

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Domantas Vizbaras

**NETIESINIS GRAFENO LAUKO TRANZISTORINIŲ TERAHERCŲ DETEKTORIŲ
ATSAKAS Į FEMTOSEKUNDINIUS TERAHERCŲ IMPULSUS**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijų
studijų programa

Studentas

Domantas Vizbaras

Leista ginti

2024-05-23

Darbo vadovas

dr. Kęstutis Ikamas

Konsultantas

prof. dr. Alvydas Lisauskas

Instituto direktorius

prof. dr. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2024

Turinys

Įvadas	3
1 Grafenas, grafeno lauko tranzistoriai ir terahercų detektoriai	4
1.1 Krūvininkų pernaša grafeno lauko tranzistoriuose	4
1.2 GFET struktūra, THz detektorių gamyba	6
1.3 GFET mažo signalo modelis	8
1.4 THz spinduliuotės detekcija	10
1.5 THz detektorių modeliavimas	11
1.6 Grafeno elektrinių charakteristikų netiesiškumas	12
2 GFET terahercų detektorių modeliavimas ir atsakų netiesiškumo tyrimo metodika	14
2.1 GFET modeliavimo metodika	14
2.2 THz detektorių antenų modeliavimo metodika	16
2.3 Netiesinių GFET THz detektoriaus atsakų tyrimo metodika	19
3 Modeliavimo ir netiesinio GFET atsako į THz spinduliuotę matavimo rezultatai	24
3.1 Sumodeliuota GFET kanalo varža	24
3.2 Sumodeliuotos THz detektorių antenų charakteristikos	26
3.3 Pamatuotas femtosekundinis THz impulsas	30
3.4 Pamatuotas netiesinis GFET THz detektorių atsakas	30
3.5 Tolimesni darbai	33
Išvados	35
Literatūra	36
Abstract	40
Bibliografinis aprašas	40
Anotacija	40

Įvadas

Grafeno lauko tranzistorių (GFET) terahercų (THz) prietaisai yra nuolat tobulinami ir palaipsniui vejasi Si THz technologijas [1]. Mažas tokių prietaisų dydis leidžia juos naudoti įvairiose srityse: duomenų perdavimo sistemose [2], medicinoje [3], saugos sistemose [4], dujų ir skysčių sudėties analizėje [5]. GFET prietaisų tobulinimas apima grafeno ir pačių GFET gamybos gerinimą. Naujos technologijos ir esamų tobulinimas prasideda nuo idėjų kūrimo ir modeliavimo. O tranzistorinių THz prietaisų srityje, pirmiausia svarbu žinoti ne tik tranzistoriaus, bet ir antenos bei viso prietaiso veikimo principus.

THz detektoriai su grafeno tranzistoriais pasirinkti dėl grafeno ypatybių. Eksfolijuoto grafeno GFET krūvininkų judris elektronams siekia iki $60000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [6], o sparčiai elektronikai svarbus grafeno krūvininkų soties greitis yra labai artimas Fermi greičiui ($v_F = 10^6 \text{ m/s}$) [7]. Tačiau grafenas dar nėra pilnai ištirta medžiaga, jo GFET gamyba nėra paprasta, o fizinės savybės tiriamos sunkiai. Todėl svarbu toliau vystyti grafeno fiziką ir kurti jo prietaisų modelius.

Pastarųjų 10 metų laikotarpiu buvo parodyta, kad grafenas turi įvairių netiesinių savybių optinių ir infraraudonųjų bangų spinduliuotės ribose [8]. Prieš keletą metų tyrimai perėjo ir į THz dažnių ruožą [9]. Buvo pademonstruota net 7-os harmonikos (2,1 THz) generacija kambario temperatūroje, apšvitinus grafeną THz spinduliuote [10]. Tai atveria naujas fizikos sritis, kurias galima pritaikyti aukštadažnės THz spinduliuotės šaltiniams, išnaudojant aukštesnių harmonikų generaciją [11], aukštadažniam maišymui [12], THz laikinei spektroskopijai [13].

Šio darbo tikslas: ištirti netiesinį terahercų detektoriaus su grafeno lauko tranzistoriais ir paviršinėmis antenomis, atsaką į femtosekundinį terahercų impulsą, matuojant signalo autokoreliaciją.

1 Grafenas, grafeno lauko tranzistoriai ir terahercų detektoriai

THz srityje GFET detektoriai nenusileidžia Si CMOS ar GaAs technologijoms [4], kas tik didina grafeno taikymo elektronikoje galimybes. Tačiau norint kurti ir tobulinti tokias technologijas, reikia nuo kažko pradėti. Svarbu suprasti, iš kur atsiranda įvairios grafeno savybės, kad būtų galima jas panaudoti. Patikrinti, ar sugalvotos teorijos yra teisingos, padeda prietaisų modeliavimas.

1.1 Krūvininkų pernaša grafeno lauko tranzistoriuose

Grafenas yra anglies alotropas – vienas grafito sluoksnis, kuriame anglies atomai išsidėstę 2D heksagoninėje gardelėje. Grafenas ypatingas tuo, kad jo valentinės ir laidumo juostos, dar vadinamos π ir π^* juostomis, susitinka Brillouin'o zonos kampuose. Tai padaro grafeną nulinio draustinių energijų tarpo medžiaga [14], suteikiančia unikalių mechaninių, optinių ir elektroninių savybių. Sparčiai elektronikai svarbus grafeno krūvininkų soties greitis yra artimas Fermi greičiui ($v_F = 10^6$ m/s) [7]. Laisvame grafene krūvininkų judris siekia net $200000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [15], o eksfoliuoto grafeno, uždaryto tarp h-BN sluoksnių [16] [17] [18], elektronų judris gali pasiekti $60000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ kambario temperatūroje [6]. Ši vertė yra mažesnė už laisvo grafeno, nes, uždarius grafeną į 3D struktūrą, krūvininkai sklaidomi optiniais fononais [19] ir joninėmis priemonėmis [20]. Tai taip pat priklauso nuo grafeno kokybės – struktūrinių defektų, todėl CVD grafeno krūvininkų judris tipiškai yra dar eile mažesnis [21].

Kadangi grafenas yra 2D medžiaga, jo energijų lygmenys ir būsenų tankis aprašomi kitaip nei 3D medžiagose. Vienasluoksniui grafenui netinka tipinis Schrödinger'io lygties sprendinys dalelėms be sukinio, todėl būsenų tankiui aprašyti buvo pritaikyta reliatyvistinė Dirako lygtis krūvį turinčioms dalelėms su dviem pusiniais sukiniais [22, 30 p.]. Įskaičiavus K slėnio išsigimimą ir pseudo sukinį, buvo išvesta 2D būsenų tankio lygtis [22, 74 p.]:

$$g_{2D}(\varepsilon) = \frac{2|\varepsilon|}{\pi\hbar^2 v_F^2}, \quad (1)$$

čia $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – Dirako konstanta (h – Planko konstanta), ε – būsenos energija.

Suintegravus būsenų tankio ir Fermi-Dirako funkcijas, gaunamas krūvininkų tankis (e – elektronų, h – skylių) [22, 74 p.]:

$$\int_0^\infty g_{2D}(\varepsilon) f_{FD}(\varepsilon - \xi) d\varepsilon = n_h(\xi) = n_e(-\xi) = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{k_B T}{\hbar v_F} \right)^2 \text{Li}_2 \left(-e^{-\frac{\xi}{k_B T}} \right), \quad (2)$$

čia ξ – cheminis potencialas, k_B – Bolcmano konstanta, T – temperatūra. Grafeno krūvininkų tankis yra aprašomas dilogaritmo funkcija (polilogaritmo funkcija: $\text{Li}_s(z) = \sum_{k=1}^\infty \frac{z^k}{k^s}$, $|z| < 1$; kai $s = 2$, $\text{Li}_2(z) = -\int_0^z \frac{\ln(1-u)}{u} du$, kai $z \in \mathbb{C} \setminus [1, \infty)$). Kadangi ši funkcija yra begalinė, nėra patogu su ja dirbti. Programos, tokios kaip „MathWorks MATLAB“, gali šią funkciją gerai įvertinti skaitmeniškai, tačiau, jei skaičiavimus norima atlikti kitokioje aplinkoje ar modeliavimo programoje, naudojančioje tik analitines funkcijas, svarbu rasti gerą funkcijos analitinį analogą. Žinant

krūvininkų tankius, patogiu apibrėžti krūvininkų disbalansą n_S ir bendrą krūvininkų tankį N_S :

$$n_S = n_e - n_h = \frac{2}{\pi} \left(\frac{k_B T}{\hbar v_F} \right)^2 \left[\text{Li}_2 \left(-e^{-\frac{\xi}{k_B T}} \right) - \text{Li}_2 \left(-e^{\frac{\xi}{k_B T}} \right) \right], \quad (3)$$

$$N_S = n_e + n_h = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{k_B T}{\hbar v_F} \right)^2 \left[\text{Li}_2 \left(-e^{-\frac{\xi}{k_B T}} \right) + \text{Li}_2 \left(-e^{\frac{\xi}{k_B T}} \right) \right]. \quad (4)$$

Modeliuojant puslaidininkių elektroniką svarbu žinoti puslaidininkio krūvininkų efektinę masę. Kadangi vienasluoksnis grafenas neturi energijos juostų draustinio tarpo, skaičiuojant efektinę masę iš kinetinės energijos, gaunama, kad ji taip pat yra nulis. Kadangi tai prieštarauja energijos tvermės dėsniui, buvo atrasta, kad grafeno krūvininkų efektinė masė priklauso nuo krūvininkų tankio ir yra vadinama ciklotronine mase [22, 41 p.]:

$$m^* = \frac{\varepsilon_F}{v_F^2} = \frac{\sqrt{n\pi}}{v_F}, \quad (5)$$

kur ε_F yra Fermi energija, n - krūvininkų tankis. Krūvininkų tankio ir užtūros įtampos sąryšį galima atrasti per Fermi energiją. Jos lygmenį GFET galima valdyti užtūros įtampa, ir tą priklausomybę galima užrašyti šitaip [22, 84 p.]:

$$\varepsilon_F = \sqrt{m^2 \varepsilon_\alpha^2 + 2\varepsilon_\alpha q V_G} - m\varepsilon_\alpha, \quad (6)$$

čia q – elektrono krūvis, V_G – užtūros įtampa, $m = 1 + \frac{C_{it}}{C_{ox}}$ – faktorius priklausantis nuo užtūros oksido talpos (C_{ox}) ir užtūros-grafeno sandūros krūvininkų gaudyklių parazitinės talpos (C_{it}), o ε_α – idealumo faktorius. Toliau skaičiavimuose $C_{it} = 0$, o $m = 1$. Taip nuspręsta padaryti todėl, kad parazitinė talpa yra daug mažesnė už oksido ir ją yra sunku įsivertinti neatliekant matavimų. Idealumo faktorius yra apibrėžiamas taip:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_{ox} \hbar v_F}{8d_{ox} \alpha_G}, \quad (7)$$

$$\alpha_G = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon_0 \hbar v_F}. \quad (8)$$

Kur α_G dar žinoma kaip smulkiosios sandaros konstanta, ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, ε_{ox} – užtūros dielektriko dielektrinė skvarba, d_{ox} – dielektriko storis.

Remiantis (5) ir (6), galima nustatyti GFET užtūros įtampos priklausomybę nuo tankio:

$$n_S(V_G) = \frac{\varepsilon_F^2}{\pi} = \frac{\left(\sqrt{\varepsilon_\alpha^2 + 2\varepsilon_\alpha q V_G} - \varepsilon_\alpha \right)^2}{\pi}. \quad (9)$$

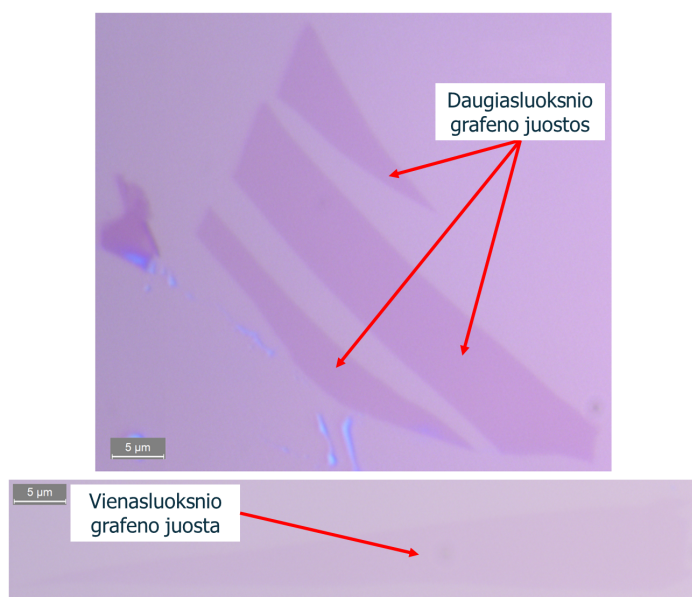
Naudojant (3), užtūros įtampa gali būti susieta su grafeno cheminiu potencialu. Tai būtina norint įvertinti atskirus krūvininkų tankius ir apskaičiuoti parazitinę, kvantinę užtūros talpą. Kaip minėta, dėl Dilogaritmo funkcijos, $n_S(V_G)$ ir ξ sąryšis nustatytas skaitmeniškai.

1.2 GFET struktūra, THz detektorių gamyba

GFET gamyba prasideda nuo grafeno pasirinkimo. Vyrauja du pagrindiniai grafeno gamybos būdai: eksfoliacija ir nusodinimas iš cheminių garų fazės (CVD) [23]. Pastarasis metodas jau komercializuotas. Vienaluoksnį, dvisluoksnį ir daugiasluoksnį grafeną galima gaminti dideliais kiekiais ir įsigyti ne tik ant auginimo substrato (dažniausiai Cu arba Si), bet ir paruoštą lengvam perkėlimui [24] [25].

Eksfoliuotas grafenas pasižymi keliais pagrindiniais skirtumais. Jį pasigaminti techniškai yra lengviau, naudojant lipnios juostos metodą (angl. *scotch tape method*). Lipni juosta prilipinama prie aukštos kokybės grafito dribsnių ir nuplėšiamas daugiasluoksnis grafeno pluoštas, kuris toliau plėšomas, kol juosta pasidengia grafeno pluošteliais. Tačiau šis metodas turi didelių trūkumų - mažą išeigą ir pakartojamumą. Vos keletas iš tūkstančio pluoštelių bus vienasluoksniai ar dvisluoksniai, kelių dešimčių mikrometrų ilgio ir pločio, ir tik keletas iš jų bus be akivaizdžių defektų.

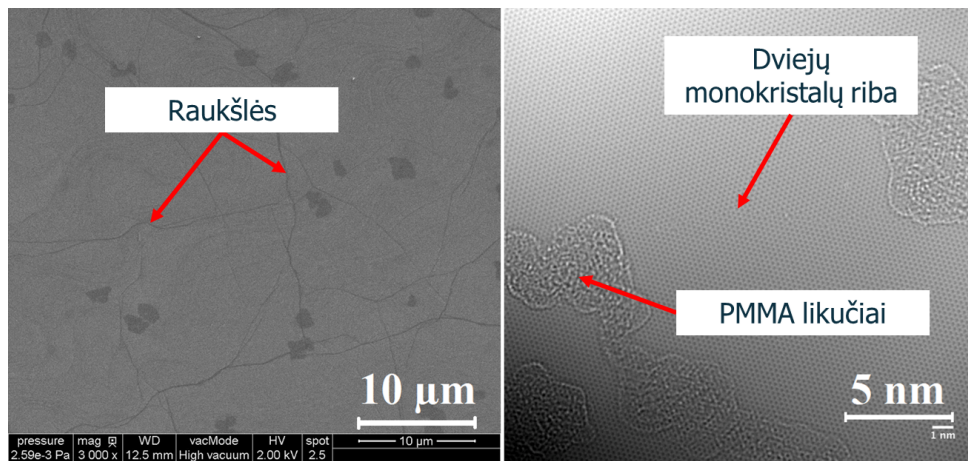
Nepaisant to, eksfoliuotas grafenas pasižymi aukštesne kokybe lyginant su CVD grafenu, kuris yra polikristalinis ir gamybos bei pernešimo metu gali būti legiruotas ar padengtas šiukšlėmis (1 ir 2 pav.). Abu grafeno variantai turi savo privalumų ir trūkumų, o gamybos metodo pasirinkimas priklauso nuo taikymo įrenginių.



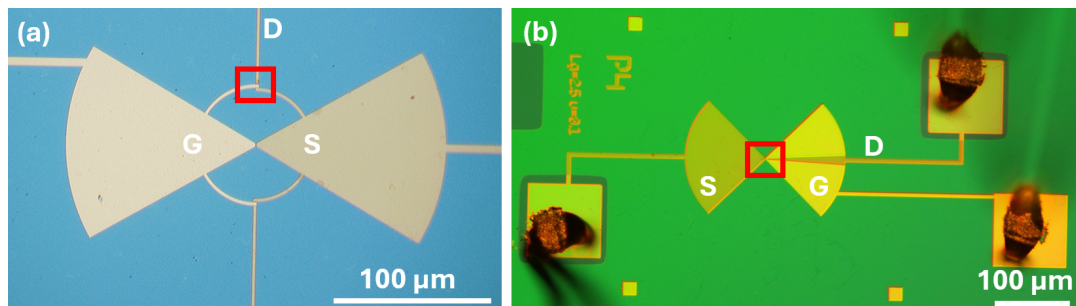
1 pav. Eksfoliuoto vienasluoksnio (apačioje) ir daugiasluoksnio (viršuje) grafeno juostos.

Šiame darbe tirti kelių tipų GFET THz detektoriai (3 pav.) pagaminti Suomijoje, „VTT Techninių tyrimų centre“, dr. A.A. Generalov'o grupėje. Detektoriams gaminti buvo naudojamas CVD grafenas. GFET buvo gaminami taikant elektronų pluošto litografiją ir atominių sluoksnių nusodinimą (ASN), taikant vadinamąjį viršus-žemyn metodą (angl. *top down approach*). Bendra gamybos schema pateikta 4 paveiksle (detalus gamybos procesas aprašytas literatūroje [26]).

