis netiesinis optinis modelis leido iš dalies paaiškinti THz signalo priklausomybę nuo lazerio poliarizacijos ir paviršinio elektrinio lauko poliškumo bei bandinio kristalografinės orientacijos.

2. Bandinio ir eksperimento aprašymas

2.1. Tyrimo objektas

(100) orientacijos nelegiruotas GaAs padėklas, kurio savitoji varža - 2×10^8 Ω·cm, o elektronų judris – apie 6000 $cm^2/(V\cdot s)$.

2.2. Ti:Safyro femtosekundinė lazerinė sistema

Terahercinės spinduliuotės generavimui be fotolaidaus detektoriaus optiniam atidarymui buvo naudojamas Ti:Safyro lazeris. Femtosekundinio lazerio spinduliuotės centrinis bangos ilgis $\lambda = 790$ nm, impulso trukmė 150 fs, impulso energija 6 nJ (450 mW, pasikartojimo dažnis 76 MHz)

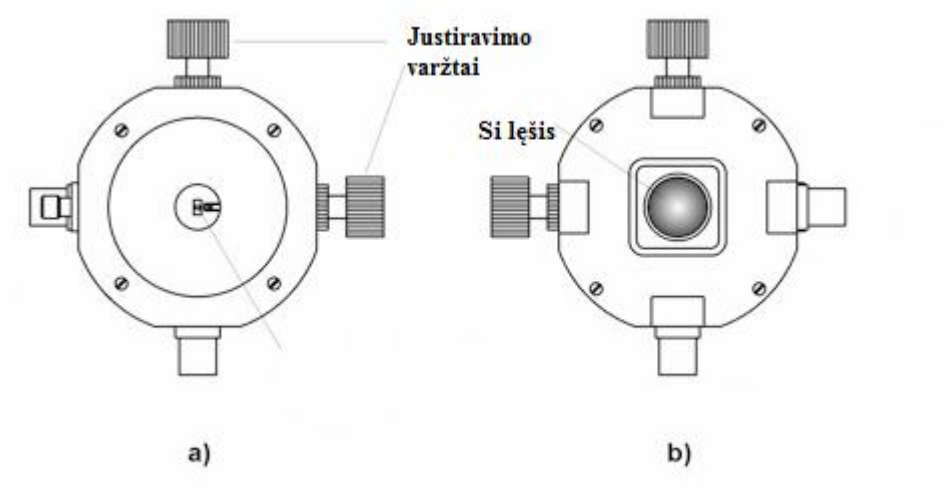
2.3. THz spinduliuotės detektorius

THz spinduliuotės detektavimui buvo naudojamas fotolaidus detektorius, aktyvuojamas femtosekundinio lazerio impulsu. Šiuo metu plačiausiai yra naudojamas fotolaidus detektorius yra žemoje temperatūroje augintas GaAs, kuris turi unikalių savybių, tinkančių ultrasparčiajai optoelektronikai: juose elektronų gyvavimo trukmės mažesnės nei 1 ps, o patys GaAs sluoksniai tampa didžiavaržiais ir pasižyminti neblogu elektronų judriu. Tačiau dėl didelio draustinių energijos tarpo, buvo THz impulsų registravimui buvo naudojami GaAsBi detektoriai.

GaAsBi augintas žemoje temperatūroje pasižymi labai maža krūvininkų gyvavimo trukme, dideliu judriu, o draustinių energijų tarpas gali būti reguliuojamas keičiant Bi koncentraciją. Šios savybės lėme, kad GaAsBi yra patraukli bei dažnai naudojama medžiaga tiek fotolaidiems emiteriams, tiek detektoriams.

GaAsBi sluoksniai yra dažniausiai auginami molekulinių pluokštelių epitaksijos būdu ant didžiavaržio GaAs padėklo. Bi koncentracija juose yra apie 6 %. Po auginimo sluoksniai yra atkaitinami 600˚C temperatūroje. Vėliau ant GaAsBi sluoksnio yra nusodinama antena. Fotolitografijos pagalba yra suformuojamas fotorezisto trafaretas, išėsdinant tik tas vietas, kur bus

elektrodai. Tada ant visos šitos struktūros yra užgarinamas aukso sluoksnis. Vėliau sluoksnis įmerkiamas į ėsdiklį, kur likusios fotorezisto sritys kartu su auksu yra nuėsdinamos - taip formuojama dipolinė antena bei kontaktinės aikštelės. Tada kristalas suskaldomas į 1,5 x 5 mm dydžio gabaliukus, prie kontaktinių aikštelių termokompresijos būdu antena buvo jungiama prie montažinės plokštelės, sujungtos su bendraašiu kabeliu, kur vėliau ši struktūra yra įstatoma į korpusą, kuriama iš vienos pusės yra priglaudžiamas Si lęšis, skirtas THz spinduliuotei fokusuoti, o kitoje paliekama atvira anga, pro kurią fotolaidi antena yra žadinama lazerio spinduliuote.

