

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
RADIOFIZIKOS KATEDRA**

Tomas Dabulskis

PLAČIAJUOSČIO TERAHERCŲ JUTIKLIO TYRIMAS

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – TAIKOMOJI FIZIKA)

Studentas

Tomas Dabulskis

Darbo vadovas

prof. Alvydas Lisauskas

Recenzentas

Kęstutis Ikamas

Katedros vedėjas

prof. Jūras Banys

Vilnius 2017

Turinys

Ivadas	1
1 THz detekcijai naudojami jutikliai	4
1.1 Šiluminiai jutikliai	4
1.1.1 Golėjaus narvelis.....	4
1.1.2 Piroelektrinis detektorius	5
1.1.3 Bolometriniai jutikliai	5
1.2 Diodiniai detektoriai.....	6
1.2.1 Šotkio barjero THz detektorius.....	6
1.3 Tiriamasis detektorius su Si lauko tranzistoriais	7
1.3.1 Varžinė signalų detekcija lauko tranzistoriais.....	7
1.3.2 Plazminiai THz detektoriai su lauko tranzistoriais.....	9
2 Optinė fokusavimo sistema	11
3 Jutiklio charakterizavimas	13
4 Rezultatai ir jų aptarimas	14
Išvados	17
Literatūros sąrašas	19
Santrauka	20

Įvadas

Žmogaus akis reaguoja į šviesą. Dėl šios priežasties mes galime stebėti savo aplinkos vaizdą ar matyti daiktus. Tačiau regimoji šviesa tėra mažas viso elektromagnetinių bangų spektro intervalas. Visas šis spektras nuolat yra aplink mus - infraraudonojoje spektro dalyje spinduliuoja visi šilti kūnai, radijo bangų diapazone dirba mūsų mobilieji telefonai; saulėtomis dienomis mūsų kūnus pasiekia iš saulės atkeliavę ultravioletiniai spinduliai, o toli atvirame kosmose susprogus žvaigždei mūsų planetą perveria rentgeno bei gama spinduliuotės srautas. Kiekvieno tipo spinduliuotė neša tam tikrą informaciją apie reiškinių, kuris ją sukėlė. Tačiau tam, kad tą informaciją galėtume priimti mums reikalingi prietaisai, gebantys reaguoti į spinduliuotę taip, kaip mūsų akys reguoja į regimąją šviesą. Tuo tikslu gaminami radijo imtuvai (iš principo - radijo bangų detektoriai), specialūs šiluminiai jutikliai pvz. bolometrai ar Golėjaus narveliai, taip pat puslaidininkiniai jutikliai, dažnai skirti fiksuoti aukštos energijos spinduliuotę ir veikiantys dėl medžiagoje vykstančių elektronų šuolių iš valentinės į laidumo juostą. Didelė dalis šių prietaisų ir įrenginių sukurti ir ištobulinti dar praeitame amžiuje, tad šiandien juos pagaminti paprasta bei nebrangu, todėl juos naudojame daugelyje savo gyvenimo sričių beveik kasdien, apie tai net nesusimąstydami.