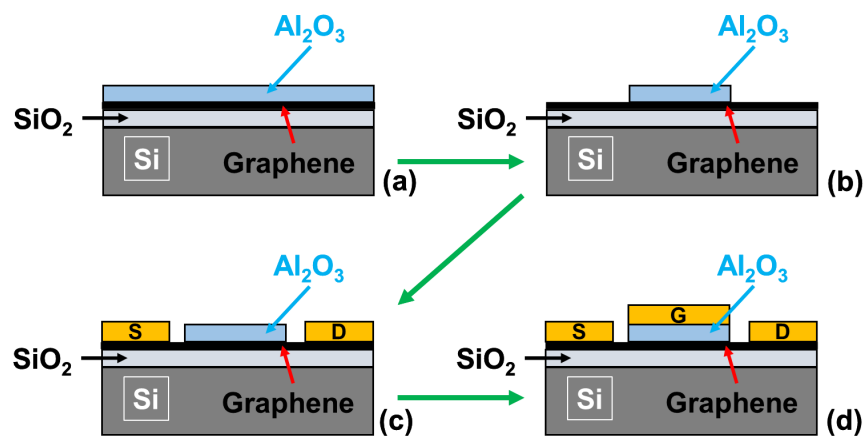
Pirmiausia, CVD grafenas pernešamas ant nelegiruoto (šio darbo atveju) arba silpnai skylėmis legiruoto (*p* tipo) Si substrato. Jei substratas legiruotas, galima suformuoti ir apatinę tranzistoriaus užtūrą. Perneštas grafenas formuojamas į kanalo formą. Dėl mažų kanalo matmenų (keli mikrometrai) naudojama elektronų pluošto litografija. Kaukė formuojama iš polimetilmetakrilato (PMMA),



2 pav. Vienasluoksnis CVD grafenas ir jo defektai [24].



3 pav. Tirtų THz detektorių antenos su pažymėtomis GFET vietomis (raudoni stačiakampiai): (a) detektorius su padidinto impedanso BT, (b) detektorius su paprasta BT antena. Raidės žymi transistoriaus metalus: S - ištaka, D - santaka, G - uztūra.



4 pav. GFET gamybos procesas: (a) ant SiO_2 padėklo su grafenu užauginamas dielektriko sluoksnis, (b) dielektriko sluoksnis suformuojamas į uztūrą, (c) užauginami santakos ir ištakos metalai (šiuo atveju Au), (d) užauginamas uztūros metalas [26].

kuris tinka grafeno formavimui dėl geros adhezijos ir lengvo nuvalymo acetonu, nepažeidžiant grafeno.

Tada užauginamas dielektriko sluoksnis. Grafenui tinka keletas dielektrikų, dažniausiai SiO_2 , labai gerus rezultatus duoda heksagoninis Boro nitridas (h-BN) [6], arba šiame darbe naudotas Al_2O_3 . Tiesiogiai auginti Al_2O_3 nėra paprasta, nes jis nelimpa prie Si substrato, todėl pirma nu-

sodinamas nanometrinis Al sluoksnis, kuris vėliau oksiduojamas deguonies plazma. Ant šio užuomazginio sluoksnio jau galima tiesiogiai auginti Al_2O_3 .

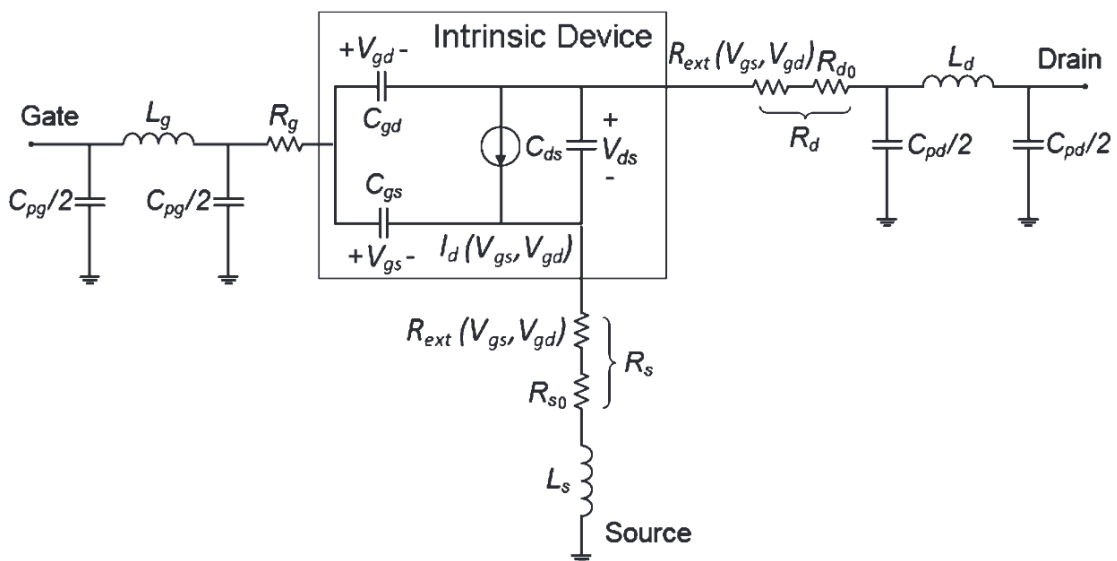
Dielektriko storis priklauso nuo jo dielektrinės konstantos ir reikalingų tranzistoriaus charakteristikų, kurios aprašytos GFET modeliavimo skyriuje. Dielektrikas dengiantis kontaktų vietas yra nuėsdinamas, tada formuojamos paviršinės antenos ir kontaktiniai metalai. Šiame darbe bandiniams suformuotos plačiajuostės, paprasta ir padidinto impedanso peteliškės (BT) tipo antenos (3 pav.).

GFET kanalo ilgis (L) ir plotis (W) yra atitinkamai $2,5 \times 2 \mu\text{m}$ ir $2 \times 2 \mu\text{m}$. Pasirinktas Al_2O_3 sluoksnis yra 18 nm storio, nes jis apsaugo GFET nuo vandens ir kitų gamyboje naudojamų skysčių įgėrinių (angl. *adsorbates*) [26]. Antenos suformuotos pirmiausia užauginant kelių dešimčių nanometrų Ti sluoksnį geresnei adhezijai su grafenu, o ant Ti sluoksnio užaugintas 200 nm storio Au sluoksnis dėl atsparumo korozijai ir aplinkos poveikiui. Antenų skersmuo yra $240 \mu\text{m}$, kad detektoriai veiktų 250-500 GHz dažnių ruože, apie tai daugiau antenų modeliavimo skyriuje.

1.3 GFET mažo signalo modelis

Vienas iš būdų įvertinti GFET kokybę yra pamatuoti bandinių statines volt-amperines (IV) charakteristikas. Pritaikius modeliavimo metodą, galima apskaičiuoti grafeno krūvininkų judrį, kontaktines varžas ir net įvertinti įtaiso parazitinius elementus. Modeliavimas prasideda nuo GFET ekvivalentinės grandinės, kuri pateikta 5 paveiksle.

Čia pavaizduota tranzistoriaus vidinė struktūra (angl. *intrinsic device*), kur C_{gd} ir C_{gs} yra talpos tarp užtūros ir santakos bei ištakos, atitinkamai. R_d ir R_s yra santakos ir ištakos, o R_0 – grafeno-metalo kontaktinės varžos. Taip pat parodytos įvairios parazitinės kanalo talpos ir indukciniai elementai, į kuriuos šiame darbe neatsižvelgiama, tačiau jie yra svarbūs apjungiant tranzistoriaus ir THz detektoriaus modelius.



5 pav. GFET ekvivalentinė elektroninė grandinė [21].

Talpos C_{gd} ir C_{gs} prisideda prie bendros užtūros talpos, tačiau grandinėje nepavaizduota nuosekliai joms prijungta vadinamoji kvantinė talpa (C_q), kylanti iš krūvininkų kiekio ir cheminio

potencialo variacijų [27] [22, 76 p.]:

$$\frac{dn_e}{d\mu} = \frac{2}{\pi} \frac{k_B T}{(\hbar v_F)^2} \ln \left(1 + e^{\frac{\mu}{k_B T}} \right), \quad (10)$$

$$\frac{dn_h}{d\mu} = -\frac{2}{\pi} \frac{k_B T}{(\hbar v_F)^2} \ln \left(1 + e^{-\frac{\mu}{k_B T}} \right), \quad (11)$$

$$C_q = q^2 \frac{dn_S}{d\mu} = \frac{2k_B T}{\pi} \left(\frac{q}{\hbar v_F} \right)^2 \ln \left(2 + 2 \cosh \left(\frac{\mu}{k_B T} \right) \right). \quad (12)$$

Čia q - elementarus krūvis. Ji dažnai praleidžiama, nes paprastai yra daug didesnė už oksido talpą, tačiau šiuo atveju ją nesunku apskaičiuoti iš krūvininkų tankių. Bendrą užtūros talpą galima išreikšti taip:

$$C_G = \frac{C_{ox} C_q}{C_{ox} + C_q}, \quad (13)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}}. \quad (14)$$

Ši talpa bus reikalinga skaičiuojant GFET tekančią srovę ir jo kanalo laidį ar varžą.

Norint sumodeliuoti srovę, tekančią GFET kanalu, reikia atsižvelgti į Dirako taško poslinkį, kurį sukelia priemaišiniai krūvininkai ir įgėriniai [19]. Tai padarius, srovė kanale yra apibrėžiama taip [21]:

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_{e/h} Q_0 V_D \sqrt{1 + \frac{|V_G - V_{Dirac}|^2}{V_0^2}}, \quad (15)$$

čia W – GFET kanalo plotis, L – kanalo ilgis, μ – elektronų arba skylių judris, Q_0 – liekamas krūvis, V_0 – liekamojo krūvio sukurta įtampa ($V_0 = Q_0/C_G$). Ši formulė buvo išbandyta ir aprašyta antro kurso magistrantūros mokslo tiriamajame darbe, tačiau ji turi nemažai apribojimų ir trūkumų.

Pirmiausia, toks srovės aprašymas galioja tik virš arba žemiau Dirako taško, darant prielaidą, kad pernašoje dalyvauja tik elektronai ($V_G > V_{Dirac}$) arba skylės ($V_G < V_{Dirac}$). Taip pat reikalaujama, kad kanalo srovė būtų daug mažesnė už užtūros ($V_D \ll V_G$), todėl artėjant prie Dirako taško modelio paklaida padidėja. Tai galima pakeisti įvertinus krūvininkų tankius, tada formulę galima perrašyti:

$$I_D = I_e + I_h = \frac{W}{L} \mu \frac{\mu_e n_e + \mu_h n_h}{N_S} C_G V_D \sqrt{V_0^2 + (V_G - V_{Dirac})^2}. \quad (16)$$

Tada statinė detektoriaus kanalo varža susidedanti iš kontaktinės caržos (R_0) ir statinės GFET kanalo varžos (R_{CH}) yra:

$$R_{DC} = R_0 + R_{CH} = R_0 + \frac{V_D}{I_D} = \frac{L}{W C_G} \frac{N_S}{\mu_e n_e + \mu_h n_h} \frac{1}{\sqrt{V_0^2 + (V_G - V_{Dirac})^2}} + R_0. \quad (17)$$

Siekiant užtikrinti modelio tolydumą, būtina pasirūpinti, kad vardiklyje nebūtų 0. Tai neturėtų įvykti dėl V_0 apibrėžimo kaip liekamojo krūvio sukeltos įtampos, kuri leidžia srovei tekėti GFET net tranzistoriui esant Dirako taške. Be to, nepakanka vertinti Dirako taško poslinkį vien kaip $(V_G - V_{Dirac})$. Dirako taške vyksta elektronų ir skylių balansas, o krūvininkų tankiai priklauso

nuo užtūros įtampos. Svarbu pastebėti, kad grafeno kanalo varža priklauso ir nuo įtampos kanale, nors tai modelyje tiesiogiai neįvertinta. Tačiau kanalo įtampa tiesiogiai veikia Dirako taško užtūros įtampą.

Dėl šių priežasčių buvo nuspręsta paslinkti krūvininkų tankio disbalanso n_S nulinį tašką link užtūros įtampos, atitinkančios Dirako tašką, padidinant reikiamų krūvininkų kiekį. Šis sprendimas pagerino modelio tikslumą, o pridėtus papildomus krūvininkus galima paaiškinti grafeno legiracija [28]. Tai taip pat leidžia modeliui veikti didelio signalo atveju, kai kanalo įtampa yra panaši į užtūros įtampą.

1.4 THz spinduliuotės detekcija

Darbe tirti tranzistoriniai THz detektoriai. Elektromagnetinės spinduliuotės detekcija vyksta dažniuose, kurie viršija aktyviųjų elementų - tranzistorių, ribinius dažnius (f_{max} ir f_T). Todėl klasikiniai signalų detekcijos lauko tranzistoriais modeliai netinka THz signalų detekcijos aprašymui [29]. Kai dažniai viršija 100 GHz ir (arba) tranzistorių matmenys yra mažesni nei 0,5 μm , dažnai naudojamas Diakonov'o ir Shur'o hidrodinaminio krūvininkų transporto modelis [30].

Tranzistorinių THz detektorių veikimo principas aiškinamas kaip dvimačių elektronų dujų (2DEG) reakcija į THz spinduliuotę, esančių tranzistoriaus kanalo puslaidininkio ir užtūros dielektriko sandūroje. THz impulsas sužadina 2DEG virpesius. Kad detektoriai veiktų, žadinimas turi būti vykdomas asimetriškai kanalo atžvilgiu, t.y., žadinama tik viena kanalo pusė. Tokiu atveju susigeneravusi 2DEG banga gali keliauti per tranzistoriaus kanalą.

Banga paprastai gęsta dėl elektronų sklaidos. Priklausomai nuo kanalo matmenų, galimi keturi detektoriaus veikos režimai: plazmoninio maišymo, rezonansinio plazmoninio maišymo, signalų maišymo paskirstytų varžų grandinėje ir klasikinis varžinis maišymas [29]. Vienas detektorius gali veikti skirtingose veikose, priklausomai nuo THz spinduliuotės dažnio.

Atlikta plazmoninio maišymo harmoninė analizė [31] parodė, kad tranzistorinių THz detektorių atsakas nekinta laike. Vyksta vadinamasis lyginimo reiškinys (angl. *rectification, self-mixing*). Išlygintas atsakas yra proporcingas THz signalo galiai, o proporcingumo koeficientas vadinamas jautriu ($\mathfrak{R}_V [V/W]$). Įskaitant ir detektoriaus antenos parametrus, jautris aprašomas taip [31]:

$$\mathfrak{R}_V = \frac{V_A}{P_0 \cdot R_{DC}} = \frac{q f(\omega, \tau)}{4 s^2 m^*} \cdot \frac{8 \eta H_V^2 \text{Re}(Z)}{R_{DC}}. \quad (18)$$

Čia V_A - detektoriaus atsakas, P_0 - THz galia, $f(\omega, \tau)$ - efektyvumo faktorius, s - plazminis greitis, m^* - santykinė krūvininkų masė (elektrono rimties masei), η - nuostoliai dėl antenos ir tranzistoriaus impedanso nesuderinamumo bei optinių nuostolių, H_V - įtampos silpninimas signalui pereinant iš antenos į tranzistoriaus kanalą, Z - antenos impedansas.

Be jautrio, svarbi detektorių charakteristika yra mažiausia pamatuojama signalo galia, vadinama ekvivalentine triukšmo galia:

$$NEP = \frac{V_T}{\mathfrak{R}_V}. \quad (19)$$

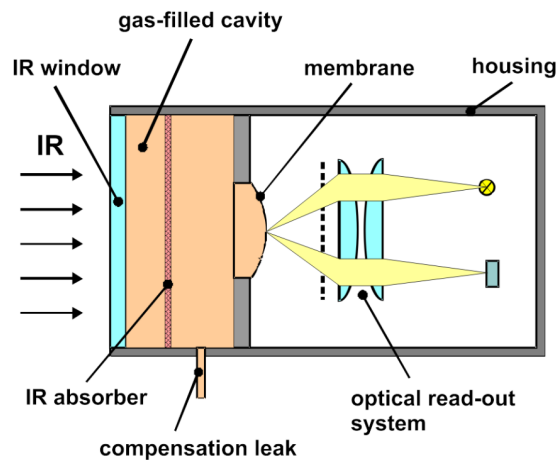
Čia V_T yra spektrinis triukšmo tankis. Tranzistorinių THz detektorių atveju jis gali būti įvertintas

kaip šiluminis (Nyquist'o) triukšmas:

$$V_T = \sqrt{4k_B T R_{DC} \Delta f}. \quad (20)$$

Čia k_B - Boltzman'o konstanta, T - tranzistoriaus temperatūra, Δf - atsako matavimo spektro plotis.

Atraminiams matavimams šiame darbe naudotas opto-akustinis THz detektorius - Golay narvelis [32]. Jo veikimo schema pavaizduota 6 paveiksle. Golay detektoriaus veikimo principas pagrįstas dujų šildymu jas apšvitinus infraraudonąja arba THz spinduliuote. Šildomos dujos plečiasi pagal idealių dujų dėsnį ir deformuoja veidrodinę membraną. Membranos išlinkimą registruoja diodų optopora. Dėka veikimo principo Golay detektorius turi platų dažnių ruožą ir yra tiesinis, todėl gerai tinka atraminiams matavimams.



6 pav. Golay THz detektoriaus veikimo principo schema [33].

1.5 THz detektorių modeliavimas

Norint įvertinti galimą prietaiso veikimą, jį reikia susimodeliuoti. Prietaiso modeliavimą dažnai patogiau suskirstyti į dalis. GFET THz detektorių atveju tos dalys būtų tranzistorius ir antena. Pirmausia galima sumodeliuoti tranzistoriaus ir antenos parametrus, tokius kaip: antenos ir tranzistoriaus kanalo impedansus, stiprinimą, antenos kryptingumą. Tada galima pereiti prie apjungto modelio, pavyzdžiui, išspręsti hidrodinamines krūvio pernašos lygtis [34] ir suskaičiuoti teorinį detektoriaus jautrį bei ekvivalentinę triukšmo galią. Šiame darbe toliau bus aptariama tik antenos modeliavimo dalis. Gerokai sudėtingesnis uždavinys - apjungto modelio kūrimas, suplanuotas doktorantūros studijoms.