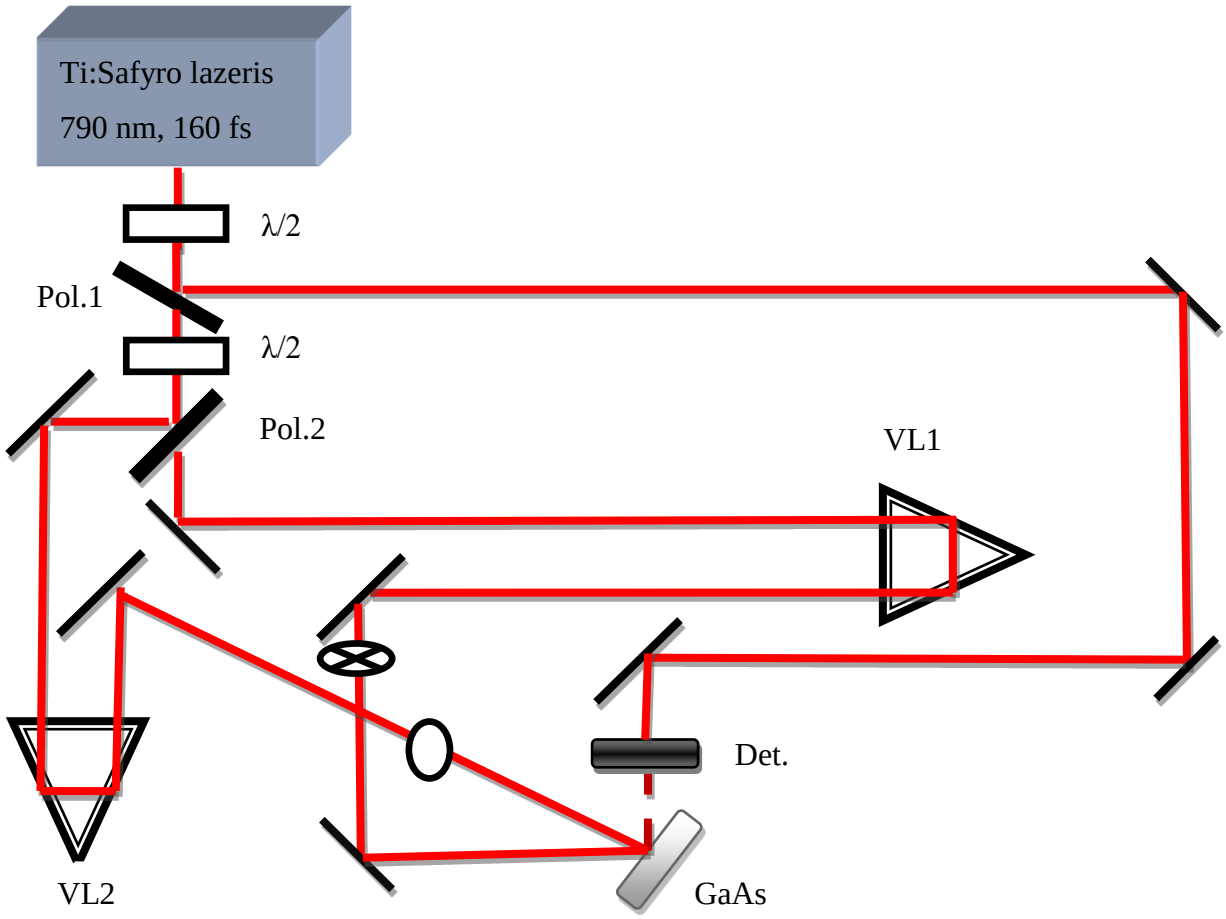


2.3.1 pav. Detektoriaus korpusas su įmontuota fotolaidžia antena. a) - detektoriaus priekinė pusė, pro kur patenka THz spinduliuotė; b) detektoriaus galinė pusė, iš kurios detektorius yra apšviečiamas optiniu impulsu.

Į detektorių atsklidusios THz spinduliuotės sukeltas elektrinis laukas verčia judėti optinės spinduliuotės sužadintus krūvininkus žematemperatūriniame GaAsBi sluoksnyje. Norint, kad tekėtų kontūru srovė, reikia, kad terahercinė spinduliuotė ir optinis impulsas detektorių pasiektų tuo pačiu laiko momentu. Optinio ir terahercinio pluoštų sutapatinimui laike naudojima vėlinimo linija. Pastovus elektrinis signalas, išeinantis iš fotolaidaus detektoriaus, stebimas prijungus jį prie sinchroninio stiprintuvo/detektoriaus.

2.4. THz emisijos zondavimo eksperimentas

Optinio žadinimo – terahercinio generavimo eksperimente lazerio impulsas plėvelinių poliarizatorių pagalba padalijamas į tris skirtingos energijos impulsus. Jos yra reguliuojamas sukant λ/2 plokšteles.



2.4.1 pav. Optinio žadinimo – THz generavimo schema.

Vienas iš impulsų nukreipiamas statmenai bandinio paviršiui. Juo sužadinti krūvininkai keičia THz impulso generavimo puslaidininkyje sąlygas. Šis impulsas pasiekia bandinį praėjęs vėlinimo liniją VL2. Kitas impulsas praeina vėlinimo liniją VL1 ir krinta į bandinį maždaug 45 laipsnių kampu. Šio impulso pluoštas moduliuojamas malūnėlio pagalba, kurio karpymo dažnis yra apie 1 kHz. Šio impulso sugeneruotas THz impulsas yra nukreipiamas į GaAsBi detektorių. Trečias lazerio impulsas labai trumpam laiko tarpui atidaro fotolaidų ir itin spartų žemoje temperatūroje

augintą GaAsBi detektorių, kuris strobuoja THz impulsą. Išeinantis signalas iš fotolaidaus detektoriaus stebimas prijungus prie jo sinchroninį stiprintuvą/detektorių. Šiame darbe ištirta kaip THz impulso amplitudė priklauso nuo pirmojo (žadinančiojo) optinio impulso vėlinimo trukmės ir energijos.

2.5. Optinio žadinimo – terahercinio zondavimo metodo apžvalga

Optinio žadinimo – terahercinio generavimo eksperimentas pirmą kartą pademonstruotas 2002 metais tiriant žemoje temperatūroje augintas galio arsenido (ŽT-GaAs) optoelektronines sklendes [16]. Minėtoje sklendėje optiniu impulsu sužadinus krūvininkus, THz impulso amplitudė maždaug per 400 fs pasiekdavo savo mažiausią reikšmę, o po to sekęs signalo didėjimas straipsnio autorių aprašytas trijų eksponenčių funkcija. Autorių teigimu, pradinį THz impulso generavimo efektyvumo sumažėjimą lėmė sklendės elektrinio lauko ekranavimas žadinančiuoju impulsu sukurtais krūvininkais. Daugia-eksponentinis generavimo efektyvumo atsistatymas aiškintas karštųjų elektronų relaksacija, elektronų rekombinacija arseno dalelėse ir giliuose pagavimo centruose.

Po poros metų pasirodžiusiame straipsnyje [17] buvo pareikšta abejonė [16] straipsnyje pateikta rezultatų interpretacija. Siebert su bendradarbiais iš esmės pakartojo japonų grupės [16] rezultatus ir nusprendė, kad pradinis signalo sumažėjimas negali būti aiškinamas lauko ekranavimo efektu, nes po to sekantis krūvininkų pagavimas į gilius lygmenis formuojančius defektus nesumažina ekranuojančio lauko, taigi spartus THz generacijos efektyvumo atsistatymas negali būti paaiškintas. Vokiečių grupė pasiūlė kitą THz signalo sumažėjimo interpretaciją. Jų teigimu, optoelektroninėje sklendėje sužadinus krūvininkus, jos varža ženkliai sumažėja, o tai iššaukia įtampos persiskirstymą sklendės maitinimo grandinėje, ko pasekoje elektrinis laukas ir THz generavimo efektyvumas sklendėje sumažėja. Krūvininkų pagavimas vėl padidina sklendės varžą, jos elektrinį lauką ir THz generavimo efektyvumą.

Kitas profesoriaus H. G. Roskos grupės straipsnis [18] skirtas ŽT-GaAs sklendėje pagautų krūvininkų rekombinacijos tyrimui. Straipsnio autoriai nustatė, kad į gaudykles patekę krūvininkai visgi dalinai ekranuoja sklendės elektrinį lauką ir lemia THz signalo sumažėjimą, kuris sudaro 5-20% nuo viso signalo sumažėjimo. Autoriai nustatė, kad pagautų krūvininkų rekombinacija ŽT-GaAs sklendėje – neįprastai ilgas procesas, trunkantis nuo kelių iki keliasdešimt nanosekundžių, kuomet didesnės koncentracijos sužadinimai lemia spartesnę rekombinaciją. Kitame straipsnyje Loata su bendradarbiais [19] toliau plėtojo THz generavimo dinamikos ŽT-GaAs sklendėse temą.

Autoriai į savo skaičiavimus įtraukė anksčiau minėtus įtampos persiskirstymo ir ekranavimo krūvininkais efektus ir gavo puikų teorinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimą.