Tačiau tam tikra dalis elektromagnetinių bangų spektro dar ir šiandien yra mažai ištirta ir prietaisai šiai spinduliuotei generuoti bei užfiksuoti dar tik kuriami. Tai - terahercinės bangos, elektromagnetinės spinduliuotės ruožas tarp $0.3THz$ ir $3THz$. Dar kitaip šis elektromagnetinių bangų ruožas vadinamas „Terahercų plyšiu“ (angl. *terahertz gap*). Toks pavadinimas prigijo dėl to, kad šis elektromagnetinių bangų ruožas įprastai nepasiekiamas nei žemadažnę spinduliuotę fiksuojantiems elektronikos įrenginiams (pvz. tranzistoriams) dėl ilgų pernašos trukmių, nei aukštadažnei spinduliuotei fiksuoti skirtiems ir kvantiniais efektais paremtiems jutikliams, dėl plačios draustinių energijų juostos, kurios įveikimui terahercinės spinduliuotės energijos nepakanka. Jei pavyktų sukurti pigų ir efektyvų terahercų šaltinį ir jutiklį, tai atvertų labai plačias galimybes. Ši spinduliuotė geriau už rentgeno spindulius tiktų paviršinių kūno audinių (odos, gleivinės) stebėjimui ir čia vykstančių procesų analizavimui dėl to, kad yra nejonizuojanti. Terahercai taip pat lengvai prasiskverbia per drabužius ar popierių, todėl yra tinkami saugumo patikroms oro uostuose ar paštuose. Dėl šių ir kitų potencialių terahercinės spinduliuotės panaudojimo būdų yra bandoma kurti tiek šaltinius, tiek jutiklius šiai spinduliuotei fiksuoti. Iki šiol praktiniuose panaudojimuose daugiausiai naudojami šiluminiai arba Šotkio diodų pagrindu pagaminti jutikliai. Tačiau gaminami ir silicio pagrindu sukurti jutikliai. Pagerinus silicio pagrindu pagamintus jutiklius tiek, kad šie taptų konkurencingi lyginant su iki šiol naudojamomis alternatyvomis, galėtume pasiūlyti paprastus ir nebrangius terahercinės spinduliuotės jutiklius, kuriuos dėl gerai išvystytos silicio mikroelektronikos pramonės būtų labai paprasta gaminti ir pateikti komerciniam naudojimui.

Vilniaus Universiteto Fizikos fakulteto Radiofizikos katedros Terahercų elektronikos labora-

torijoje taip pat kuriami THz jutikliai. Šiais jutikliais domisi net Europos Kosmoso Agentūra, tad jie turi nemažą komercinį potencialą. Šiuo atveju, norint komercializuoti jutiklius, būtina turėti pilną prietaiso dokumentaciją ir visas svarbias charakteristikas. Šio darbo tikslas - charakterizuoti VU FF RFK Terahercų elektronikos laboratorijoje pagal 90 nm technologiją silicio pagrindu pagamintą plačiajuostį terahercų spinduliuotės jutiklį.

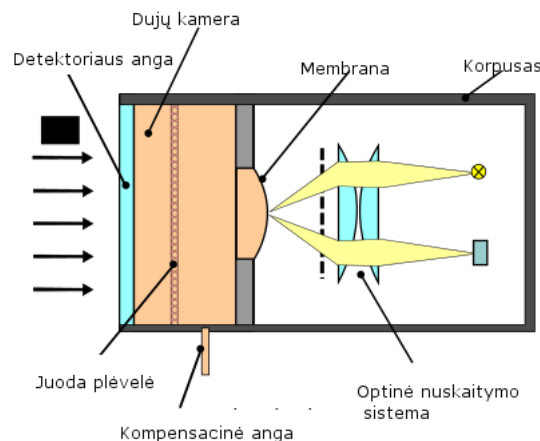
1 THz detekcijai naudojami jutikliai

Terahercinių bangų detekcijai naudojami įvairaus tipo detektoriai: šiluminiai, puslaidininkiniai, piroelektriniai ir kiti. Taip pat šie jutikliai gali būti skirstomi į naudojamus kambario temperatūroje arba šaldomus skystu heliu. Šiame darbe apžvelgiami ir su tiriamu silicio FET jutikliu palyginami kambario temperatūroje veikiantys kitų tipų jutikliai.

1.1 Šiluminiai jutikliai

Šiluminiai THz jutikliai - tai jutikliai, kurie fiksuoja spinduliuotę matuodami šios spinduliuotės sukeltą temperatūros pokytį. Toliau apžvelgiami keletas skirtingų šiluminio tipo THz jutiklių.