Antenų modeliavimą galima atlikti analitiškai arba skaitmeniškai. Kadangi duomenų kiekis yra didelis, skaitmeninis modeliavimas yra patrauklesnis bent jau pradiniam prietaiso įvertinimui. Viena iš skaitmeninio modeliavimo programų, tinkančių THz elektronikai, yra „Keysight PathWave Advanced Design System“ (ADS). Programa naudoja momentų metodą, kurio metu detektoriaus struktūra padalijama į gabaliukus, ir skaičiuojamos įtekančios bei ištekančios srovės pasitelkiant Green'o funkciją [35]. Taip išsprendžiamos tūkstantinės elementų matricos, leidžiančios programai apskaičiuoti įvairius antenos parametrus.

Pirmiausia programa apskaičiuoja sklaidos matricas (angl. *S-matrices*), iš kurių galima nustatyti antenos impedansą. Impedanso dažninė charakteristika leidžia numatyti, kad antena geriausiai veiks ten, kur impedansas didžiausias. Paprastai, antenų impedansai yra mažesni už tranzistorių, todėl dalis galios atspindima dar nepasiekusi tranzistoriaus.

Atlikus pradinį modeliavimą, ADS gali apskaičiuoti ir grafiškai pavaizduoti tolumo lauko antenos spinduliuotę, jei antena veiktų kaip šaltinis. Iš to galima nustatyti antenos efektyvumą, kuris parodo, kuri dalis prietaiso galios būtų konvertuojama į spinduliuotę. Taip pat svarbūs yra kryptingumo ir stiprinimo parametrai. Kryptingumas parodo, kiek kartų (dažnai dB) išspinduliuojama galia specifine kryptimi skiriasi nuo idealaus, sferinio, tokios pačios galios spindulio. Stiprinimas dažniausiai yra didžiausia kryptingumo vertė, padauginta iš antenos efektyvumo.

Visi šie parametrai tinka ir detektoriams, tik maitinimo galią reikia sukeisti su į detektorių krentančios spinduliuotės galia. Simuliacijos metu taip pat apskaičiuojama antenos poliarizacija. Tai svarbu, nes net jei aišku, kokios poliarizacijos turėtų būti pati antena, antenai reikalingi papildomi elementai – prisijungimo kontaktai. Priklausomai nuo dažnio, jie keičia ne tik antenos impedansą, bet ir gali iškraipyti erdvinį spinduliuotės profilį.

1.6 Grafeno elektrinių charakteristikų netiesiškumas

Apie 2012 metus buvo parodyta, kad grafene pasireiškia įvairūs netiesiniai reiškiniai, tokie kaip įsisotinanti absorbcija, netiesinis lūžis [36], netiesinis bangų maišymas [37] ir aukštesnių harmonikų generacija optinių ir infraraudonųjų bangų dažniuose [8]. Prieš kelis metus šie efektai buvo atrasti ir THz dažniuose [10, 38–40].

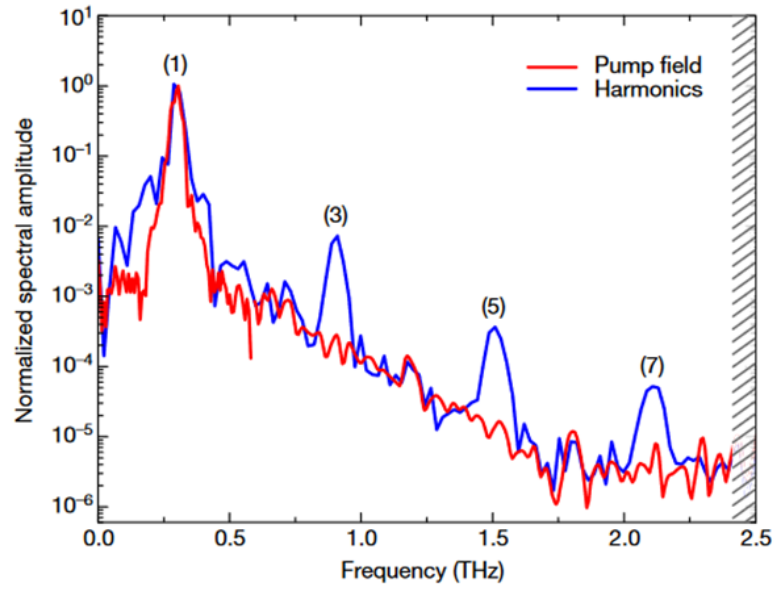
Grafeno netiesiniams reiškiniams paaiškinti THz dažnių ruože vyrauja teorija, kad netiesiškumą sukelia šiluminiai krūvininkai, keičiantys juostos (*intragand*) sugertį. Tai reiškia, kad laisvi elektronai ir skylės yra lokaliai šildomi THz spinduliuotės ir gali būti toliau žadinami. Sklaida elektronas-elektronas padeda elektronams pasidalinti energija per šilumos perdavimą, trunkantį apie 10 fs. Tokių elektronų relaksacija – vėsimas – trunka keletą ps ir vyksta dėl sklaidos akustiniais ir optiniais fononais bei artimo lauko sąveikos su substratu [39].

Buvo parodyta, kad grafene galima labai kokybiška aukštesnių THz harmonikų generacija [10]. CVD grafenas ant SiO₂ substrato buvo apšviestas kvazi-monochromatiniais (300 GHz), tiesiškai poliarizuotais 30 fs pločio, ties pusės amplitudės, THz impulsais 100 kHz pasikartojimo dažniu, kambario temperatūroje. Kontrolės grupėje buvo SiO₂ substratas be grafeno. THz spinduliuotei praėjus pro grafeno bandinį, išmatuota net 7-os harmonikos generacija (7 pav.). Jei tokią aukštų harmonikų generaciją pavyktų stebėti ir THz detektoriuose, tai parodytų galimybę panaudoti grafeną aukštadažniams THz šaltiniams. Nors aukštesnių harmonikų signalo amplitudė yra keliais laipsniais mažesnė už pagrindinę, yra būdų susilpninti pagrindines harmonikas [41].

Atliekant autokoreliacinius matavimus, THz detektoriaus atsakas yra proporcingas THz galiai:

$$V_{Det} \propto \Re_V \int \left((E(t) + E(t + \tau))^2 \right)^n dt. \quad (21)$$

Čia $\Re_V$ yra detektoriaus tiesinis jautris, $E(t)$ - THz signalo elektrinis laukas, o $E(t + \tau)$ - uždelstas



7 pav. Aukštesnių THz harmonikų generacija grafene [10].

THz signalas per delsą τ . Tiesinės detektoriaus veikos atveju $n = 1$. Jei atsakas yra netiesinis, n yra proporcingas dvejetainio ir moduliacijos gyliai santykiui. Pavyzdžiui, jei $n = 2$, detektoriuje vyksta dvifotonė sugertis [42]. Taip pat reikia pažymėti, kad atlikus netiesinės autokoreliacijos greitąją Furjė transformaciją (FFT), spektrinė informacija nebeatitinka pradinio signalo ($E(t)$) spektro [13].

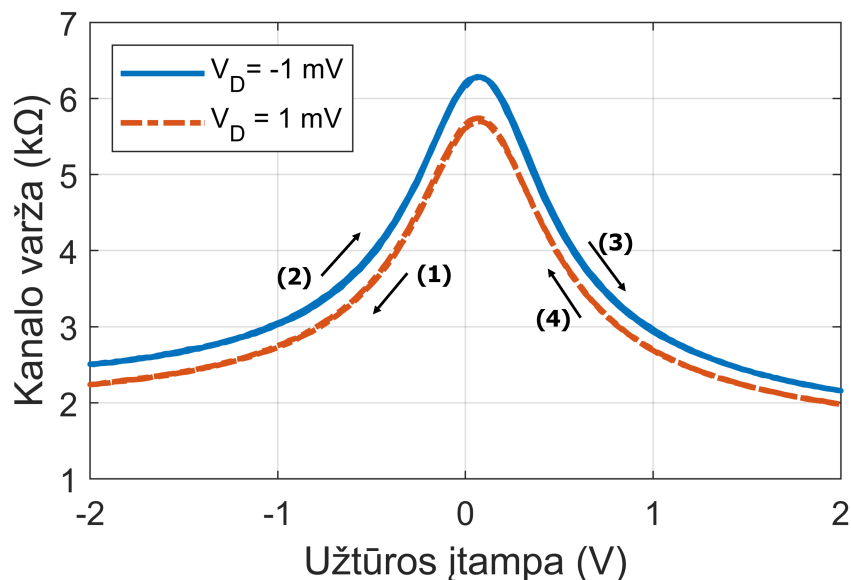
2 GFET terahercų detektorių modeliavimas ir atsakų netiesiškumo tyrimo metodika

Šiame skyriuje bus aptariama atlikto įtaisų modeliavimo ir tyrimų metodika. GFET modeliavimas atliktas pasitelkiant „MathWorks“ programavimo ir skaičiavimo programinį paketą „MatLab“. Antenų charakteristikos modeliuotos su jau minėta ADS programa.

2.1 GFET modeliavimo metodika

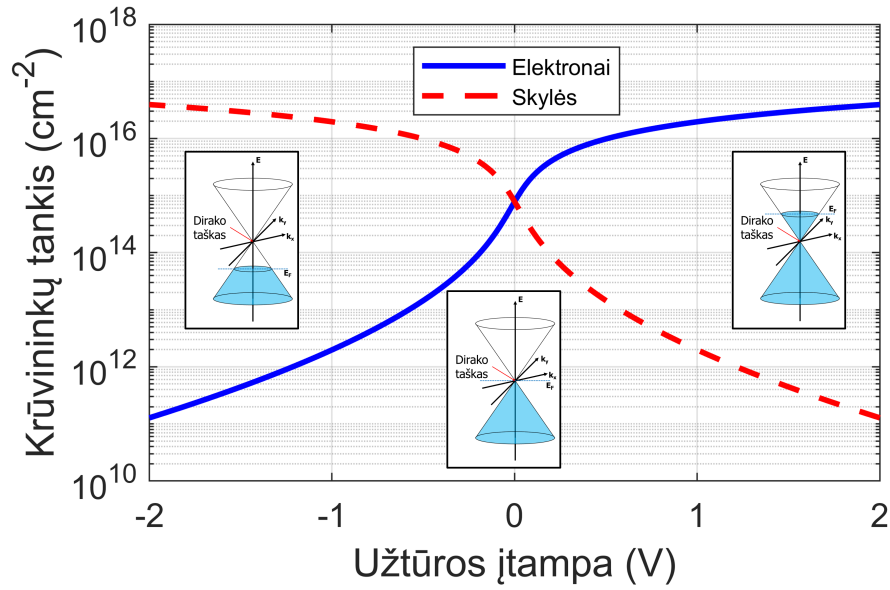
Tipiškai, prieš pradedant tirti GFET THz detektorius, pirmiausia eksperimentiškai ištiriama aktyvaus elemento veikla statiniame režime. Tam matuojamos GFET volt-amperinės (IV) charakteristikos, naudojant puslaidininkinių prietaisų parametrų analizatorių „Keysight B1500A“. Iš jų apskaičiuotos tranzistorių kanalų varžų priklausomybės nuo užtūros įtampos (8 pav.).

Vienas iš pagrindinių skirtumų tarp GFET ir įprastų puslaidininkinių FET yra tas, kad keičiant užtūros įtampą, GFET neužsidaro, o tiesiog keičia laidumo tipą (9 pav.). Tai leidžia GFET THz detektoriams veikti ir kai ant užtūros palaikoma 0 V įtampa. GFET THz detektoriai gali būti naudojami kaip nulinio priešįtampio detektoriai (užtūra įžeminama), taip sutaupant vietos ir medžiagų, reikalingų užtūros įtampai kontroliuoti. Užtūros įžeminimas taip pat reiškia, kad prietaisas naudoja labai mažai galios, todėl yra patrauklus taikymams, kur svarbus efektyvus galios panaudojimas (pvz., palydovai, kosmoso tyrinėjimai).



8 pav. Iš pamatuotų GFET IV charakteristikų suskaičiuota kanalo varžos priklausomybė nuo užtūros įtampos, stebima maža histerezė (rodyklės rodo jos kryptį, pusę ir matavimo eigą).

GFET IV charakteristikos pasižymi histereze [19], kuri daugiausia priklauso nuo matavimo greičio ir yra susijusi su dinaminėmis krūvininkų charakteristikomis, krūvininkų gaudyklėmis ir užtūros talpa [43]. Todėl modeliavimui buvo pasirinkta tik viena histerezės matavimo šaka. Kaip matyti 8 paveiksle, grafeno kanalo kontaktinė varža priklauso nuo kanalo įtampos ženklo. Tam



9 pav. Grafeno krūvininkų tankio priklausomybė nuo užtūros įtampos, kai $V_G > V_{Dirako}$ – vyrauja elektroninis laidumas, o kai $V_G < V_{Dirako}$ – skylinis.

įvertinama savitoji grafeno kanalo varža pagal formulę:

$$R_{CH} = \frac{V_{D+} + V_{D-}}{2(I_{D+} + I_{D-})}. \quad (22)$$

Čia $V_{D\pm}$ yra teigiamos ir neigiamos kanalo srovės įtampos, $I_{D\pm}$ – atitinkamos srovės.

Pradžioje GFET modeliavimui buvo pasirinktas geros kokybės eksfoliuoto vienasluoksnių grafeno FET bandinys. Vėliau modelis buvo pritaikytas ir tirtiems GFET THz detektoriams. Eksfoliuoto grafeno FET bandinys buvo pagamintas Ispanijos Salamankos universiteto, Mokslo fakulteto, Taikomosios fizikos departamento švaros kambariuose kartu su dr. Juan Antonio Delgado Notario ir kitais švaros kambarių technikais.

GFET modeliavimas pradėtas nuo tranzistoriaus gamybos parametrų įvertinimo. Eksfoliuoto grafeno FET kanalas yra 5 μm pločio ir 3,3 μm ilgio. Užtūros dielektrikas susideda iš dviejų sluoksnių: 300 nm SiO_2 ir 25 nm h-BN, kurių dielektrinės skvarbos, atitinkamai 3,9 ir 3,76. Pagal (14) formulę suskaičiuotos dielektrikų talpos. CVD grafeno FET THz detektorių modeliavimui naudota 18 nm sluoksnių Al_2O_3 dielektrinė skvarba – 6,4 [44].

Pagal formules (6), (7) ir (8) buvo suskaičiuotos Fermi energijos priklausomybės nuo užtūros įtampos intervale, kuriame buvo matuoti bandiniai. Naudojant (5), Fermi energijos priklausomybė nuo užtūros įtampos buvo perskaičiuota į krūvio disbalanso priklausomybę nuo užtūros įtampos. Pagal (3) buvo nustatyta sąsaja tarp užtūros įtampos ir cheminio potencialo. Žinant cheminį potencialą, buvo skaitmeniškai įvertintos elektronų ir skylių tankių priklausomybės nuo užtūros įtampos (2).

Iki šiol suskaičiuoti dydžiai buvo centruoti esant 0 V užtūros įtampai ir nesusiję su tirtais bandiniais. Tam buvo nustatytos matuotų IV charakteristikų Dirako taškų įtampos (ties maksimaliomis varžomis). Ties Dirako taško įtampa įsivertintas grafeno legiravimas. Priklausomai nuo Dirako įtampos ženklo, elektronų (minusas) ar skylių (pliusas) tankis buvo padidintas tiek, kad tankių

disbalansas ties V_{Dirac} taptų nulis. Tada įvertintas bendras krūvininkų tankis (4) ir ciklotroninės masės priklausomybė nuo krūvininkų tankių (5). Taip pat buvo suskaičiuotos kvantinės talpos (12) ir užtūros talpos (13) priklausomybės nuo užtūros įtampos.

Turint visas dëlionės dalis, pereita prie kanalo varžos modeliavimo. Iš (17) funkcijos nežinomaisiais liko krūvininkų judriai ($\mu_{e/h}$), liekamojo krūvio įtampa (V_0) ir kontaktinė varža (R_0). Ši funkcija buvo pritaikyta iš pamatuotų IV charakteristikų suskaičiuotoms kanalo varžoms. Pritaikymui naudota „MatLab“ funkcija *lsqcurvefit*. Kaip rodo funkcijos angliškas trumpinys, kreivės buvo pritaikytos atliekant mažiausiųjų kvadratų metodą.