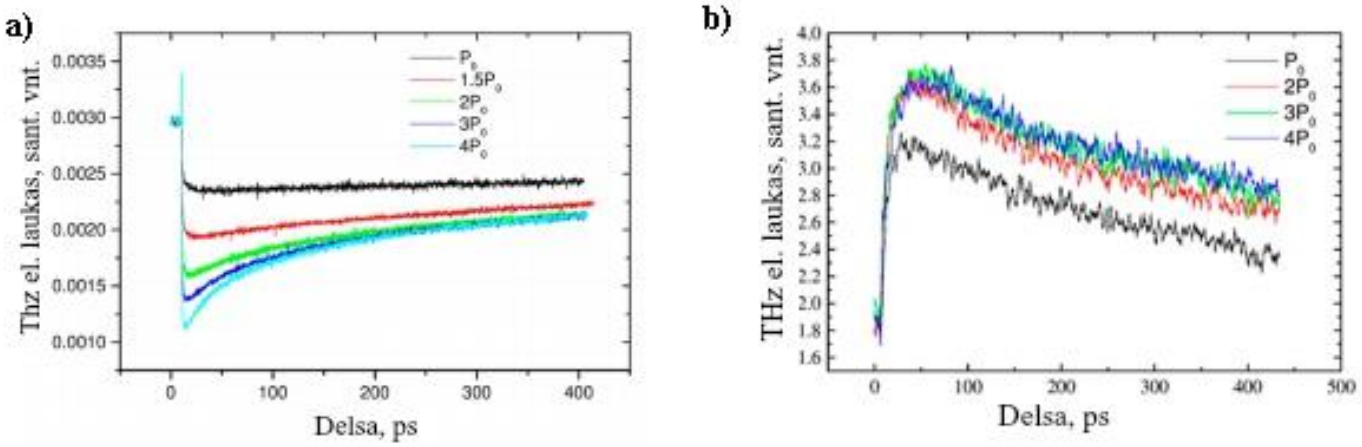
Baigiant optoelektroninių sklendžių temą reiktų paminėti neseniai pasirodžiusį Murakami ir bendradarbių straipsnį [20]. Šiame darbe autoriai išplėtė metodikos galimybes bei ištyrė dvi analogiškos geometrijos optoelektronines sklendes, pagamintas iš ŽT-GaAs ir didžiavaržio galio arsenido. Optiškai sužadintų sklendžių gebėjimas spinduliuoti THz impulsus buvo tiriamas 1 mikrometro diametro lazerio pluoštu, pastaruoju skenuojant visą optoelektroninės sklendės plotą. Tokiu būdu ištirtas elektrinio lauko pasiskirstymas sklendėje ir jo dinamika po optinio sužadinimo. Nustatyta, kad ŽT-GaAs sklendėje elektrinis laukas susitelkia ties katodu, o po sužadinimo laukas sustiprėja ties katodu ir anodu, o susilpnėja centrinėje dalyje. Didžiavaržio GaAs sklendėje elektrinis laukas didžiausias ties anodu, o po sužadinimo per keliasdešimt pikosekundžių susitelkia ties katodu, kas rodo anodo srities ekranavimą nepusiausviraisiais krūvininkais.

Optinio žadinimo – terahercinio generavimo metodika taikyta ir puslaidininkinių darinių be prijungiamos išorinės įtampos tyrimams. Šiuo atveju puslaidininkių darinių ir išmatuotų kinetikų įvairovė didesnė nei tiriant optoelektronines sklendes.Darbe parodyta, kad saulės elementams naudojami $CuInSe_2$ (CISe) sluoksniai taip pat gali būti puikūs THz impulsų šaltiniai [21]. Prie mažų optinių žadinimų CISe sluoksnių THz generavimo efektyvumo kinetikos mažai skyrėsi nuo ŽT-GaAs sklendėms būdingų kinetikų, tačiau didinant optinio impulso energiją pastebėta, kad po sužadinimo praėjus keliasdešimt pikosekundžių THz impulso amplitudė tampa didesnė nei tuo atveju, kai papildomas, krūvininkus žadinantis impulsas nėra naudojamas. Taigi straipsnyje pirmą kartą pastebėta, kad papildomai sužadinti krūvininkai nebūtinai turi slopinti THz impulsų generavimo procesą. THz generavimo stiprinimo reiškinys straipsnyje paaiškintas itin sparčiu sužadintų elektronų pagavimu. Po sužadinimo elektronai ir skylės juda paviršiniame elektriniame lauke ir ekranuoja jį. Ekranuotas laukas nebetrukdo skylių difuzijai gilyn į puslaidininkį; šia kryptimi skylės, kurių pagavimas nėra toks spartus kaip elektronų, difunduoja giliau nei elektronai, taip atstatydamos ir viršydamos prieš sužadinimą buvusį elektrinį lauką.

Optinio žadinimo – terahercinio generavimo metodika dažnai taikyta puslaidininkių tyrimams, pavyzdžiui, THz generavimo mechanizmui, elektrinių laukų dinamikai, krūvininkų gyvavimo trukmėms nustatyti. Todėl logiška šią metodiką palyginti su kitomis panašias funkcijas atliekančiomis tyrimo metodikomis. Straipsnyje aptariamoji metodika palyginta su optinio atspindžio žadinimo ir zondavimo metodu [22]. Darbe ištirti 180 °C, 250 °C ir 310 °C temperatūrose auginti ŽT-GaAs sluoksniai. Ištyrus dviejose aukštesnėse temperatūrose augintus sluoksnius, gautos

panašios krūvininkų relaksacijos vertės abiem metodais. Tuo tarpu 180 °C temperatūroje auginto sluoksnio kinetikos smarkiai skyrėsi. Šis rezultatas nestebina, turint omeny, kad labai žemoje temperatūroje augintas GaAs pasižymi didžiulėmis defektų koncentracijomis, kurios lemia papildomų efektų, susijusių su krūvininkų dinamika, atsiradimą.

THz impulsų generavimo metodikos gana patrauklios tiriant nanovielas (NV), nes dažnai NV sluoksniai yra geresni THz emiteriai nei to paties puslaidininkio tūriniai kristalai. Darbe ištirta THz generavimo efektyvumo dinamika dviejų tipų GaAs NV bandiniuose [23]. MBE būdu auginti bandiniai demonstravo klasikinę THz generavimo efektyvumo dinamiką - staigų signalo sumažėjimą ir šimtus pikosekundžių trunkantį atsistatymą (2.5.1. pav). Tuo tarpu MOCVD būdų augintų nanovielų THz emisijos efektyvumas po krūvininkų sužadinimo ženkliai išaugdavo. Straipsnio autoriai tai aiškino NV sklaidos centrų neutralizavimu, kuomet šoninėse NV sienelėse esančios jonizuotos priemaišos veikia ir kaip krūvininkų gaudyklės, ir kaip elektronų judrį mažinantys gardelės defektai. Vykstant pagavimo procesui mažėja minėtų defektų krūvis ir sklaidos skerspjūvis, o tuo pačiu didėja krūvininkų judris ir THz emisijos efektyvumas. Deja, straipsnio autoriai nepaaiškino, kodėl abiem technologijom užaugintos NVs yra tokios skirtingos. THz generavimo dinamika buvo tiriama ir InAs nanovielose.



2.5.1 pav. THz signalo moduliacija keičiant žadinačiojo pluošto intensyvumą (P_0 = 10 mW) ant a) MBE augintų bandinių b) MOCVD būdu augintų nanovielelių [23].