Atliekant bet kokį rezultatų modeliavimą, svarbu įvertinti modeliavimo paklaidas. Patogu, kad minėta *lsqcurvefit* funkcija automatiškai suskaičiuoja kiekvieno kintamojo pasikliautinį intervalą su 95% pasiklovimo tikimybe. Padalinus neapibrėžties plotį pusiau gaunama dydžio neapibrėžtis, o ją padalinus iš dydžio vertės randama santykinė paklaida. Norint įvertinti bendrą modelio paklaidą, reikia įvertinti bendro dydžio neapibrėžtį. Kadangi šiuo atveju yra keturi kintamieji ir jų ryšys sudėtingas, varžos neapibrėžčiai įvertinti buvo naudojama formulė:

$$\Delta R_{s,P} = \sqrt{\frac{\partial R_{CH}}{\partial \mu_e} \Delta \mu_{e,s,P} + \frac{\partial R_{CH}}{\partial \mu_h} \Delta \mu_{h,s,P} + \frac{\partial R_{CH}}{\partial V_0} \Delta V_{0,s,P} + \frac{\partial R_{CH}}{\partial R_0} \Delta R_{0,s,P}}, \quad (23)$$

čia $\Delta \mu_{e,s,P}$ – elektronų judrio neapibrėžtis, $\Delta \mu_{h,s,P}$ – skylių judrio neapibrėžtis, $\Delta V_{0,s,P}$ – liekamojo krūvio įtampos neapibrėžtis ir $\Delta R_{0,s,P}$ – kontaktinės varžos neapibrėžtis. Dalinės GFET kanalo varžos išvestinės:

$$\frac{\partial R_{CH}}{\partial \mu_e} = -\frac{L}{C_G W} \frac{N_S n_e}{(\mu_e n_e + \mu_h n_h)^2} \frac{1}{\sqrt{V_0^2 + |V_G - V_{Dirac}|}}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial R_{CH}}{\partial \mu_h} = -\frac{L}{C_G W} \frac{N_S n_h}{(\mu_e n_e + \mu_h n_h)^2} \frac{1}{\sqrt{V_0^2 + |V_G - V_{Dirac}|}}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial R_{CH}}{\partial V_0} = -\frac{L V_0}{C_G W} \frac{N_S}{(\mu_e n_e + \mu_h n_h)} \frac{1}{(V_0^2 + |V_G - V_{Dirac}|)^{3/2}}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial R_{CH}}{\partial R_0} = 1. \quad (27)$$

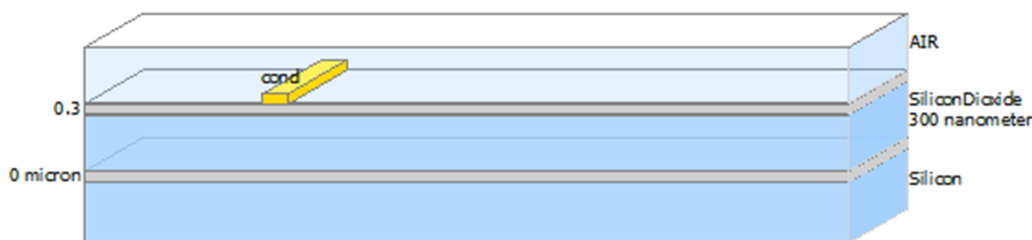
2.2 THz detektorių antenų modeliavimo metodika

Antenų modeliavimui pasirinkta ADS programa. Modeliuojant THz detektorius, pirmiausiai programoje reikia aprašyti substrato, kuris imituoja lustą, kuriame sukurtas THz detektorius, modelį. Sukurtas substratas pavaizduotas 10-ame paveiksle. Programa leidžia pasirinkti norimas medžiagas iš esamos bibliotekos arba sukurti savo medžiagas. Kadangi norint sukurti savo medžiagą reikia žinoti daug įvairių jos parametrų, kol kas buvo atliktas supaprastintas modeliavimas su paprastu, grafeno sluoksnio neturinčiu substratu. Šis supaprastinimas leidžia apytiksliai įsivertinti antenų parametrus.

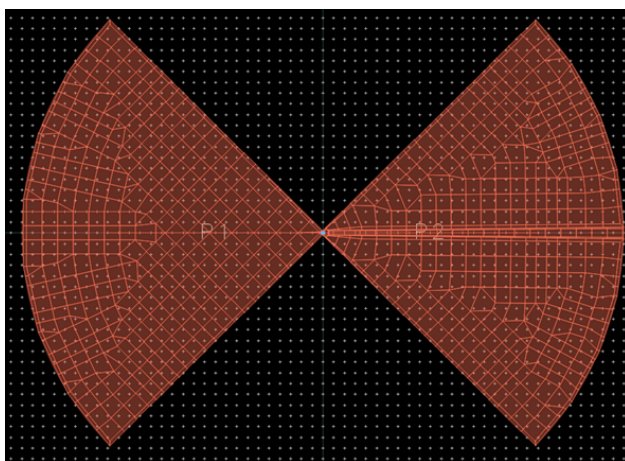
Metalines paviršines antenas galima braižyti pačioje ADS programoje arba naudojant alterna-

tyvią programą „KLayout“. Kadangi THz detektoriai su šiomis antenomis daromi pasitelkus lito-
grafiją, reikia atsižvelgti į gamintojo technologijos ribas, pvz., mažiausią galimą tarpą ir metalo
struktūrą. Jei užsakymas daromas komercializuotoje gamykloje ir siekiama didesnės išeigos, reikia
laikytis papildomų gamintojo reikalavimų (angl. *DRC - design rule check*).

Šiame darbe modeliuotos plačiajuostės antenos: peteliškės (BT) (*bow-tie*) ir BT su padidin-
to impedanso juostomis. Taip pat, įgytos žinios pritaikytos kuriant naujus GFET THz detektorių
dizainus: logaritminės spiralinės (LOG) antenas, atrankinės plyšinio tipo ir „Quad“ tipo antenas.



10 pav. Modeliavimui pasirinktas nesudėtingas substratas, antenos metalas „COND“ guli ant bega-
linio Si padėklo su 300 nm storio SiO₂ sluoksniu, antenos viršų gaubia oras.

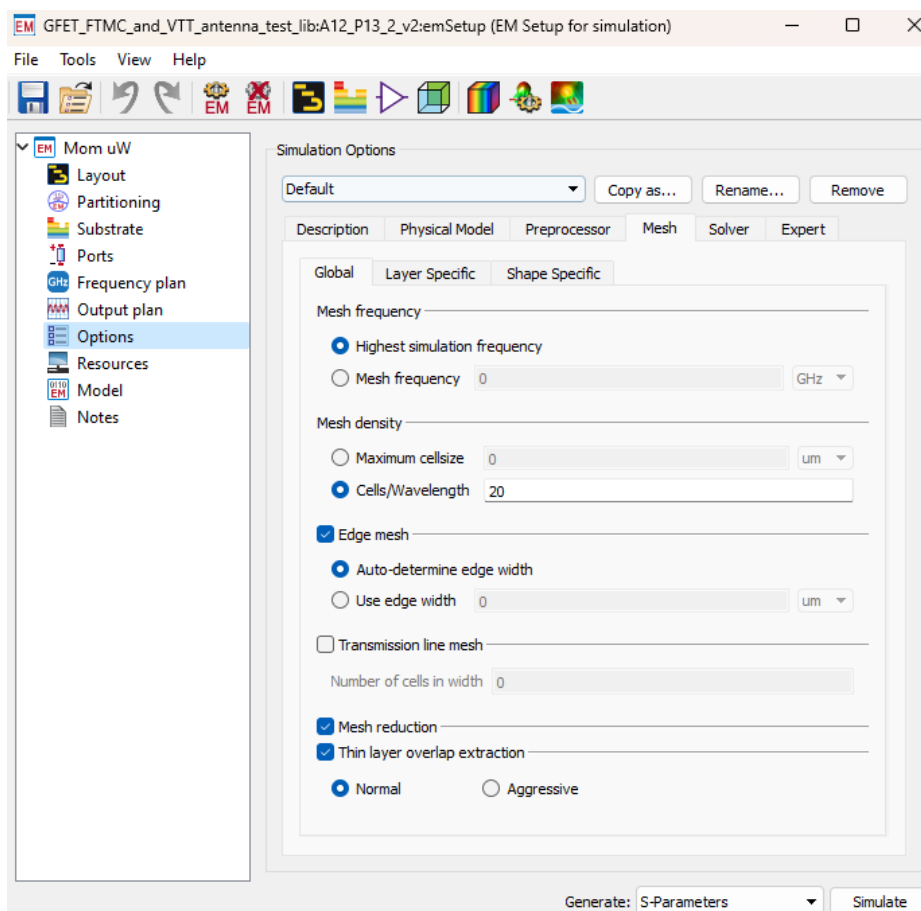


11 pav. Modeliuojama tik antenos struktūra, matosi pažymėti P1 ir P2 zondai.

Kaip minėta, pirmiausia modeliuojamas antenų impedansas. Verta pradėti modeliuoti tik ante-
nos struktūrą ant substrato (11 pav.). Taip galima nustatyti, ar pati antena yra tinkama reikalingam
dažniui ar jo ruožui. Pradinę antenos geometriją galima įvertinti pagal antenos tipą, pavyzdžiui, 90°
BT tipo antenos spindulys turėtų būti artimas norimo dažnio pusbangiui.

Prieš modeliuojant anteną, reikia ant jos struktūros uždėti zondus – pažymėti taškus, kuriuose
antena bus žadinama elektriniu signalu. Dėl detektorių dizaino šie zondai uždedami toje vietoje, kur
bus tranzistoriaus kanalas, ant ištakos ir užtūros metalų. Tada reikia pasirinkti modeliavimo dažnių
ruožą. Optimalu tai daryti pagal teorines antenos galimybes, nes kuo platesnis dažnių ruožas, tuo
ilgiau trunka modeliavimas ir tuo daugiau skaičiavimo galios jam reikia. Tai yra ypač svarbu, jei
antenos plotas didelis arba yra daug smulkių detalių, nes nuo šių dalykų priklauso modeliavimo
matricų dydžiai.

Tada galima pradėti modeliuoti, tačiau tai nėra visi galimi nustatymai (12 pav.). Šiuo atveju buvo pasirinktas papildomas nustatymas – tikslesnė metalo kraštų gardelė, siekiant patikslinti modelį.

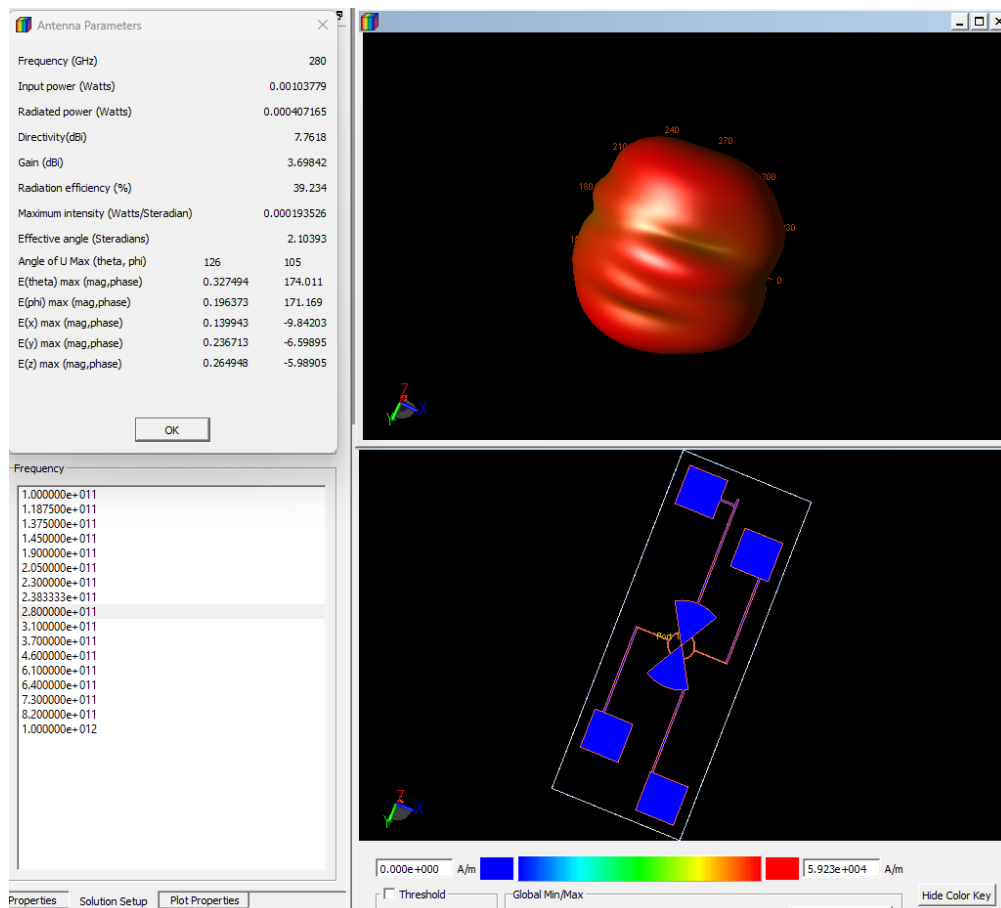


12 pav. Antenų impedansų modeliavimo nustatymai.

Jei sumodeliuotas antenos impedansas neatitinka norimo, galima jį keisti keičiant antenos geometriją arba pridėdant papildomas apkrovas, tokias kaip talpos. Tačiau jei antena tik truputį nukrypusi nuo tikslo, to daryti dar neapsimoka. Pirmiausia reikėtų į antenos dizainą įtraukti prisijungimo kontaktus. Tikėtina, kad jie paveiks ne tik impedansą, bet ir kitus antenos parametrus: stiprinimą, kryptingumą ir efektyvumą.

Po impedanso modeliavimo galima atlikti tolumo lauko modeliavimą. Pavyzdiniai rezultatai pateikti 13 paveiksle. Modeliavimo rezultatuose galima pasirinkti dažnį (paveiksle apatiniam kairiam kampe) ir ties juo paskaičiuoti antenos spinduliuotės 3D profilį (viršuje, dešinėje) ir srovių antenoje stiprumą (apačioje, dešinėje). Taip pat galima įjungti lentelę su minėtais antenų parametrais ir erdvine signalo spinduliuotės charakteristika (viršuje, kairėje).

Reikia įsitikinti, kad metalai, skirti prisijungti prie antenos, nekeičia jos poliarizacijos. Jei pavyksta kontaktus sukurti taip, kad antenos charakteristikos nesikeistų, tada norint pagerinti antenos charakteristikas galima pridėti papildomas apkrovas.



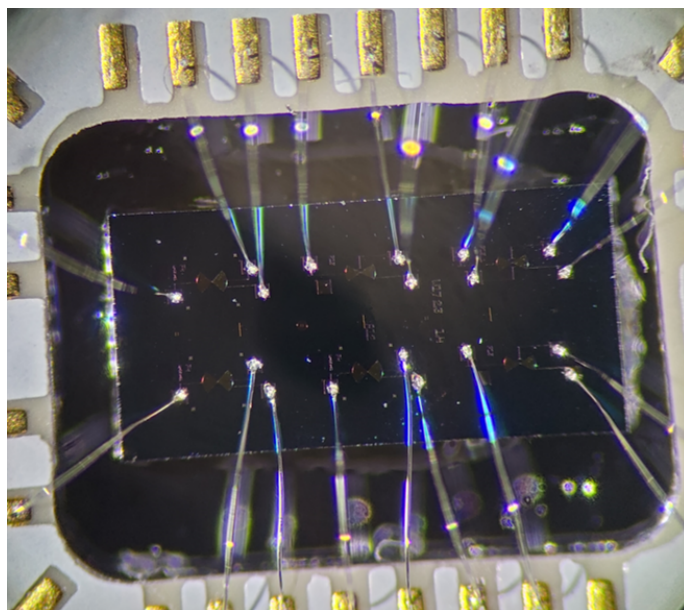
13 pav. Antenos tolumo lauko simuliacijos rezultatai.

2.3 Netiesinių GFET THz detektoriaus atsakų tyrimo metodika

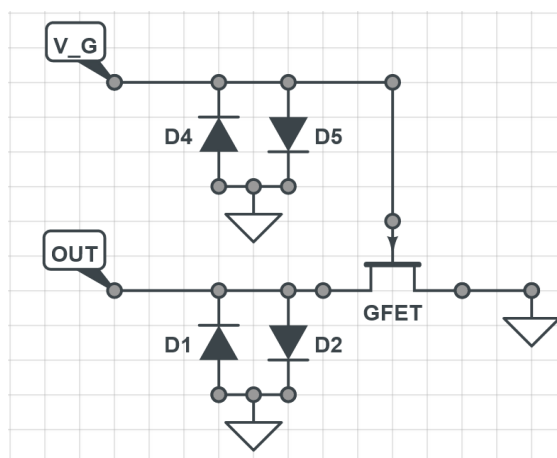
Prieš pradedant atsako į femtosekundinę THz spinduliuotę netiesiškumo tyrimus, reikėjo GFET THz detektoriams sukurti elektroninį įpakavimą. Detektorių lustai buvo priklijuoti ant Si plokštelių (1x1 cm), siekiant sufokusuoti didžiąją dalį THz spinduliuotės į detektoriaus antenos efektyvų plotą, naudojant Si hiper-hemisferinį lęšį (12 mm diametro, 7,2 mm aukščio). Tai buvo daroma iš apatinės detektorių pusės, nes EM modeliavimo rezultatai parodė, kad pagrindinė THz spinduliuotės dalis iš antenos sklinda į Si padėklo pusę dėl oro ir Si dielektrinių konstantų (kartu ir lūžio rodiklių) skirtumo.

Si plokštelės su detektoriais buvo klijuojamos prie PCB (angl. *plastic circuit board*) laikiklių, turinčių kontaktinius padelius. Tada, naudojant ultragarsinį Al vielos suvirinimą pleištas-pleištas (angl. *wedge-wedge*) metodu, buvo padaryti elektriniai kontaktai tarp GFET THz detektorių ir PCB laikiklio (14 pav.). Šie kontaktai taip pat yra viena iš priežasčių, kodėl į THz detektorių šviečiama iš substrato pusės, nes Al viela trukdo ant detektoriaus uždėti Si lęšį. Taip paruoštą detektorių jau galima tirti.

Tiriant GFET bandinius naudinga apsaugoti detektorių nuo elektrostatių iškrovų, kurioms GFET yra ypač jautrūs ir lengvai pramušami. Tam buvo pasitelkta elektronikoje įprasta diodinė apsauga (15 pav.). Galima rasti įvairių tokios apsaugos variantų, pavyzdžiui, naudojant Zenerio diodus. Šiuo atveju buvo naudojami pn diodai, kurie greitai atsidaro prie reikalingų įtampų (1,2 V kanalui ir 2,4 V užtūrai) ir turi aukštą pramušimo įtampą (150 V).



14 pav. GFET THz detektorių lustas Al viela prijungtas prie Al PCB.



15 pav. Diodinė apsauga, skirta apsaugoti GFET kanalą ir užtūrą nuo perdidelės įtampos ir elektrostatinių iškrovų.