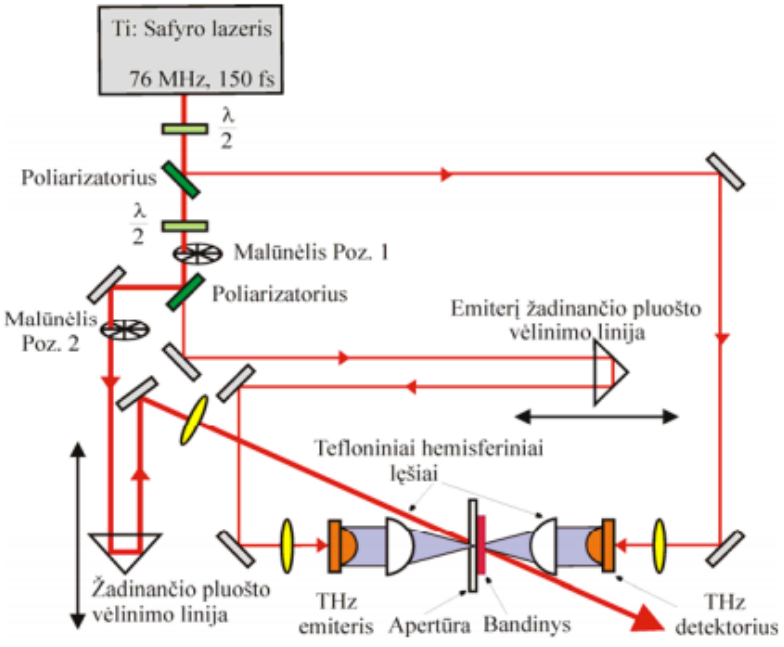
Šiame straipsnyje palygintos InAs padėklo ir nanovielų generavimo dinamikos ypatybės [24]. Rezultatai skyrėsi optinių impulsų persiklojimo momentu: padėkle THz generavimas sustiprėdavo, o NV sluoksnyje - susilpnėdavo. Tai mėginta paaiškinti skirtingais generavimo mechanizmais padėkle ir nanovielose. Žadinančio optinio impulso ir po to sekančio krūvininkų judėjimo sukurtas elektrinis

laukas sustiprina anizotropinio fotolaidumo efektą, kuris lemia THz emisiją iš padėklo ir susilpnina Demberio efektą, kuris svarbiausias vykstant THz generavimui InAs nanovielose.

2.6. Optinio žadinimo – terahercinio zondavimo eksperimentas

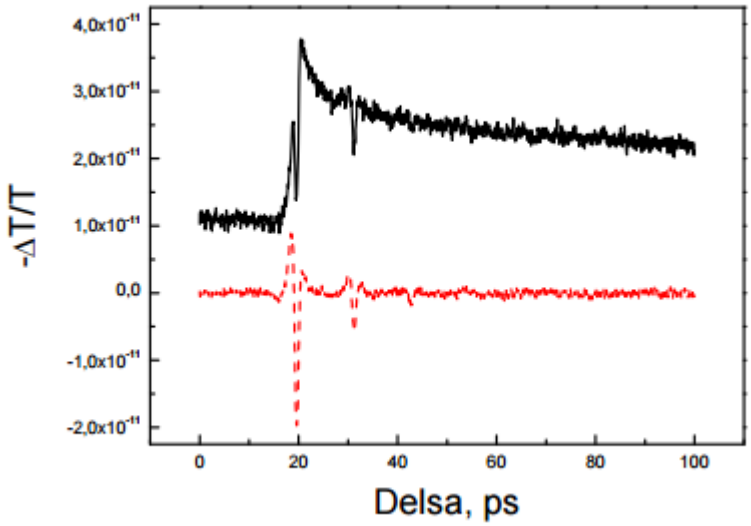
Optinio žadinimo - THz zondavimo eskperimento schema pavaizduota (2.6.1 pav.). Eksperimente naudota trijų pakopų lazerinė sistema. Ją sudarė lazerinių diodų matrica kaupinamas Nd: YAG "Verdi" lazeris, kurio antros harmonikos spinduliuote kaupinamas Ti: Safyro lazeris. Pastarojo bangos ilgis λ= 800 nm, impulso trukmė 150 fs.

Pasinaudojant optiniu poliarizatoriumi optinis impulsas padalinamas į tris skirtingos galios impulsus. Pirmas inicijuoja THz impulso generavimą emiteryje, antras trumpam laiko tarpui aktyvuoja terehercinį detektorių. Paskutinis sužadina krūvininkus tiriamajame bandinio paviršiuje. THz impulsų emiteris veikia optoelektroninės sklendės pagrindu. Apšvietus ją lazerio impulsu, optoelektroninė sklendė labai greitai pereina iš nelaidžios į laidžią būseną, o tai sąlygoja THz impulso išspinduliavimą. Toliau sugeneruota spinduliuotė link detektoriaus sklinda laisva erdve, o jos nukreipimui link detektoriaus naudojami teflloniniai lęšiai arba paraboliniai auksu padengti veidrodžiai.

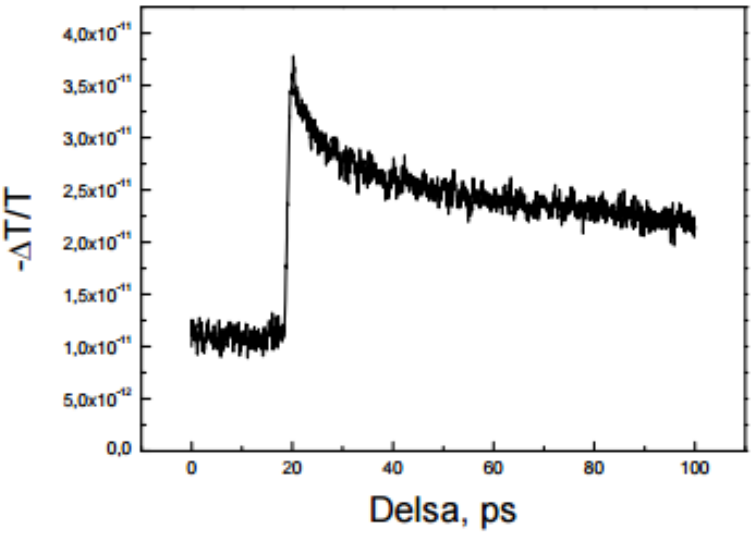


2.6.1 pav. Optinio žadinimo – terahercinio zondavimo schema su teflloniniais lęšiais.

THz impulsas išmatuojamas keičiant vėlinimą tarp emiterio ir detektoriaus žadinančiųjų lazerio impulsų. Sužadinus bandinį optine spinduliuote pasireiškia laisvakrūvė sugertis, kuri sumažina jo pralaidumą THz spinduliuotei. Naudotoje matavimo schemoje, nuskenavus laike THz impulsą, vėlinimo linija fiksuojama ties didžiausia THz signalo verte, malūnėlis perkeliamas iš pozicijos 1 į poziciją 2 ir įjungiama žadinančio pluošto vėlinimo linija. (2.6.2 pav.) matome išmatuotą tipišką puslaidininkinio bandinio sugerties THz bangoms kreivę (juoda spalva). Apačioj atidėta išmatuota kreivė išjungus THz emiterį (raudona spalva). Raudonoje kreivėje matomos smailės atsiranda dėl THz impulso generavimo bandinio paviršiuje. Tos pačios smailės matomos ir juodojoje kreivėje, nes joje susideda du signalai – THz emiterio impulso moduliacijos laisvakrūve sugertimi ir bandinio paviršiuje sugeneruoto THz impulso. Kadangi šie procesai tarpusavy nesusiję, paprastas kreivių atimties veiksmas (rezultatas pateiktas paveiksle žemiau) leidžia gauti krūvininkų sugertiems nulemtą bandinio pralaidumo kinetiką.

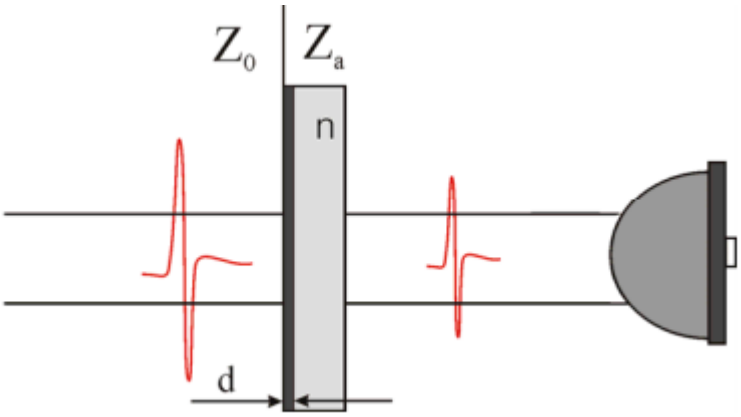


2.6.2 pav. Optiškai indukuoto THz impulso sugerties kitimas laike (juoda kreivė- THz impulso pralaidumo pokytis praėjus pro bandinį. Raudona kreivė- bandinio išspinduliuotas THz impulsas, išmatuotas uždengus THz emiterį žadinantį pluoštą)



2.6.3 pav. Optiškai indukuotas THz impulso sugerties kitimas laike įvertinus bandinio išspinduliuojamo THz impulso įtaką.

Kaip matuojamas bandinio pralaidumo pokytis susijęs su sugeneruotų krūvininkų parametrais? Galima laikyti, jog optinio impulso sužadinti laisvieji krūvininkai puslaidininkio paviršiuje sudaro d sluoksnio storį (2.6.4 pav.).



2.6.4 pav. THz spinduliuotės sklidimas oras – puslaidininkis riboje.

Norint išsiaiškinti kaip kinta paviršiaus pralaidumas THz spinduliuotei, reikia užsirašyti kraštines sąlygas elektromagnetinio lauko sklidimui:

$$\begin{cases} E_0 + E_r = E_t \\ H_0 - H_r = H_t + \eta \end{cases} \tag{2.6.1}$$

Čia užrašytos į bandinį krintančios, atsispindėjusios bei pro bandinį praėjusios spinduliuotės elektrinio bei magnetinio lauko amplitudės, kur η atitinka srovės tankį sužadintame sluoksnyje. Toliau galima pasinaudoti elektrinio ir magnetinio lauko stiprumo amplitudžių santykiu, kur dėl patogumo lygtį pertvarkome pagal elektrinio lauko amplitudę ir gauname:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} = Z_a \tag{2.6.2}$$

čia Z_a - bandinio banginė varža, kuri yra proporcinga mežiagos lūžio rodikliui, kuris yra lygus:

$$\frac{Z_0}{Z_a} = n \tag{2.6.3}$$

Reikia atsižvelgti ir į tai, jog mūsų turimos medžiagos yra nemagnetinės, todėl jų santykinė magnetinė skvarba yra lygi 1. Tuomet paviršinė srovė siejame su medžiagos laidumu:

$$\eta = jd = \sigma E_t d \tag{2.6.4}$$

Įstačius (2.6.2) ir (2.6.4) išraiškas į (2.6.1) gauname:

$$\begin{cases} E_0 + E_r = E_t \\ 1 + \frac{E_r}{E_0} - n\frac{E_t}{E_0} = Z_0\sigma d\,\frac{E_t}{E_0} \end{cases} \tag{2.6.5}$$

Įsivedus naujus kintamuosius:

$$\begin{aligned} &\frac{E_t}{E_0} = T \\ &\frac{E_r}{E_0} = R \\ &y = Z_0\sigma d \end{aligned} \tag{2.6.6}$$

čia T yra ribos tarp oro ir puslaidininkio pralaidumo koeficientas, o R - ribos oras puslaidininkis atsipindžio koeficientas.

Išsprendus šią lygtį yra gaunamas terahercinės spinduliuotės pralaidumo koeficientas atitinkamai prieš ir po sužadinimo:

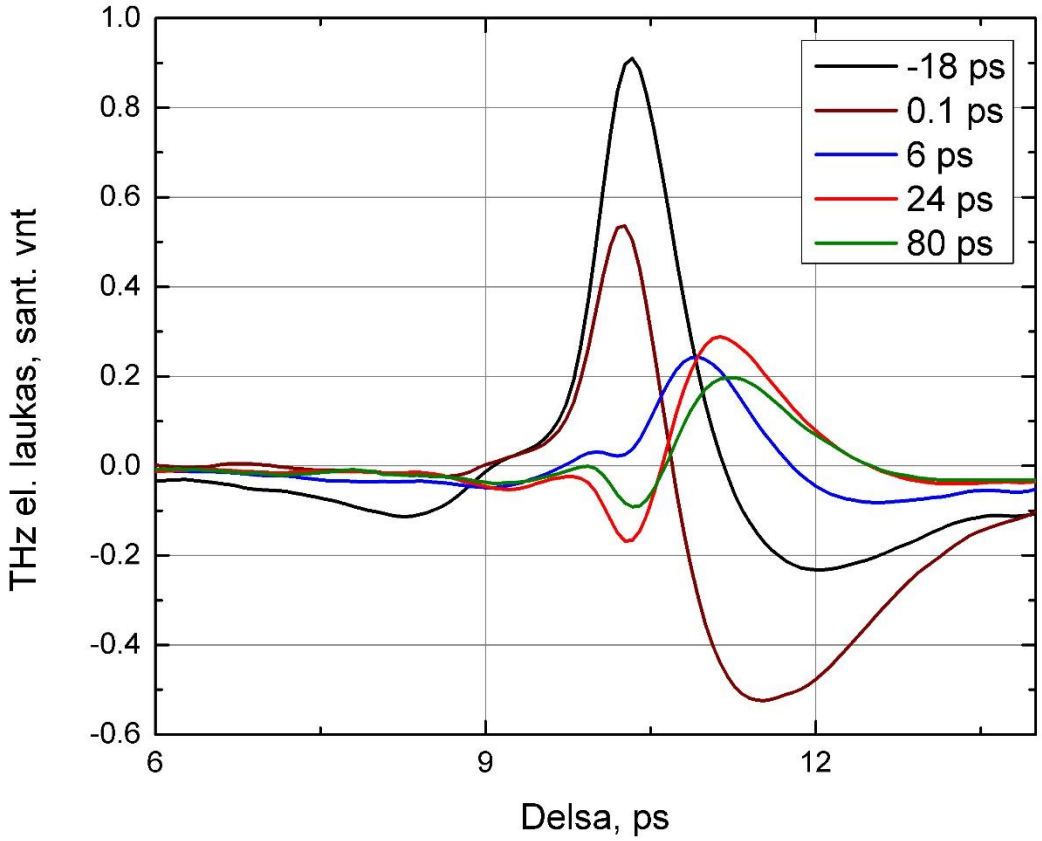
$$T_1 = \frac{2}{n+1+y}$$
$$T_0 = \frac{2}{n+1} \tag{2.6.7}$$

Toliau ieškomas THz spinduliuotės pralaidumo pokytis, kuris yra atitinkamai lygus:

$$-\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{Z_0 Ne\mu d}{1+n} \tag{2.6.8}$$

Gautas išraiška leidžia lengviau susieiti pralaidumo pokytį terahercinei spinduliuotei su tokiais svarbiais parametrais kaip krūvininkų tankis bei jų judris.