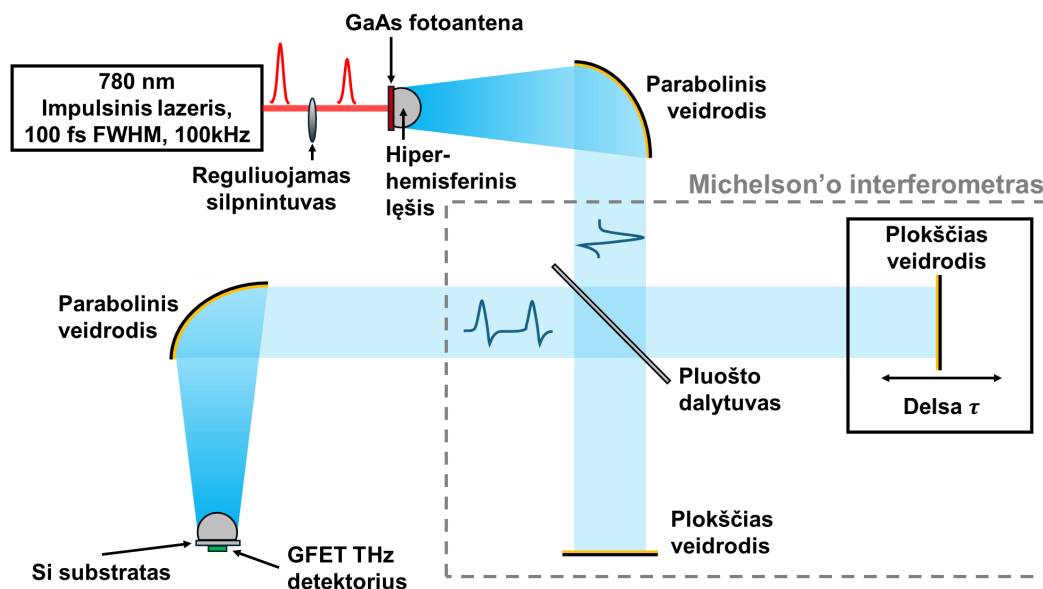
Taip pat ištirtos detektorių statinio jautrio ir *NEP* priklausomybės nuo THz spinduliuotės dažnio ir GFET užtūros įtampos. Detali tyrimų metodika aprašyta bakalauro studijų baigiamajame darbe ir Lietuvos Fizikos Žurnale [45]. Apibendrintai, dažninės GFET THz detektorių atsako charakteristikos pamatuotos naudojant „Virginia Diodes Inc.“ THz šaltinį. Jautriui skaičiuoti buvo panaudotas šaltinio galios matavimas, atliktas su „Thomas Keating“ absoliučios galios matuokliu. Geriausio jautrio matavimai buvo atlikti keičiant GFET užtūros įtampą ir spinduliuotės dažnį.

Netiesiškumo eksperimentas buvo atliktas padedant NFTMC optoelektronikos skyriui kartu su dr. Ignu Nevinsku. Eksperimento stendo schema pateikta 16 paveiksle. Bendras tyrimo principas panašus į ankščiau minėtą [39]. Femtosekundinis THz impulsas buvo generuotas apšvitinus GaAs THz fotoanteną 100 fs, 790 nm optiniu impulsu, 100 kHz pasikartojimo dažniu. THz spinduliūtės detekcijai fotoantenos maitinimo įtampa buvo elektriškai moduluota žemadažniu stačiakampiu impulsu (20,83 Hz referenciniam ir 208,3 Hz GFET matavimams).

Generuojama THz spinduliuotė pirmiausia surenkama 6 mm radiuso hiper-hemisferiniu Si lęšiu.

Kadangi THz impulso profilis yra gausinis, jis pirmiausia sukolimuotas paraboliniu veidrodžiu, o kolimuotas spindulys paduotas į Michelson'o interferometrą. Pirmiausia į pluošto dalytuvą – 4 μm storio plėvelę, dengtą plonu chromo sluoksniu. Taip THz impulsas buvo padalintas į dvi interferometro atšakas. Vienos atšakos ilgis iki veidrodžio buvo fiksuotas, o kitoje veidrodį buvo galima judinti elektriniu motoru, sudarant iki 40 ps vėlinimą arba ankstinimą tarp padalinto impulso.

Iš interferometro išėję atspindėti ir uždelsti impulsai paraboliniu veidrodžiu buvo fokusuoti ant GFET THz detektoriaus (referenciniams matavimams – „Tydex Golay“ narvelio). Pagerintam spinduliuotės suvedimui ant GFET THz detektoriaus taip pat buvo naudojamas hiper-hemisferinis Si lęšis. Sistemos suvedimas buvo atliekamas vieną interferometro atšaką uždengus. Didžiausias THz atsakas rastas su „Thorlabs“ xy manipulatoriumi, suvedant detektorių ir šaltinį į lęšių centrus, ieškant didžiausio signalo. Sistemos suvedimo tikslumas buvo patikrintas uždengus kitą interferometro šaką – atsako maksimumo pozicija turėjo likti nepakitusi.

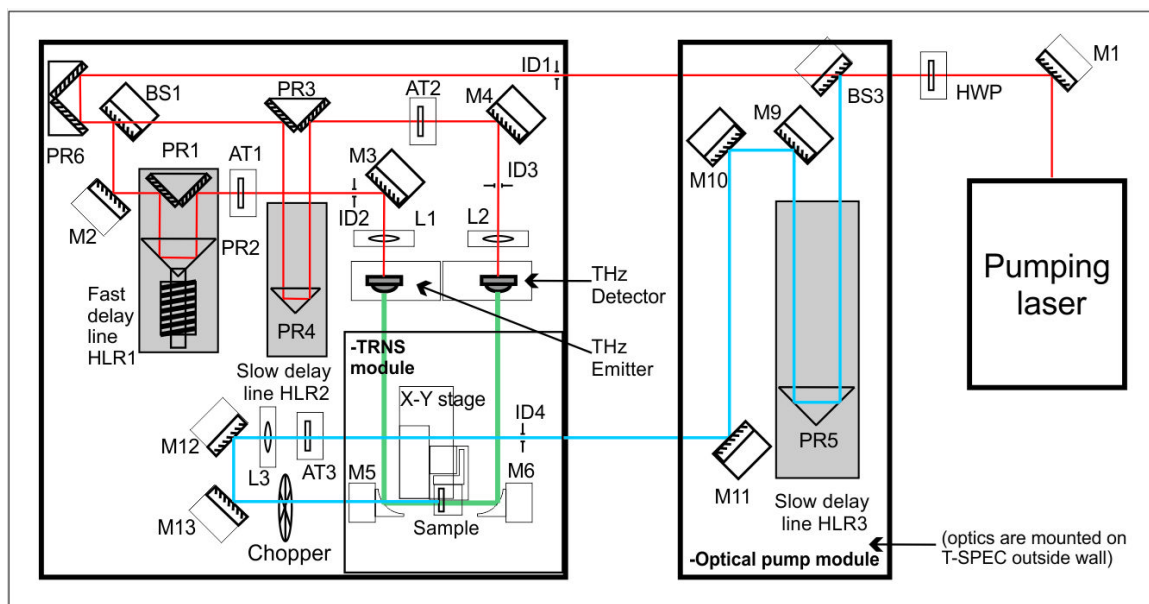


16 pav. THz signalo interferogramų matavimo stendo schema.

THz impulsas papildomai buvo pamatuotas taikant THz laikinę spektroskopiją su „Teravil T-SPEC Real-Time Terahertz Spectrometer“ (schema 17 pav.). Spektrometro sistemoje yra dvi THz fotoantenos, iš kurių viena naudojama kaip emiteris, kita - detektorius. Abi fotoantenos yra žadinamos femtosekundinio lazerio impulsais (impulso trukmė 100 fs, bangos ilgis 780 nm, pasikartojimo dažnis 80 MHz).

Prie emiterio buvo prijungta 60 V įtampa, kuri generavo THz impulsą, judindama optinio impulso sužadintus elektronus ir indukuodama fotosrovę, kurios išvestinė yra THz impulsas. Detektoriuje krūvininkai taip pat žadinami lazerio impulsu su papildoma delsa, kad impulsas spėtų pasiekti detektorių. Čia sužadinti elektrons yra judinami THz impulso elektrinio lauko, o sugeneruota fotosrovė matuojama sinchroniniu stiprintuvu „Stanford Research Systems SR830“. Vėlinant optinius impulsus tarp emiterio ir detektoriaus, zonduojamas visas THz impulsas.

Tačiau taip pamatuotas THz impulsas yra iškraipomas krūvininkų gyvavimo trukmės detektoriuje. Krūvininkai relaksuoja eksponentiškai, jų kiekio laikinė priklausomybė aprašoma taip:



17 pav. „Teravil T-SPEC Real-Time Terahertz Spectrometer“ schema [46].

$$n(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (28)$$

čia τ - relaksacijos trukmė. Dėl to Gausinis optinis impulsas yra išplėčiamas (impulso ir relaksacijos sąsuka), o kartu praplatėja ir pamatuotas THz impulsas. Norint atkurti į detektorius kritusį THz impulsą, reikėjo suskaičiuoti fotosrovę ir atlikti pamatuoto impulso ir jos dekonvoliuciją. Tiksliai relaksacijos trukmė nežinoma, nes jos vertė priklauso nuo įvairių detektoriaus charakteristikų. Tačiau naudojant „MatLab“ *lsqcurve fit* funkciją, rasta relaksacijos trukmė, su kuria atkurta THz impulso autokoreliacija duoda geriausią atitikimą su Golay pamatuotai THz impulso autokoreliacijos interferogramai. Antenose krūvininkų gyvavimo trukmės yra palyginamos su lazerio impulso trukme (<1 ps), todėl 80 MHz pasikartojimo dažnis leidžia elektronams pilnai relaksuoti, fotosrovės impulsai nepersikloja.

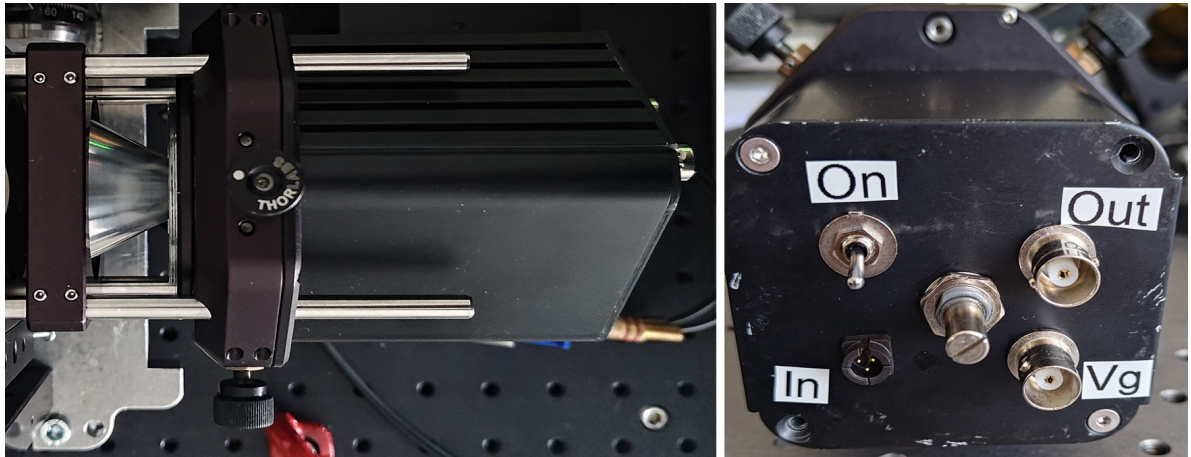
Taigi, su Michelson'o interferometru buvo pamatuotos THz impulso interferogramos. Pirmiausia buvo atlikti referencinės kreivės matavimai su „Tydex Golay“ narveliu. Referencinis signalas buvo matuotas naudojant sinchroninį stiprintuvą „SR830“. THz impulso galia buvo keičiama keičiant fotoantenos įtampą nuo 40 iki 100V (fotoantenos veikimo ribos).

Tada buvo pereita prie matavimų su GFET THz detektoriumi. Matavimai buvo atlikti ne tik keičiant THz spinduliuotės galią, bet ir GFET darbo tašką – užtūros įtampą $\pm 1, 5$ V diapazone. Taip pat GFET THz detektoriuje išlygintas THz signalas buvo stiprintas 101 kartą su savadarbiu žematriukšmiu stiprintuvu. Norint sumažinti triukšmo įtaką, kiekviename nustatyme buvo atlikta po 4 matavimus ir rezultatai suvidurkinti. Siekiant pamatyti autokoreliacijos dažnines charakteristikas, interferogramoms buvo atliktos Furjė transformacijos naudojant „MatLab“ (*fft* funkcija).

Atliekant pirmus detektorių tyrimus, pastebėta, kad detektoriai reaguoja į elektromagnetinį (EM) triukšmą, kurį kelia elektriniai maitinimo šaltiniai ir Michelson'o interferometro motorai. Bandinių triukšmas buvo 34 kartus didesnis nei turėtų būti (pamatuotas - $358,98 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$, GFET šiluminis - $8,79 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$, suskaičiuotas šiluminis kartu su „SR830“ triukšmu - $10,65 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$). Todėl nuspręsta

GFET THz detektorius surinkti į ekranuotą dėžutę (18 pav.).

Norint sukurti efektyvią EM spinduliuotei ekranuotą dėžutę, reikia užtikrinti kelias sąlygas. Pirma, dėžutė turi būti pagaminta iš laidininko, ir priklausomai nuo trikdžių dažnio, turi turėti kuo mažiau skylių (jei dažnis didelis) arba gali būti tiesiog tinklelis (tipiniams radijo dažniams, kai bangos ilgis daug didesnis už tinklelio tarpus). Be to, visa dėžutė turi būti įžeminta, vengiant žemės kilpų (angl. *ground loops*). Geriausia, jei dėžutė, kartu su matavimo įrenginių, maitinimo plokštės ir detektoriaus žemėmis, yra sujungiama viename taške.



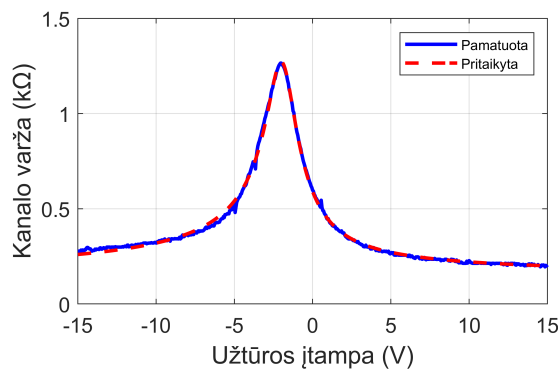
18 pav. Surinktas į ekranuotą dėžutę GFET THz detektorius.

3 Modeliavimo ir netiesinio GFET atsako į THz spinduliuotę matavimo rezultatai

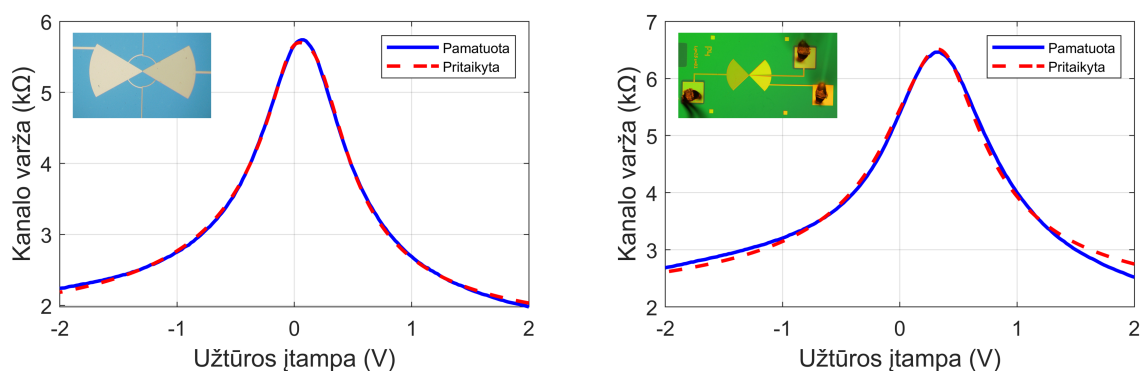
Toliau aptariami GFET modeliavimo, THz detektorių antenų modeliavimo ir grafeno netiesiškumo tyrimų rezultatai. Pateikiamos GFET judrio ir kitos charakteristikos, gautos pritaikius GFET kanalo varžoms teorinį modelį, bei sumodeliuoti THz detektorių antenų dizainai. Aptariamios grafeno netiesiškumo tyrimo interferogramos ir spektrai.

3.1 Sumodeliuota GFET kanalo varža

Aprašytas GFET kanalo varžos modelis pritaikytas bandiniams su eksfoliuotu ir CVD užaugintu vienasluoksniu grafenu. Pamatutos ir pritaikytos varžos kreivės pateiktos 19 ir 20 paveiksluose. Pritaikyti krūvininkų judriai, kontaktinė varža ir liekamojo krūvio įtampa, kartu su standartiniais nuokrypiais ir santykinėmis paklaidomis 95% pasiklovimo tikimybei, pateikti 1 lentelėje.



19 pav. Pamatuota vienasluoksniu ekfoliuoto grafeno GFET kanalo varža ir jai pritaikytas modelis.



20 pav. Pamatutos vienasluoksniu CVD grafeno GFET kanalų varžos ir joms pritaikytos kreivės GFET THz detektoriams: su padidinto impedanso BT antena (kairėje) ir paprasta BT antena (dešinėje).

Taikytas modelis yra tolydus viso IV matavimo ribose (įskaitant ir kai $V_G = 0$ V). Eksfoliuoto grafeno krūvininkų judriai yra eile didesni nei GFET pagamintiems su CVD grafenu. Visų modelių pritaikytų parametrų santykinės paklaidos kinta 0,82%-3,85% ribose. Rezultatas yra labai geras,

1 lentelė. Pritaikyto GFET kanalo varžos modelio parametrai ir paklaidos.