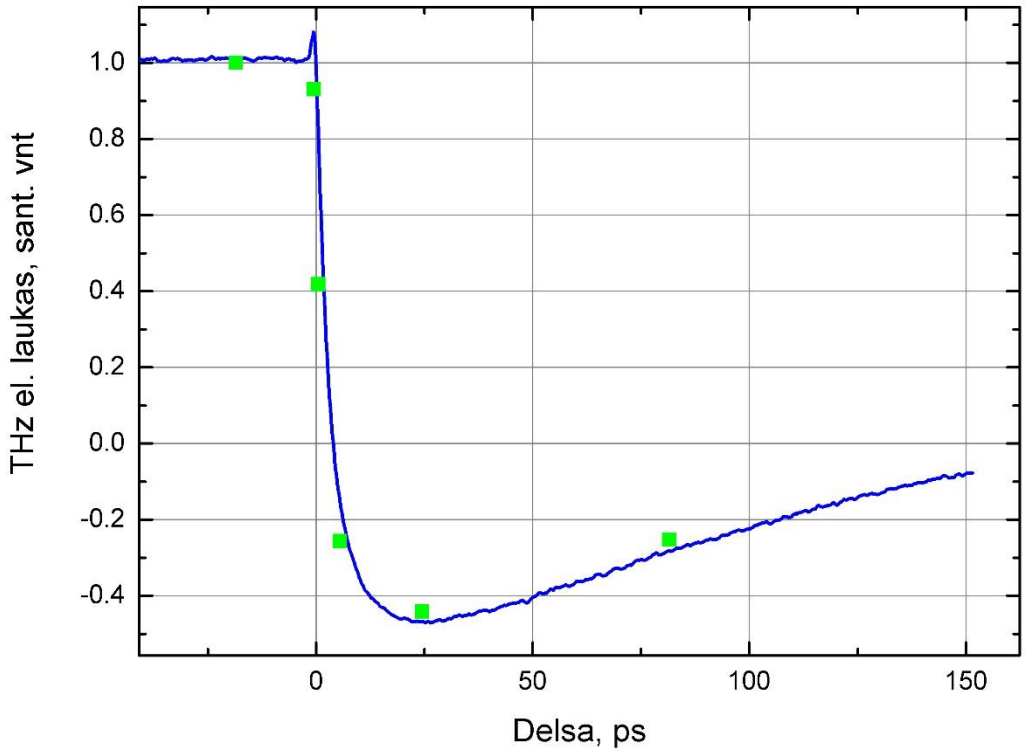
3. Eksperimento rezultatai



3.1 pav. THz impulsai sugeneruoti nuo didžiavaržio GaAs padėklo paviršiaus. Matome, kaip THz impulso forma priklauso nuo užvėlinimo tarp žadinančio ir THz impulsą generuojančio impulsų.

3.1 pav. matome THz impulsus, užregistruotus keičiant vėlinimo linijos prizmės VL1 padėtį. Skirtingi impulsai atitinka skirtingas VL2 prizmės padėtis. THz impulso amplitudės priklausomybė nuo užvėlinimo tarp žadinančio ir THz impulsą generuojančio impulsų išmatuota dviem būdais. Pirmuoju atveju prie skirtingų VL2 prizmės padėčių atliktas skenavimas VL1 prizme. Šio skenavimo rezultatus ir matome 3.1 pav. Atliekant matavimus antruoju būdu, VL1 prizmė fiksuojama padėtyje, kur išmatuojama didžiausia teigiama THz impulsų elektrinio lauko vertė ir atliekamas skenavimas keičiant VL2 prizmės padėtį. Po to VL1 prizmė fiksuojama padėtyje, kur išmatuojama didžiausia neigiama THz impulsų lauko vertė. Galų gale iš pirmosios skenavimo kreivės atimama antroji. Gautą rezultatą (ištisinę kreivę) matome 3.2 pav. Šiame paveiksle matomi taškai rodo 3.1 pav. atvaizduotų impulsų pilną amplitudę. Mokslinėje literatūroje ši amplitudė dar

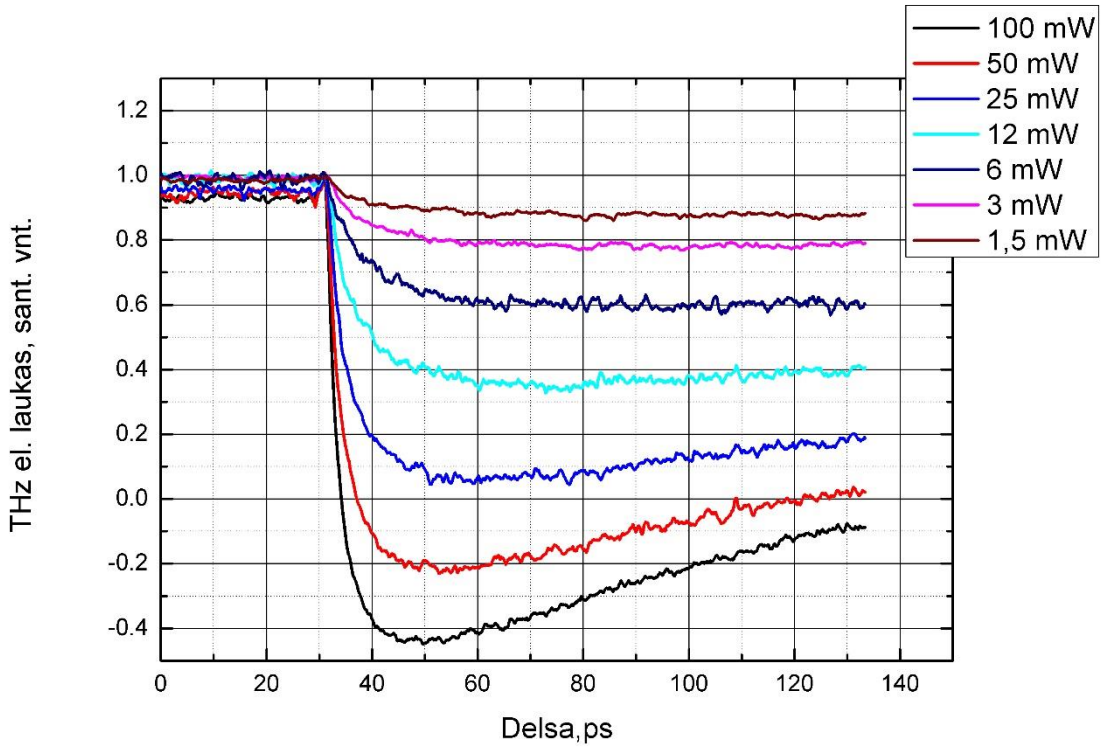
vadinama THz impulso *peak-to-valley* amplitude; ji rodo skirtumą tarp didžiausių teigiamos ir neigiamos THz impulso elektrinio lauko verčių. Su tam tikromis išlygomis galima laikyti, kad THz impulso *peak-to-valley* amplitudės kvadratas yra proporcingas THz impulso energijai. 3.2 pav. rodo, kad siekiant išsiaiškinti, kaip THz impulso amplitudė keičiasi po puslaidininkio sužadinimo papildomu (žadinančiu) impulsu, nebūtina matuoti viso THz impulso, užtenka stebėti impulso elektrinį lauką laiko momentais, kur THz impulso laukas pasižymi didžiausiomis teigiama ir neigiama vertėmis. Remiantis šia išvada tolesnis tyrimas atliktas naudojant tik ekonomiškesnį antrąjį būdą.



3.2 pav. THz impulso amplitudės priklausomybė nuo užvėlinimo tarp žadinančiojo ir THz impulsą generuojančio optinių impulsų.

Sekančiame darbo etape ištirta THz impulso emisijos efektyvumo dinamikos priklausomybė nuo žadinančio lazerio pluošto galios (3.3 pav.). Kaip matyti iš paveikslo, didžiavaržiame GaAs bandinyje sužadinus papildomus krūvininkus generuojamo THz impulso amplitudė sumažėja. Šis sumažėjimas įvyksta ne iškart, o praėjus kelioms pikosekundėms nuo papildomų krūvininkų sužadinimo. Didinant žadinančio pluošto galią THz impulso amplitudė gali ne tik smarkiai sumažėti - didesni sužadinimai nulemia THz impulso poliškumo pasikeitimą. Šis efektas dažniausiai reiškia,

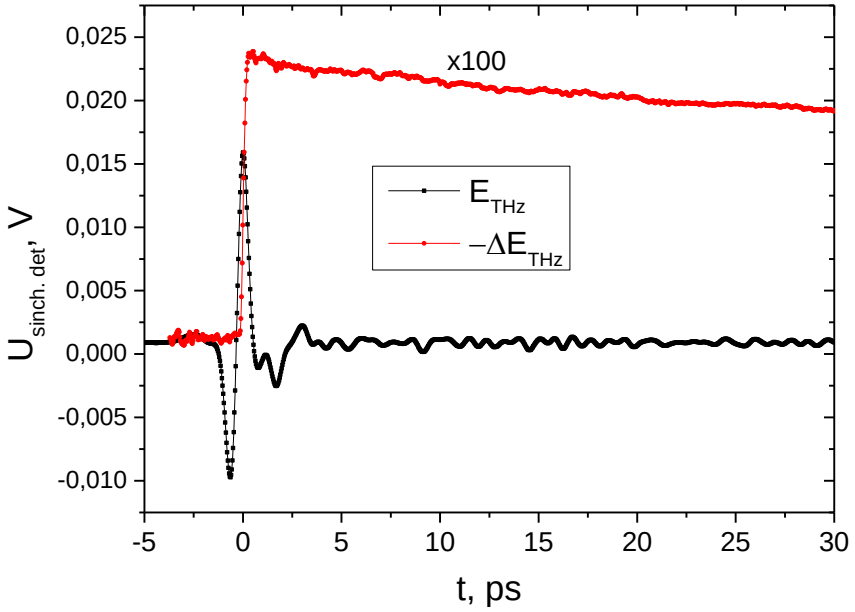
kad generuojant THz impulsą, medžiagoje susidaro priešingos krypties dipolis. Šis efektas buvo stebėtas lyginant THz impulsų generaciją iš n ir p tipo puslaidininkių, tačiau niekada nebuvo stebėtas atliekant optinio žadinimo - THz generavimo eksperimentą. Kitas įdomus eksperimento rezultatas paaiškėja įvertinus žadinančiu impulsu sugeneruotų krūvininkų porų tankį. Su 6 mW žadinančiu spinduliu buvo sužadinta maždaug 10^{15} cm^{-3} elektronų koncentracija, kuri THz impulso amplitudę sumažina maždaug du kartus.



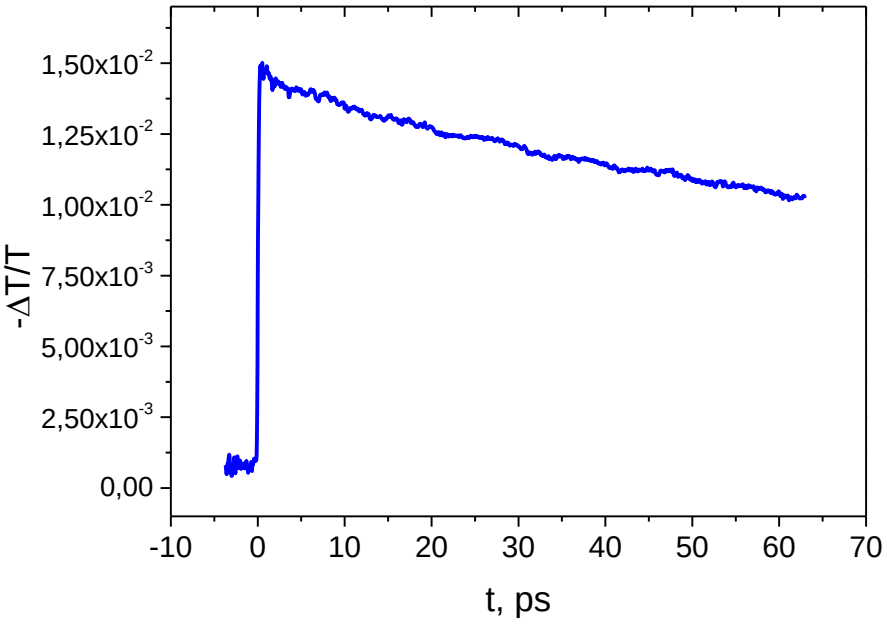
3.3 pav. THz signalo moduliacija keičiant žadinačiojo pluošto intensyvumą nuo 1,5 mW iki 100 mW.

Norint palyginti, kiek pavyksta sumažinti pro bandinį praeinančio THz impulso amplitudę, sukūrus elektronų ir skylių poras su tuo pačiu lazeriu tokiame pat bandinyje buvo atliktas optinio žadinimo ir THz zondavimo eksperimentas. Kadangi šios metodikos jautris – gerokai mažesnis, žadinančiu impulsu buvo sukurta 10^{16} cm^{-3}, o ne 10^{15} cm^{-3} krūvininkų koncentracija. 3.4 a) matome pro GaAs padėklą praėjusio THz impulso skleistinę (kai nėra optinio žadinimo) ir 100 kartų padidintą impulso amplitudės moduliaciją, sužadinus krūvininkų poras tiriamojo padėklo paviršiuje (optinis sužadinimas įvyksta laiko momentu t = 0 ps). 3.4 b) pav. parodytas iš moduliacijos kreivės apskaičiuotas bandinio santykinis pralaidumo pokytis. Moduliacijos kreivės amplitudė tiesiškai priklausė nuo žadinančio impulso energijos.

a)



b)



3.4. pav.. GaAs padėklo optinio žadinimo ir THz zondavimo rezultatai. b) – THz impulsas (juoda kreivė) ir 100 kartų padidintas impulso amplitudės pokytis bandinyje sužadinus krūvininkus (koncentracija - 10^{16} cm^{-3}); a – bandinio santykinio pralaidumo pokyčio kinetika.