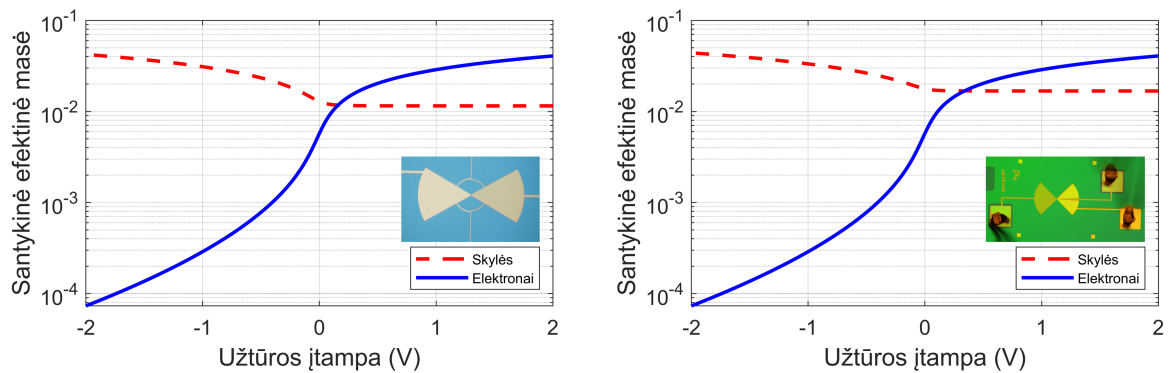
GFET bandinys	Pritaikytas parametras	vertė	Neapibrėžtis 95% pasiklivimo tikimybei	santykinė paklaida, %	Pritaikytos kanalo varžos santykinė paklaida užtūros įtampos režimuose, %
Eksfoliuotas grafenas	$\mu_e, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	74982	983	1,31	0,76-1
	$\mu_h, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	39946	528	1,32	
	V_0, V	0,97	0,011	1,13	
	R_0, Ω	151,1	1,9	1,25	
GFET THz detektorius su padidinto impedanso BT	$\mu_e, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	3312	43	1,29	0,62-0,80
	$\mu_h, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	2170	20	0,93	
	V_0, V	0,30	0,0031	1,05	
	R_0, Ω	1474	12	0,82	
GFET THz detektorius su paprasta BT	$\mu_e, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	2836	109	3,85	1,99-2,99
	$\mu_h, \text{cm}^2/(\text{Vs})$	2349	77	3,26	
	V_0, V	0,35	0,011	3,18	
	R_0, Ω	1855	46	2,51	

ir tikėtina, kad jį dar būtų galima pagerinti įskaičius papildomą parazitinę talpą, kylančią iš grafeno įgėrinių, kurie sukuria krūvininkų pagavimo centrus [19] [22]. Taip pat dalis paklaidos galėjo atsirasti dėl neviseškai tiksliai įvertintų prietaiso matmenų (gamybos paklaidos), kurie keičia FET užtūros talpą. Suskaičiuotos varžos paklaida abiem atvejais padidėja artėjant prie Dirako taško, nes GFET parazitika Dirako taške vaidina didžiausią rolę.

Šis GFET modelis taip pat leidžia įvertinti krūvininkų tankio priklausomybę nuo užtūros įtampos ir efektyviasias mases, kas yra būtina modeliuojant GFET prietaisus ir skaičiuojant hidrodinamines krūvininkų pernašos lygtis [34]. Kaip minėta, GFET legiracija buvo sumodeliuota atsižvelgiant į Dirako užtūros įtampą. Savitasis GFET bandinių krūvininkų tankis prie 0V užtūros įtampos yra $7,81 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$. Padidinto impedanso BT THz detektorius legiruotas skylėmis ($3,14 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$), o paprastos BT detektorius - taip pat skylėmis ($6,68 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$).

Kaip minėta, grafeno efektyvioji masė turi būti skaičiuojama ne iš Dirako skirstinio, bet kaip priklausomybė nuo krūvininkų tankio (5). Suskaičiuota ciklotroninė masė pateikta 21 paveiksle, kur krūvininkų tankis jai proporcingas. Mažėjant krūvininkų tankiui, efektyvioji krūvininkų masė artėja prie nulio, tačiau jos pasiekti negali, nes šiluminių krūvininkų tankis negali nukristi iki nulio.

Apibendrinant, modelis veikia pakankamai gerai, kad būtų galima pereiti prie THz detektorių modeliavimo apjungiant GFET ir antenų modelius. Modelį galima dar tikslinti detaliau skaičiuojant parazitines talpas. Taip pat turėtų būti įmanoma įvertinti pašalinius krūvininkus iš liekamojo krūvio įtampos.



21 pav. Elektronų ir skylių santykinės (elektrono rimties masei m_0) ciklotroninės masės priklausomybė nuo užtūros įtampos GFET THz detektoriams: su padidinto impedanso antena (kairėje) ir su paprastos BT antena (dešinėje).

3.2 Sumodeliuotos THz detektorių antenų charakteristikos

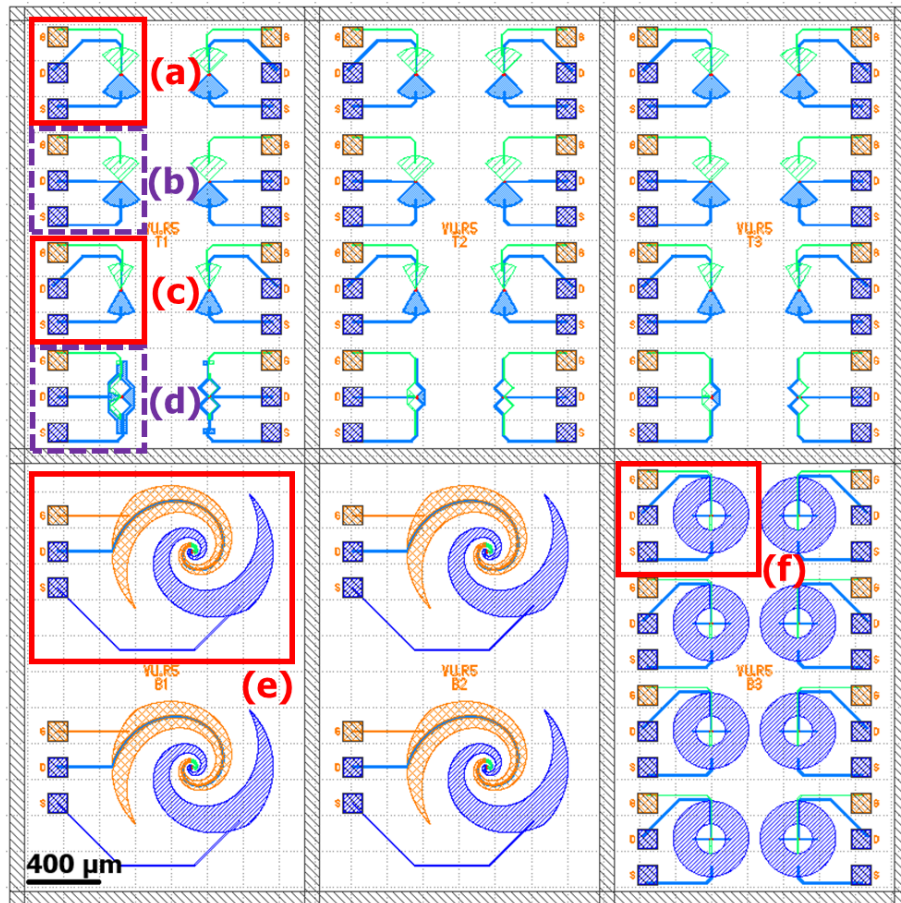
Sumodeliuoti tirtų detektorių antenų dizainai pateikti 22 paveiksle. Sumodeliuotos impedanso dažninės priklausomybės pateiktos 23 paveiksle. Nors BT tipo antenos yra plačiajuostės, jos vis tiek pasižymi rezonais, priklausančiais nuo antenos ir jų prisijungimo geometrijos bei detektoriaus gamybos medžiagų. Kadangi antenų impedansai yra žymiai mažesni už GFET kanalo impedansą, didelė dalis THz galios tiesiog atsispindi ir nepatenka į detektoriaus aktyvųjį elementą - tranzistorių. Tai reiškia, kad detektoriai geriausiai veiks ten, kur antenų impedansai yra didžiausi.

Paprasta perteliškė geriausiai veiks prie 400 GHz dažnio. Iš 23 paveikslo matyti, kad plonos signalo perdavimo juostelės ir BT metalo kampo sumažinimas (nuo 90° iki 60°) patrigubino antenos impedansą, tačiau taip pat pakeitė geriausio darbo tašką į 596 GHz. Paprastos ir padidinto impedanso antenų stiprinimas, kryptingumas ir efektyvumas, gauti atlikus tolumo lauko modeliavimą geriausio dažnio taškuose, pateikti 2 lentelėje.

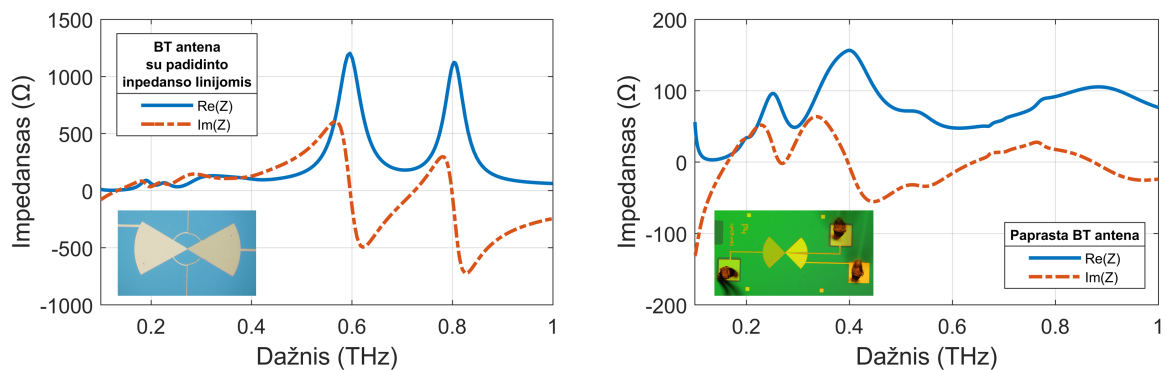
Ištirtos GFET THz detektorių jautrio priklausomybės nuo dažnio ir užtūros įtampos (viena jų pateikta 24 pav.). Paprastą BT anteną turintis THz detektorius geriausiai veikė esant 0,8 V užtūros įtampai ir 330-370 GHz dažniui, jo jautris siekė 22 V/W. Padidinto impedanso BT anteną turintis detektorius veikė geriausiai esant 0 V užtūros įtampai ir 560-600 GHz dažniui, jo jautris buvo 6 V/W. Taip pat pastebėta, kad padidinto impedanso BT anteną turintis detektorius yra jautresnis krentančio THz spindulio suvedimui.

Igytos antenų modeliavimo žinios pritaikytos kuriant naują GFET THz detektorių kartą, kuri jau gaminama „VTT Techninių tyrimų centre“. Bandinių litografijos kaukės pateiktos 22 paveiksle. Sukurtos įvairios antenos: 280 μm skersmens plačiajuostė paprasta BT antena (a) ir jos variantai: paprasta BT, kai GFET pasuktas 90° (b), padidinto impedanso BT (c) (BT metalas susiaurintas nuo 90° iki 60°), 896 μm skersmens plačiajuostė logaritminės spiralės antena (e), 212 μm ilgio ir 113 μm pločio atrankinė „Quad“ tipo antena (d), ir 164 μm centrinio skersmens atrankinė plyšinė antena (f).

Kaukių dizainai pirmiausia sukurti ultravioletinei (UV) litografijai, kad GFET THz detektorius būtų galima gaminti vietoje, „FTMC PFI“ švaros kambariuose. Taip pat dizainai pritaikyti elektronų pluošto (EP) litografijai ir atominių sluoksnių nusodinimui (ASN) - procesams, kuriuos naudoja



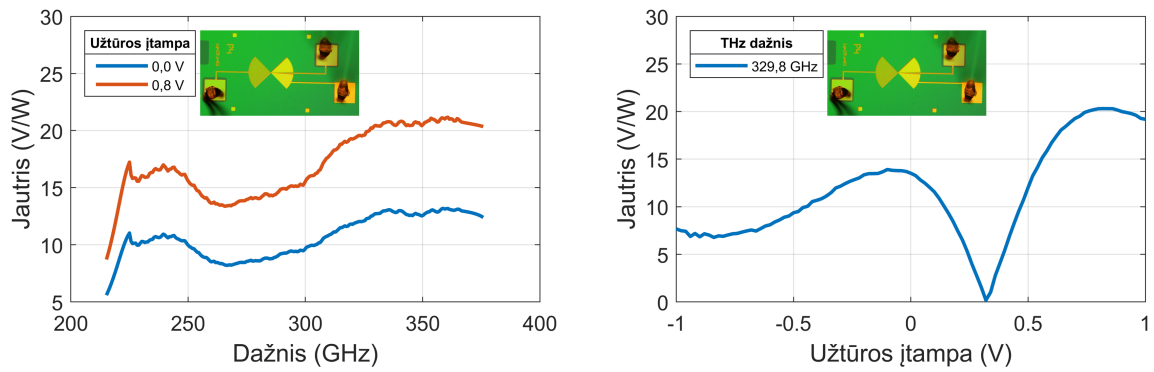
22 pav. Naujas GFET THz detektorių lusto dizainas: a), b) ir c) įvairios BT antenos, d) „Quad“, e) logaritminės spiralės ir f) plyšinio tipo antenos.



23 pav. Realųjų ir menamųjų impedanso dalių dažninės priklausomybės padidinto impedanso BT antenai (kairėje) ir paprastai BT antenai (dešinėje).

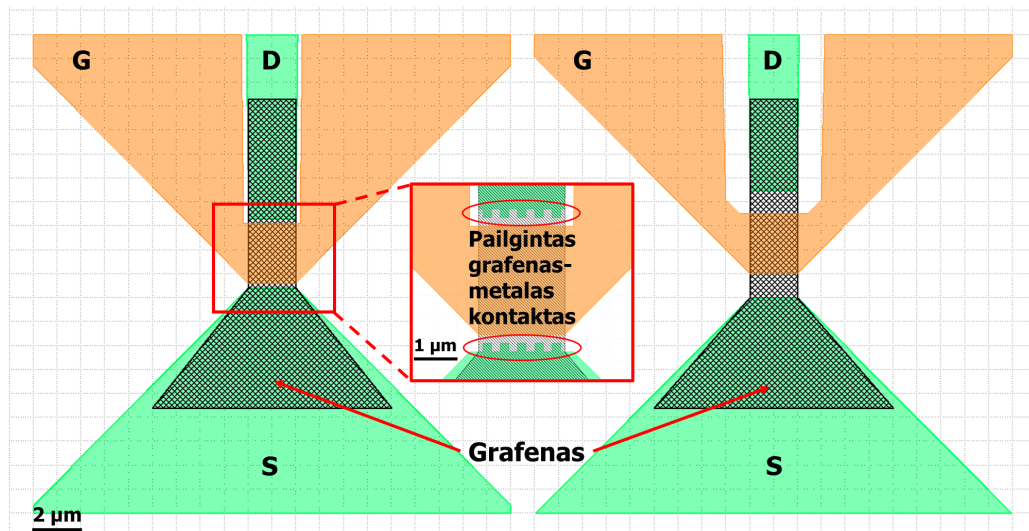
„VTT“. Pagrindinis metodų skirtumas yra tas, kad EP litografija leidžia kurti daug mažesnių storių ir matmenų struktūras nei UV litografija. Todėl tarpai tarp antenos metalų sumažinti nuo 1 μm iki 200 nm (25 paveiksle). Taip pat buvo padarytos papildomos kaukės Al_2O_3 dielektriko sluoksnio formavimui.

Grafeno laidumo ir karštų elektronų tyrimams padarytos antrinės antenų versijos. Kitaip nei tipiniuose puslaidininkiuose, grafeno-metalo kontaktinė varža priklauso ne nuo tūrio, o nuo ilgio [47]. Todėl santakos ir ištakos kontaktai iškarpyti (25 pav.). Dėl to grafeno-metalo kontakto

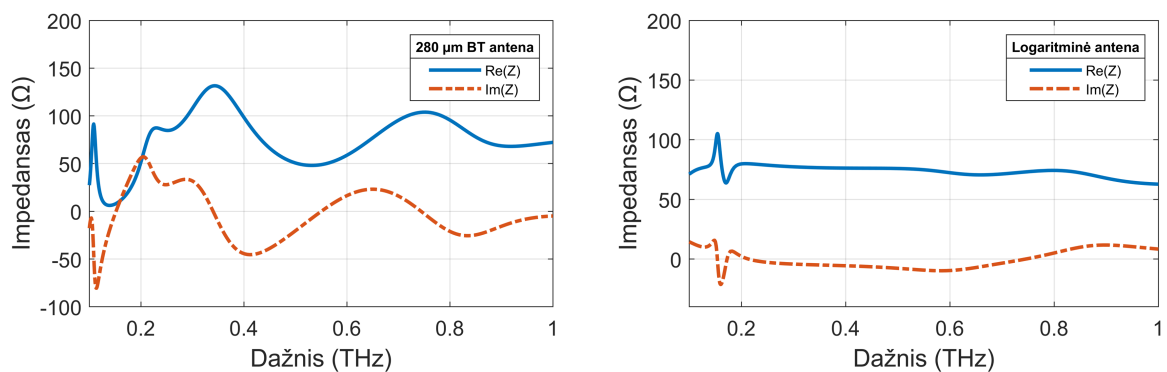


24 pav. GFET THz detektorių statinės jautrio dažninės charakteristikos (kairėje) ir jautrio priklausomybė nuo užtūros įtamos (dešinėje) THz detektoriui su paprastos BT antena.

varža galėtų sumažėti net iki dviejų kartų, o modeliavimas rodo, kad antenos charakteristikos nepakitusios. Tačiau kontakto ilginimo efektas gali būti silpnesnis, nes gamybos metu gali nepavykti išlaikyti aštrių kampų, o kvadrato kraštinė yra vos 200 nm.



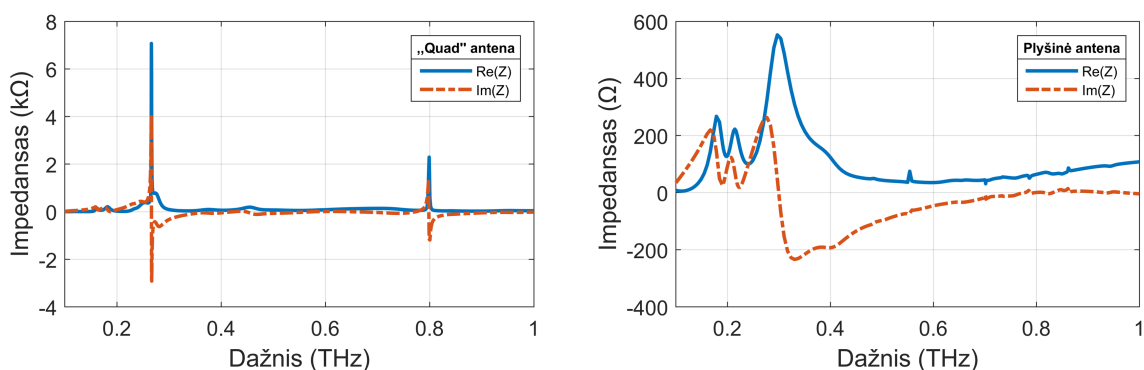
25 pav. GFET litografijos kaukės EP (kairėje) ir UV (dešinėje) litografijoms, sumažinti tarpai tarp metalų EP litografijai.



26 pav. Realiųjų ir menamųjų impedanso dalių dažninės priklausomybės BT antenai (kairėje) ir LOG antenai (dešinėje).

Naujoms antenoms sumodeliuotos impedanso dažninės priklausomybės. Pavyzdinės impedan-

so priklausomybės BT ir LOG antenoms pateiktos 26 paveiksle, o „Quad“ ir plyšinio tipo antenoms – 27 paveiksle. Matyti, kad atrankinio tipo antenos pasižymi didesniu impedansu, kas turėtų leisti geresnį GFET ir antenos impedansų suderinamumą. Tai reiškia, kad mažiau THz signalo atsispindės ir bus prarasta, tačiau antenos nėra plačiajuostės. LOG antena, tuo tarpu, pasižymi labai tolygiu impedansu dideliame dažnių ruože, kas turėtų leisti anteną pritaikyti plačiajuosčio detektoriaus kūrimui.



27 pav. Realiųjų ir menamųjų impedanso dalių dažninės priklausomybės „Quad“ antenai (kairėje) ir plyšinei antenai (dešinėje).

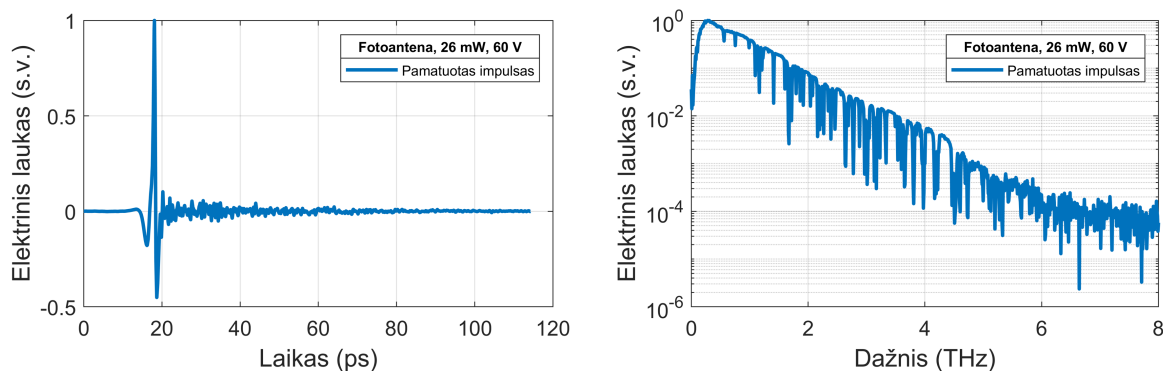
2 lentelė. Sumodeliuoti antenų parametrai.

Antena	Poliarizacija	Dažnis, GHz	Efektyvumas, %	Stiprinimas, dB	Kryptingumas, dB
Tirtos					
Paprasta BT (240 μm)	Lygiagreti kanalui	275-850	42-46	4,7-8,0	8,4-11,4
Padidinto impedanso BT (240 μm)	Lygiagreti kanalui	280-820	39-44	3,7-7,3	7,8-10,8
Naujos					
Paprastas BT (280 μm)	Lygiagreti kanalui	317-804	34-49	3,7-7,8	8,5-10,7
LOG	Sukamoji	175-858	37-58	3,3-8,9	7,6-11,3
„Quad“	Statmena kanalui	267	25	2,5	8,4
Plyšinė	Vienoda X ir Y kryptimis	304	45	4,0	7,6

Grafikuose stebimas žemadažnis impedansų svyravimas kyla ne iš pačios antenos, o dėl kontaktinių padelių. Visos kitos antenų pagrindinės charakteristikos svarbiausiems dažnių ruožams pateiktos 2 lentelėje. Jos yra pakankamai tipinės tranzistorinių THz detektorių antenoms.

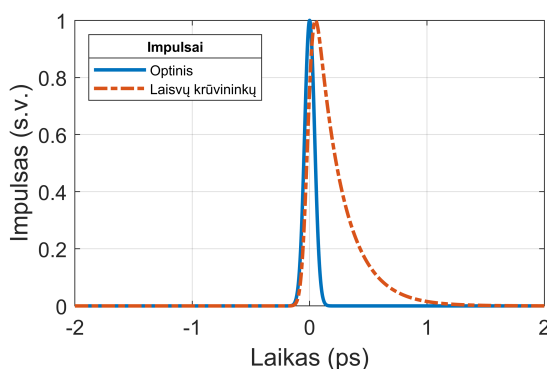
3.3 Pamatuotas femtosekundinis THz impulsas

THz impulsas ir jo FFT spektras, pamatuotas naudojant THz laikinę spektroskopiją, pateiktas 28 paveiksle. Pamatuoto impulso plotis yra 472 fs FWHM. Impulsas nėra visiškai švarus, stebimi impulso „uodegos“ svyravimai, kurie kyla dėl fotoantenos parazitinės varžos, talpos ir induktyvumo. Literatūroje parodyta, kad tokiu atveju fotosrovę galima modeliuoti kaip osciliuojančią LRC grandinę, kuri gęsta [48].



28 pav. THz impulsas, pamatuotas taikant laikinę THz spektroskopiją (kairėje), ir jo FFT spektras (dešinėje).

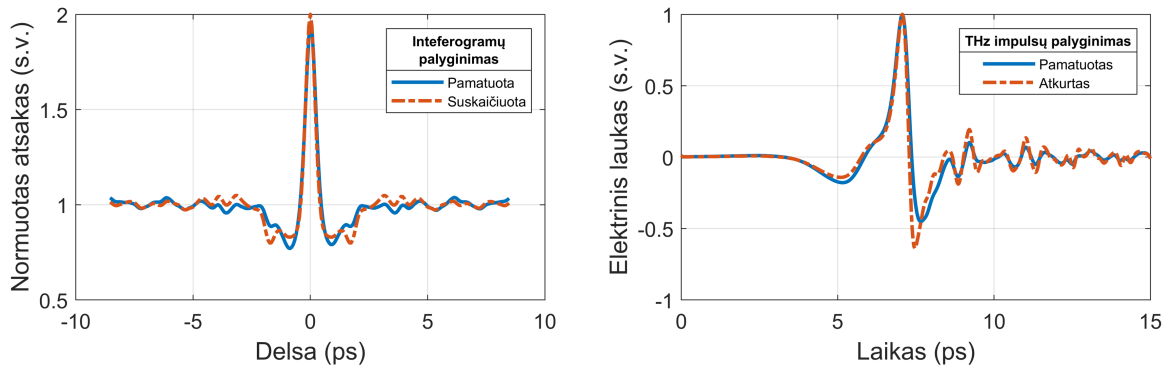
Pavyzdinis optinis 100 fs FWHM impulsas ir jo sugeneruotas fotosrovės impulsas pateikti 29 paveiksle. Pasinaudojus „MatLab“ *lsqcurvefit* funkcija, nustatyta, kad krūvininkų fotoantenoje relaksacijos trukmė yra 222,4 fs. Su „Tydex Golay“ detektoriumi pamatuota interferograma, jai pritaikyta THz impulso autokoreliacija ir atkurtas THz impulsas pateikti 30 paveiksle. Atkurto THz impulso plotis yra 411 fs FWHM.



29 pav. Optinis femtosekundinis impulsas ir jo sugeneruotas fotosrovės impulsas fotoantenoje.

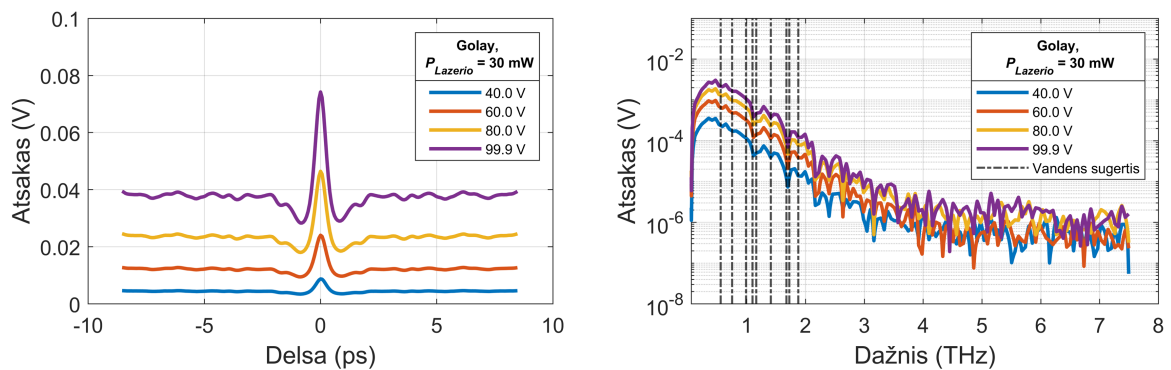
3.4 Pamatuotas netiesinis GFET THz detektorių atsakas

Referencinio signalo interferogramos ir jų spektrai pateikti 31 paveiksle. Stebimas moduliacijos gylis – 1,95 – nepriklauso nuo THz impulso galios. Interferogramos minimumai nėra lygūs nuliui. Kaip parodyta praetame skyriuje, impulso interferencija skiriasi nuo harmoninio signalo interferencijos. Geriausias galimas autokoreliacijos moduliacijos gylis esant tiesinei detekcijai yra



30 pav. „Tydex Golay“ detektoriumi pamatuota ir suskaiciuota THz impulso interferograma (kairėje), atkurtas THz impulsas įvertinus krūvininkų relaksacijos trukmę fotoantenoje (dešinėje).

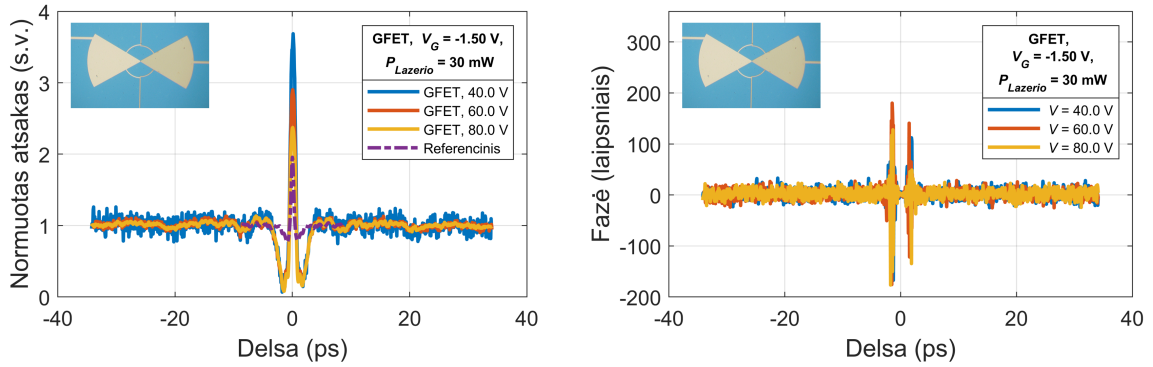
2, tačiau realaus eksperimento metu pamatuotas – 1,95. Tikėtina, kad tai dėl atspindžio, stebėto ties ± 10 ps delsa, kylančio dėl Golay narvelio apsauginio stikliuko. Norint išvengti stiprių atspindžio efektų skaičiuojant interferencijų spektrus su FFT, referenciniai matavimai buvo atlikti tik intervale nuo -8,5 ps iki 8,5 ps.



31 pav. „Tydex Golay“ pamatuotas referencinis atsakas į femtosekundinį THz impulsą prie skirtingų fotoantenos įtampų: kairėje – impulso interferogramos, dešinėje – impulso autokoreliacijos spektrai.

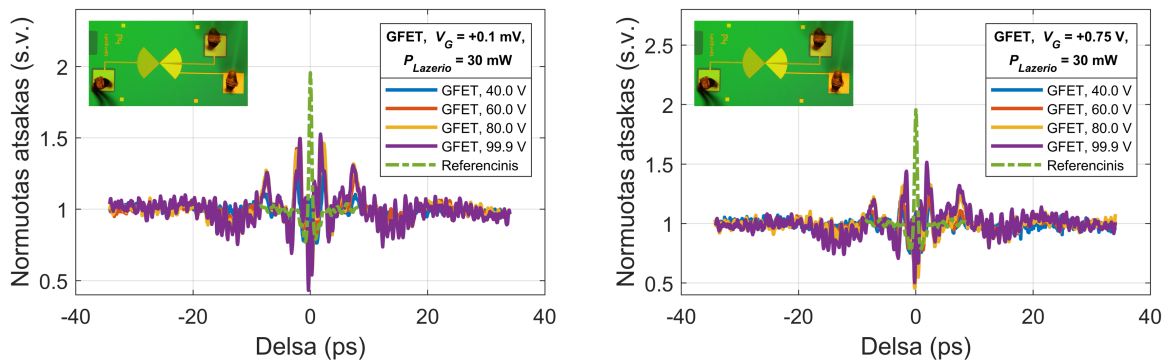
Keletas GFET THz atsakų matavimų rezultatų pateikti 32-34 paveiksluose. Prie neigiamos užtūros įtampos (32 pav.) interferograma demonstruoja net 3,7 karto padidėjusį signalą ties nuline delsa. Taip pat stebimi netiesiniai iškreipimai šoniniuose minimumuose, rodantys, kad GFET įtaisuose pasireiškia ne tik sotinimo, bet ir aukštesnio nei 2 laipsnio momentinio atsako į THz spinduliuotės galią fenomenai. Taip pat stebėtas ir fazės pokytis interferencijos minimumuose, nors šio reiškinio priežastys kol kas nėra aiškios.

Prie 0 V ir teigiamų užtūros įtampų pamatuotas THz impulso autokoreliacinis atsakas (33 pav.) skiriasi nuo matuoto prie neigiamų užtūros įtampų. Interferogramoje stebimi keli dideli maksimumai, palyginti su nulinės delsos maksimumu. Viena iš galimų priežasčių – kanale susidariusi papildoma delsa THz impulsui atsispindėjus nuo GFET kanalo ir neuždengto grafeno ribos. Panašūs rezultatai aprašyti literatūroje tiriant netiesinius atsakus grafeno nanovamzdeliuose [49]. Atsižvelgiant į dvigubą kanalo ilgį ($5 \mu\text{m}$), uždelstus maksimumus atitinkantys greičiai yra $2,88v_F$ ir $0,68v_F$. Šios vertės nėra panašios į krūvininkų greičius, tačiau gali būti plazminių bangų GFET



32 pav. Su GFET THz detektoriumi su padidinto impedanso antena pamatuoti netiesiniai THz atsakai prie -1.50 V užtūros įtampos, skirtingų fotoantenos įtampų (kairėje), pamatuotas fazės pokytis interferencijos minimumuose (dešinėje).

kanale greičiai.

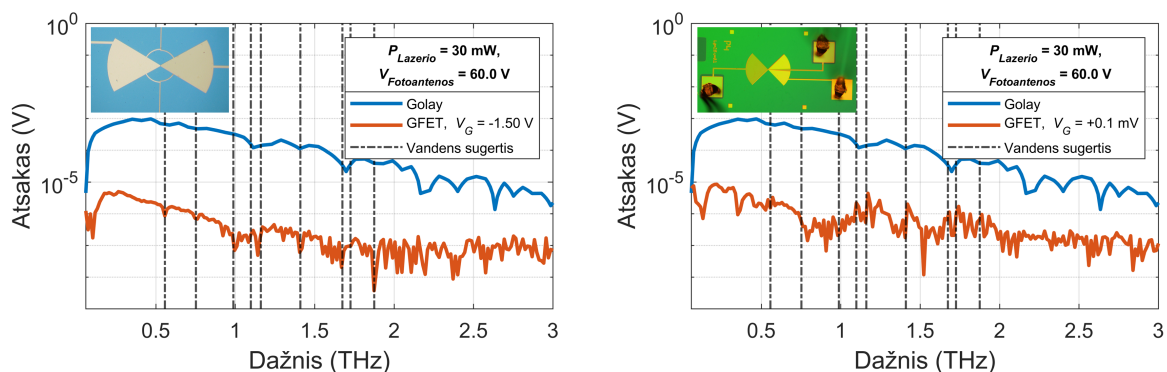


33 pav. Su GFET THz detektoriumi ir paprasta BT antena pamatuoti netiesiniai THz atsakai prie skirtingų fotoantenos įtampų: 0 V užtūros įtampos (kairėje) ir +0,75 V užtūros įtampos (dešinėje).

Tipiškai, autokoreliacijai galima pritaikyti greitąją Furjė transformaciją (FFT) ir taip nustatyti spinduliuotės dažninę charakteristiką. Tačiau dėl netiesinio atsako, aprašyto 21 formulėje, FFT parodytų ne originalaus THz signalo $E(t)$ dažninę charakteristiką, bet iškraipytą koeficiento n . Todėl tokių atsako spektrų negalima lyginti su tiesine detektorių veika.

Atlikus FFT transformaciją, keletas gautų spektrų pateikti 34 paveiksle (grafikai prasideda nuo 58 GHz, nes tai yra apatinė „Tydex Golay“ riba). Papildomai grafikuose atidėtos vandens sugerties linijos. Spektrai susideda iš dviejų dalių. Pagrindinė atsako dedamoji, kur vandens linijos sutampa su atsako sumažėjimu, yra detektuotas THz signalas (paprasta BT iki 600 GHz, padidinto impedanso BT – iki 1 THz). Taip pat stebima aukštadažnė dalis, kur vandens linijos nebeatitinka atsako dažninės charakteristikos. Tikėtina, kad ten dominuoja grafene susigeneravusio netiesinio atsako dalis.