Matome, kad GaAs padėkle THz impulso generacijos efektyvumą moduliuoti yra daug lengviau nei jau sugeneruoto THz impulso sugertį. Jei GaAs padėkle generuojant THz impulsus papildomai sužadinti 10^{15} cm^{-3} krūvininkų sumažina THz impulso amplitudę maždaug du kartus, tai dešimt kartų didesnė krūvininkų dozė moduliuoja THz impulso signalą kiek daugiau nei 1%. Taigi, moduliacijos efektyvumas skiriasi daugiau nei dviem eilėmis.

THz impulsai GaAs bandiniuose pagrinde generuojami dėl sužadintų krūvininkų atskyrimo paviršiniame lauke. Akivaizdu, kad šio lauko veikiami žadinančio optinio impulso sugeneruoti krūvininkai judės taip, kad ekranuotų paviršinį lauką, taip sumažindami THz emisijos, kurią generuoja vėliau ateinantis optinis impulsas, efektyvumą. THz emisijos efektyvumas gali sumažėti ir dėl THz impulso sugerties puslaidininkyje padidėjimo, tačiau, kaip rodo optinio žadinimo ir terahercinio zondavimo eksperimentai, laisvakrūvė sugertis yra per maža, kad paaiškintų didžiulius sugeneruoto THz impulso amplitudės pokyčius. Savo ruožtu, THz impulso invertavimui paaiškinti reikalingos gilesnės žinios apie žadinančiu impulsu sukurtų krūvininkų dinamiką. Šis efektas dar nebuvo paminėtas mokslinėje literatūroje, jį bus stengiamasi paaiškinti, atlikus papildomus eksperimentinius ir teorinius tyrimus.

Išvados

1. THz emisijos efektyvumo didžiavaržiame galio arsenide moduliavimui reikalingos žymiai mažesnės nepusiausviryjų krūvininkų koncentracijos nei THz impulso sugerties moduliavimui.

2. Galima pakeisti didžiavaržiame galio arsenide generuojamo THz impulso poliškumą. Tam reikalinga apie 10^{16} cm^{-3} krūvininkų porų koncentracija, sugeneruota papildomu lazerio impulsu.

Literatūros sąrašas

[1] B. B. Hu and M. C. Nuss, Opt. Lett., **20**, 1716 (1995).

[2] J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L. Canioni, I. ManekHönninger, P. Desbarats, P. Mounaix, J. Infrared Milli. Terahz. Waves, **35**, 382 (2014)

[3] E. Pickwell, V. P. Wallace, B. E. Cole, S. Ali, C. Longbottom, R. J. Lynch, M. Pepper, 14th International Conference on Teraherz Electronics, p. 578 (2006)

[4] Y. C. Shen, T. Lo, P.F. Taday, B. E. Cole, W. R. Tribe, and M. C. Kemp, Appl. Phys. Lett. **86**, 241116 (2005)

[5] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, D. Zimdars, Semicond. Sci. Techn., **20** S266- S280 (2005)

[6] G. Neugebauer, C. A. Beichman, B. T. Soifer, H. H. Aumann, T. J. Chester, T. N. Gautier, F. C. Gillett, M. G. Hauser, J. R. Houck, C. J. Lonsdale, F. J. Low, and E. T. Young, Science, **224**, 14 (1984).

[7] A. Hirata, H. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Kosugi, K. Murata, T. Nagatsuma, N. Kukutsu, and Y. Kado, J. Lightwave Technol., **26**, 2338 (2008).

[8] P.R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss, IEEE J. Quantum Electron., **24**, 255 (1988).

[9] T. Darrow, X.-C. Zhang, D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. **58**, 25 (1991).

[10] X.-C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow and D. H. Auston, Appl. Phys. Lett., **56**, 1011 (1990)

[11] V. Kažukauskas, Šiuolaikiniai puslaidininkių mikroelektronikos Prietaisai: Fizika ir technologijos, Progretus (2008).

[12] X.-C. Zhang, D. H. Auston, , J. T. Darrow, J. Appl. Ph0ys., **71**, 326 (1992)

[13] H. Dember, Phys. Z. **32**, 554 (1931)

[14] M. B. Johnston, D. M. Whittaker, A. Corchia, A. G. Davies, and E. H. Linfield, Phys. Rev. B, **65**, 165301 (2002)

[15] S. L. Chuang, S. Schmitt-Rink, B. I. Greence, P. N. Saeta, and A. F. J. Levi, Phys. Rev. Lett. **68**, 102 (1992)

[16] M. Tonouchi, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 pp. L 706–L 709 (2002)

[17] K. J. Siebert, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 3, 2004, pp. 1038–1043

[18] G. C. Loata, Appl. Phys. Lett. **90**, 052101 (2007)

[19] G. C. Loata, Appl. Phys. Lett. **91**, 232506 (2007)

[20] H. Murakami, Photon. Res. / Vol. 4, No. 3 June (2016)

[21] R. Adomavičius, Appl. Phys. Lett. **87**, 191104 (2005)

[22] V. K. Mag-Usara,Vol. 24, No. 23 OPTICS EXPRESS 14 Nov (2016)

[23] V. N. Trukhin, Lithuanian Journal of Physics, Vol. **54**, No. 1, pp. 41–45 (2014)

[24] A. Arlauskas, Nano Lett., 14, 1508−1514 (2014)

Žydrūnas Bautronis

The study of laser pulse controlled terahertz pulse generation in gallium arsenide

Summary

The THz region of the electromagnetic spectrum is the region between 0,1 and 10 THz. THz radiation. Like infrared and microwave radation, THz radation travels in a line of sight and is non-ionizing, can penetrate a wide variety of non-conducting materials and can pass through clothing, paper, plastic and ceramics. However, THz radiation has a limited penetration through a fog and cloud and cannot penetrate water or metal.

In the past decades, the popularity of this frequency range has rapidly grown up, in particular, applications of THz radiation from biomedical imaging to material science and security. As application arreas expanding, the need of THz source is growing. THz radiation sources have been developed using ultrafast laser sources to excite photoconductive switches, semiconductor surfaces and nonlinear processes. One of the typical methods converting infrared pulses to THz waves is an excitation of semiconductor surfaces by a femtosecond laser pulses. The is a big variety of physical mechanisms leading to this effect, such as, foto- Dember effect, ultrafast photocurrent surge in the surface electric field, optical rectification, EFIOR and others. Moreover, the effect of THz radiation from semiconductor surface can provide an unique information about physical properties of the radiating semiconductor itself.

The main goal of my work is to obtain new knowledge on electromagnetic THz pulse emission from GaAs surfaces excited by a femtosecond laser radiation. The experimental study was performed by means of THz probe emission technique. The experments target was an investigation of physical mechanism leading to the THz emission as well as to expand my understanding of electron inter- valley transfer dynamics.

In conclusion, the information about efficcient THz emission from the surface of GaAs excited by femtosecond laser pulses was acquired . It has been concluded from the analysis of the experiments that this emmision is caused mostly by the foto-Dember effect and utrafast photocurrent surge in the surface electric field and the polarity changes of THz signal was observed, however, the main factor who led to this phenomen has not been revealed.