Iš spektrų dalies virš 4 THz galima įvertinti FFT spektruose stebimą baltą triukšmą. Vertės, gautos prie 60 V fotoantenos įtampos, pateiktos 3 lentelėje. Kaip matyti iš pirmų dviejų lentelės stulpelių, surinkus detektorius į ekranuotą dėžutę, atsako matavimo sistemos signalo ir triukšmo santykis pagerėjo 7 kartus. Tai leido atsako netiesiškumą stebėti ir autokoreliacijų spektruose. Įvertinus teorinius šiluminius detektorių triukšmus, pastebėta, kad jie yra 5,8 ir 5,0 (atitinkamai pa-



34 pav. Iš interferogramų suskaičiuoti FFT spektrai, kai fotoantenos įtampa 60 V: kairėje – GFET THz detektorius su padidinto impedanso BT antena, kai užtūros įtampa -1,50 V, dešinėje – GFET THz detektorius su paprasta BT antena prie 0,00 V užtūros įtampas.

prasto ir padidinto impedanso BT detektoriams) kartus mažesni už pamatuotus, net kai detektoriai yra apsauginėje dėžutėje. Papildomai pamatuotas tik detektoriaus ir „SR830“ sistemos triukšmas, kuris vis tiek yra apie 2 kartus didesnis nei teorinis. Tai nėra keista, nes teoriniame skaičiavime neįskaičiuoti parazitiniai perdavimo linijų, matavimo įrenginių ir stiprintuvo triukšmai. Papildomas triukšmą didinantis elementas - dėžutės langas, skirtas THz impulso įvedimui į detektorius.

3 lentelė. Pamatuoti ir teoriniai detektorių triukšmai.

GFET THz detektorius	Triukšmas suskaičiuotas iš atsakų matavimo spektrų, prieš apsaugą, $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	Triukšmas suskaičiuotas iš atsakų matavimo spektrų, po apsaugos, $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	Teorinis varžos šiluminis triukšmas, $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	Teorinis varžos šiluminis ir „SR830“ triukšmai, $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	Pamatuotas triukšmas, kai kiti prietaisai išjungti (tik detektoriaus ir „SR830“), $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Su paprasta BT antena, kai $V_G = 0,0\text{V}$	358,98	50,62	8,79	11,58	20,42
Su padidinto impedanso BT antena, kai $V_G = -1,50\text{V}$	-	31,43	6,26	8,67	-

3.5 Tolimesni darbai

Planuojama pagal šiame darbe aprašytą tematiką parašyti mokslinį straipsnį. Tačiau tam dar trūksta integruoto (antenos ir GFET) THz detektoriaus modelio. Pirmiausia reikia grafeną apibrėžti ADS programoje. Jau bandyta tai padaryti, tačiau susidurta su iššūkiu – aprašyti grafeno krūvininkų tankius naudojant dilogaritmo funkciją. Skirtingai nei „MatLab“ programinė įranga, ADS neturi geros dilogaritmo aproksimacijos. Todėl reikalinga analitinė krūvininkų tankio priklausomybės nuo

užtūros įtampos formulė arba rasti tinkamą dilogaritmo aproksimaciją tiriamų užtūros įtampų ruože. Taip pat yra alternatyva modeliavimą atlikti „MatLab“ aplinkoje.

Planuojama tęsti mokslinius grafeno tyrimus doktorantūros studijose. Parodytus netiesinius GFET atsakus į femtosekundinę spinduliuotę galima panaudoti kuriant optoelektroninį aukštadažnį maišytuvą. Čia kyla viena iš grafeno elektronikos problemų – atkartojamumas. Šiame darbe tirti keletas labai panašių GFET bandinių (IV charakteristikos, tranzistorių matmenys), tačiau tokių atvejų yra vienetai. Vienas iš iššūkių yra grafeno gamybos stabilizacija. Didžiausias potencialas pasiekti gerus gamybos rezultatus - bendradarbiavimas su Ispanijos, Salamankos universiteto technologais (J. A. Delgado-Notario grupė), kurie gamina išskirtines eksfoliuoto grafeno struktūras. Kitas iššūkis – grafeno netiesinių charakteristikų valdymas. Šiame darbe parodyta, kad netiesiniai GFET THz detektorių atsakai priklauso nuo antenos charakteristikų, užtūros įtampos ir THz spinduliuotės galios. Tačiau prietaiso, paremto netiesine grafeno veika, gamybai reikalingi papildomi eksperimentiniai tyrimai ir analitinio bei skaitmeninio modeliavimo darbai.

Išvados

1. Nustatytas netiesinis grafeno tranzistorinių terahercų detektorių atsakas į femtosekundinius terahercų impulsus su 3,7 moduliacijos gyliu ties nuline delsa rodo, kad grafenas yra netiesinė medžiaga terahercų dažnių ruože. Šią savybę galima pritaikyti aukštadažnio maišytuvo ar stiprintuvo gamybai.
2. Sukurtas grafeno lauko tranzistorių kanalo varžos modelis leidžia įvertinti tranzistoriaus elektronų ir skylių judrį bei kontaktinę varžą su 1-3% santykinę paklaida, esant 95% pasiklivimo tikimybei.
3. 7 kartus padidintas signalo ir triukšmo santykis, surinkus grafeno tranzistorinį terahercų detektorių į ekranuotą dėžutę, rodo, kad detektoriai yra jautrūs aplinkos elektromagnetiniam triukšmui.

Literatūra

- [1] E. Javadi, D. B. But, K. Ikamas, J. Zdanevičius, W. Knap, and A. Lisauskas, Sensitivity of Field-Effect Transistor-Based Terahertz Detectors, *Sensors*, Apr. 2021, **21**, 2909.
- [2] N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, Terahertz Wireless Data Transmission With Frequency and Polarization Division Multiplexing Using Resonant-Tunneling-Diode Oscillators, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Sept. 2017, **7**, 593–598. Conference Name: IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.
- [3] X. Yin, B. W.-H. Ng, and D. Abbott, *Terahertz Imaging for Biomedical Applications*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [4] G. Valušis, A. Lisauskas, H. Yuan, W. Knap, and H. G. Roskos, Roadmap of Terahertz Imaging 2021, *Sensors*, Jan. 2021, **21**, 4092. Number: 12.
- [5] J. H. Choi, J. Lee, M. Byeon, T. E. Hong, H. Park, and C. Y. Lee, Graphene-Based Gas Sensors with High Sensitivity and Minimal Sensor-to-Sensor Variation, *ACS Applied Nano Materials*, Mar. 2020, **3**, 2257–2265. Publisher: American Chemical Society.
- [6] J. A. Delgado-Notario, V. Clericò, E. Diez, *et al.*, Asymmetric dual-grating gates graphene FET for detection of terahertz radiations, *APL Photonics*, June 2020, **5**, 066102.
- [7] H. J. Shin, J. Kim, S. Kim, *et al.*, Unsaturated Drift Velocity of Monolayer Graphene, *Nano Letters*, Mar. 2018, **18**, 1575–1581.
- [8] K. F. Mak, L. Ju, F. Wang, and T. F. Heinz, Optical spectroscopy of graphene: From the far infrared to the ultraviolet, *Solid State Communications*, Aug. 2012, **152**, 1341–1349.
- [9] S. A. Mikhailov, Nonperturbative quasiclassical theory of the nonlinear electrodynamic response of graphene, *Physical Review B*, Feb. 2017, **95**.
- [10] H. A. Hafez, S. Kovalev, J.-C. Deinert, *et al.*, Extremely efficient terahertz high-harmonic generation in graphene by hot Dirac fermions, *Nature*, Sept. 2018, **561**, 507–511.
- [11] D. Golde, M. Kira, T. Meier, and S. W. Koch, Microscopic theory of the extremely nonlinear terahertz response of semiconductors, *physica status solidi (b)*, 2011, **248**, 863–866.
- [12] S. Mikhailov, Frequency Mixing Effects in Graphene, Mar. 2011.
- [13] K. Ikamas, I. Nevinskas, A. Krotkus, and A. Lisauskas, Silicon Field Effect Transistor as the Nonlinear Detector for Terahertz Autocorellators, *Sensors*, Nov. 2018, **18**, 3735.
- [14] L. Liao, H. Peng, and Z. Liu, Chemistry Makes Graphene beyond Graphene, *Journal of the American Chemical Society*, Sept. 2014, **136**, 12194–12200.
- [15] J.-H. Chen, C. Jang, S. Xiao, M. Ishigami, and M. S. Fuhrer, Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂, *Nature Nanotechnology*, Apr. 2008, **3**, 206–209.

- [16] J. Wang, F. Ma, and M. Sun, Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications, *RSC Advances*, Mar. 2017, **7**, 16801–16822.
- [17] X. Sun, S. Zhang, Z. Liu, *et al.*, Correlated states in doubly-aligned hBN/graphene/hBN heterostructures, *Nature Communications*, Dec. 2021, **12**, 7196. Number: 1.
- [18] C. R. Dean, A. F. Young, I. Meric, *et al.*, Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics, *Nature Nanotechnology*, Oct. 2010, **5**, 722–726. Number: 10.
- [19] D. Cibiraitė, M. Bauer, A. Lissauskas, *et al.*, Thermal noise-limited sensitivity of FET-based terahertz detectors, in *2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)*, 1–4, June 2017.
- [20] K. Nagashio, T. Yamashita, T. Nishimura, K. Kita, and A. Toriumi, Electrical transport properties of graphene on SiO₂ with specific surface structures, *Journal of Applied Physics*, July 2011, **110**, 024513.
- [21] O. Habibpour, J. Vukusic, and J. Stake, A Large-Signal Graphene FET Model, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Apr. 2012, **59**.
- [22] S. Shafraniuk, *Graphene: Fundamentals, Devices, and Applications*. New York: Jenny Stanford Publishing, May 2015.
- [23] M. A. Al Faruque, M. Syduzzaman, J. Sarkar, K. Bilisik, and M. Naebe, A Review on the Production Methods and Applications of Graphene-Based Materials, *Nanomaterials*, Sept. 2021, **11**, 2414.
- [24] Graphenea, Grafeno produktai, *Graphenea EU*. <https://eu.graphenea.com/collections/all> (2024-05-15).
- [25] ACS Material, LLC, Grafeno produktai, *ACS Material US*. <https://www.acsmaterial.com/materials/graphene-series.html> (2024-05-15).
- [26] A. A. Generalov, M. A. Andersson, X. Yang, A. Vorobiev, and J. Stake, A 400-GHz Graphene FET Detector, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Sept. 2017, **7**, 614–616. Conference Name: IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.
- [27] J. Xia, F. Chen, J. Li, and N. Tao, Measurement of the quantum capacitance of graphene, *Nature Nanotechnology*, Aug. 2009, **4**, 505–509.
- [28] C. N. R. Rao, K. Gopalakrishnan, and A. Govindaraj, Synthesis, properties and applications of graphene doped with boron, nitrogen and other elements, *Nano Today*, June 2014, **9**, 324–343.
- [29] K. Ikamas, *Plačiajuosčių tranzistorinių THz detektorių modeliavimas ir taikymas veikai su impulsiniais ir nuolatinės veikos šaltiniais*. PhD thesis, Vilniaus universitetas. Prieiga per eLABa – nacionalinė Lietuvos akademine elektronine biblioteka, Vilnius, 2018. Book Title:

Plačiajuosčių tranzistorinių THz detektorių modeliavimas ir taikymas veikai su impulsiniais ir nuolatinės veikos šaltiniais.

- [30] M. Dyakonov and M. Shur, Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Mar. 1996, **43**, 380–387. Conference Name: IEEE Transactions on Electron Devices.
- [31] K. Ikamas, D. Cibiraitė, A. Lisauskas, M. Bauer, V. Krozer, and H. G. Roskos, Broadband Terahertz Power Detectors Based on 90-nm Silicon CMOS Transistors With Flat Responsivity Up to 2.2 THz, *IEEE Electron Device Letters*, Sept. 2018, **39**, 1413–1416.
- [32] M. J. E. Golay, Radiation detecting device, June 1951.
- [33] D. Klocke, A. Schmitz, H. Soltner, H. Bousack, and H. Schmitz, Infrared receptors in pyrophilous (“fire loving”) insects as model for new un-cooled infrared sensors, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Mar. 2011, **2**, 186–197. Publisher: Beilstein-Institut.
- [34] J. Vyšniauskas, K. Ikamas, D. Vizbaras, and A. Lisauskas, Two-dimensional hydrodynamic modelling of AlGaIn/GaN transistor-based THz detectors, *Lithuanian Journal of Physics*, Dec. 2023, **63**. Number: 4.
- [35] D. B. Davidson, *COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS FOR RF AND MICROWAVE ENGINEERING*. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [36] Z. Mics, K.-J. Tielrooij, K. Parvez, *et al.*, Thermodynamic picture of ultrafast charge transport in graphene, *Nature Communications*, July 2015, **6**, 7655.
- [37] K. Alexander, N. A. Savostianova, S. A. Mikhailov, B. Kuyken, and D. Van Thourhout, Electrically Tunable Optical Nonlinearities in Graphene-Covered SiN Waveguides Characterized by Four-Wave Mixing, *ACS Photonics*, Dec. 2017, **4**, 3039–3044.
- [38] S. Kovalev, H. A. Hafez, K.-J. Tielrooij, *et al.*, Electrical tunability of terahertz nonlinearity in graphene, *Science Advances*, Apr. 2021, **7**.
- [39] H. A. Hafez, S. Kovalev, K.-J. Tielrooij, M. Bonn, M. Gensch, and D. Turchinovich, Terahertz Nonlinear Optics of Graphene: From Saturable Absorption to High-Harmonics Generation, *Advanced Optical Materials*, 2020, **8**.
- [40] M. M. Jadidi, J. C. König-Otto, S. Winnerl, A. B. Sushkov, H. D. Drew, T. E. Murphy, and M. Mittendorff, Nonlinear Terahertz Absorption of Graphene Plasmons, *Nano Letters*, Apr. 2016, **16**, 2734–2738.
- [41] K. Ikamas, D. B. But, A. Cesiul, C. Kołaciński, T. Lisauskas, W. Knap, and A. Lisauskas, All-Electronic Emitter-Detector Pairs for 250 GHz in Silicon, *Sensors*, Jan. 2021, **21**, 5795.

- [42] E. Gaižauskas, O. Balachninaite, and O. Khasanov, Generation of THz-radiation by difference-frequency mixing at one- and two-photon resonances, *Lithuanian Journal of Physics*, Oct. 2014, **54**. Number: 3.
- [43] H. Wang, Y. Wu, C. Cong, J. Shang, and T. Yu, Hysteresis of Electronic Transport in Graphene Transistors, *ACS Nano*, Dec. 2010, **4**, 7221–7228. Publisher: American Chemical Society.
- [44] M. Groner, J. Elam, F. Fabreguette, and S. George, Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates, *Thin Solid Films*, June 2002, **413**, 186–197.
- [45] D. Vizbaras, K. Ikamas, S. Pralgauskaitė, J. Matukas, A. A. Generalov, and A. Lisauskas, Optimization of terahertz detectors based on graphene field effect transistors by high impedance antennae, *Lithuanian Journal of Physics*, Dec. 2022, **62**. Number: 4.
- [46] TeraVil Ltd, Informacija apie TeraVil Ltd | T-SPEC Real-Time Terahertz Spectrometer, <https://www.teravil.lt/t-spec.php> (2024-05-15).
- [47] S. M. Song and B. J. Cho, Contact resistance in graphene channel transistors, *Carbon letters*, 2013, **14**, 162–170.
- [48] I. Nevinskas, M. Kamarauskas, A. Geizutis, *et al.*, *Terahertz photoconductive switch performance dependence on antenna shape*. Mar. 2024.
- [49] Z. Zhong, N. M. Gabor, J. E. Sharping, A. L. Gaeta, and P. L. McEuen, Terahertz time-domain measurement of ballistic electron resonance in a single-walled carbon nanotube, *Nature Nanotechnology*, Apr. 2008, **3**, 201–205. Publisher: Nature Publishing Group.

Abstract

Domantas Vizbaras,

NONLINEAR RESPONSE OF A GRAPHENE FIELD-EFFECT TRANSISTOR TERAHERTZ DETECTOR TO FEMTOSECOND TERAHERTZ PULSES

Today, terahertz (THz) electronics receive significant attention in the fields of 6G telecommunications, high-frequency electronics, non-ionizing medical imaging, and security. Over the past decade, graphene has been demonstrated to be a highly nonlinear material in the terahertz frequency range (300 GHz - 10 THz). Observing this nonlinearity in graphene field-effect transistors (GFETs) could lead to a new generation of high-frequency mixers and amplifiers. Additionally, graphene could be utilized for applications such as pump-probe spectroscopy.

This thesis aimed to analyze the nonlinear response of a graphene field-effect transistor terahertz detector to the autocorrelation of femtosecond terahertz pulses. First, the GFET THz detector antennas and the transistor were modeled. Then, the devices were electronically packaged to protect them from static discharges and external electromagnetic noise. Subsequently, the static volt-ampere and responsivity characteristics of the GFET THz detector were measured. Using a Michelson interferometer, femtosecond pulse autocorrelation interferograms were obtained.

GFET modeling yielded typical values of charge carrier mobility ($2000\text{-}3000\text{ cm}^2/(\text{Vs})$, 1-3% standard error) for GFETs with graphene on SiO_2 . It also enabled the evaluation of the carrier density and effective mass dependence on transistor gate voltage. During the nonlinear response experiment, the GFET THz detector exhibited a modulation depth of 3,7 and nonlinear disturbances at interference minima, indicating that graphene devices demonstrate not only saturation characteristics but also higher than second-order moment response to incident THz power. This phenomenon has the potential to be used during PhD studies to develop an opto-electronic high-frequency mixer.

Bibliografinis aprašas

Domantas Vizbaras, „Netiesinis grafeno lauko tranzistorinių terahercų detektorių atsakas į femtosekundinius terahercų impulsus“, Fizikos magistrantūros, Elektronikos ir telekomunikacijų technologijų studijų programos baigiamasis darbas. Vad. dr. Kęstutis Ikamas. Vilnius: Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, 2024, 40 p.

Anotacija

Šiame darbe buvo tirti grafeno lauko tranzistoriniai (GFET) terahercų (THz) detektoriai su paprasta ir padidinto impedanso peteliškės antenomis. Apžvelgtas THz detektorių antenų modeliavimas, GFET krūvininkų judrio, masės ir kanalo varžos modeliavimas, THz detektorių elektroninis įpakavimas, statinis charakterizavimas, netiesinio atsako į femtosekundinius THz impulsus matavimo metodika. Parodyti aukštesnio nei antro laipsnio GFET THz detektorių momentinio atsako į THz spinduliuotės galią fenomenai.