1.1.1 Golėjaus narvelis



1 pav. Golėjaus narvelio principinė schema

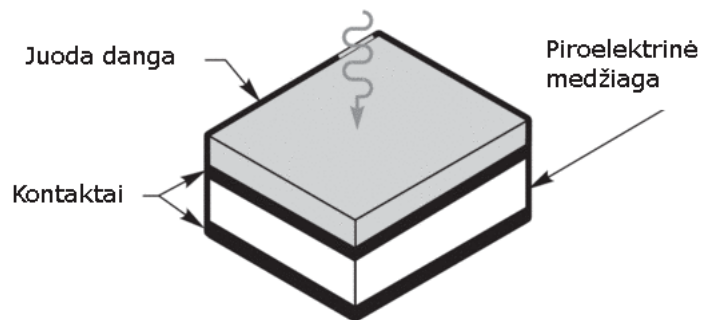
Golėjaus narvelis yra pneumatinis detektorius, kuris veikia į detektorių krentančiai spinduliuotei šildant jame esančias dujas ir šių tūriui dėl to kintant. Golėjaus narvelis sudarytas iš dujų kameros, spinduliuotę sugeriančios tamsios plėvelės, tamprios membranos ir optinės matavimo sistemos. Spinduliuotei patekus į dujų kamerą, ji yra sugerama kameros viduje esančios tamsios plėvelės. Tokiu būdu kameroje esančios dujos yra šildomos. Dujos šyla ir plečiasi, ir dėl to dujų kameros gale esanti membrana, kurios viena pusė padengta šviesą atspindinčia medžiaga, išsilenkia. Galinėje detektoriaus dalyje įtaisyta sistema tai užfiksuoja: šviesos diodas skleidžia šviesą, ši atsispindi nuo veidrodinės membranos ir patenka į fotodiodą. Membranai išsilenkus, pasikeičia kampas, kuriuo šviesa atsispindi nuo membranos. Dėl šios priežasties šviesa fotodiodą pasiekia jau kitoje vietoje. Šitas poslinkis tiesiogiai priklauso nuo membranos išlin-

kimo, kuris, savo ruožtu, tiesiogiai priklauso nuo dujų temperatūros ir į detektorių krentančios spinduliuotės galios.

Golėjaus narvelis veikia kambario temperatūroje ir turi vieną geresnių jautrių panašių detektorių tarpe. Didžiausi Golėjaus narveliu pasiekiami jautriai yra 10^5 V/W, o NEP apie 0.8×10^{-10} W/Hz^{1/2} [1]

1.1.2 Piroelektrinis detektorius

Kai kurios medžiagos turi tam tikrą poliarizuotumą net ir tada, kai nėra veikiamos išorinio elektrinio lauko. Tokios medžiagos vadinamos feroelektrikais. Taip yra todėl, kad šias medžiagas sudarantys elektriniai dipoliai tam tikrame temperatūros intervale patys savaime poliarizuojasi, t.y. orientuojasi ta pačia kryptimi. Tokia savaiminė poliarizacija yra jautri temperatūros pokyčiams - keičiantis temperatūrai, krūvininkai medžiagos viduje persiskirsto, dėl to keičiasi visos medžiagos poliarizuotumas, o šis pokytis sukuria medžiagoje potencialų skirtumą, kurį galima išmatuoti - tai vadinama piroelektriniu efektu. [2]



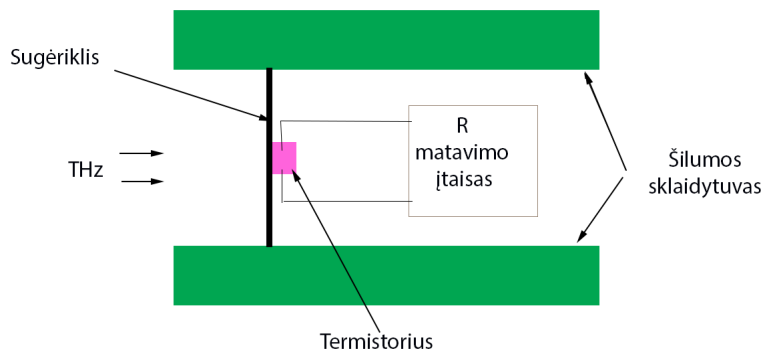
2 pav. Piroelektrinio jutiklio schema

Piroelektrinis detektorius yra šiluminis detektorius, sudarytas iš jau aprašyto piroelektrinių savybių turinčio kristalo, dviejų kontaktų (dažniausiai pagamintų iš nichromo) ir juodo dažų sluoksnio, kuris sugeria krentančią spinduliuotę ir paverčia ją šilumine energija. Ši šiluminė energija keisdama piroelektrinio kristalo temperatūrą kuria potencialų skirtumą tarp ant kristalo uždėtų kontaktų, o pastarąjį jau galima išmatuoti. Visas detektorius iš esmės yra kondensatorius, tarp kurio kontaktų atsiranda įtampa, kai į jo paviršių krenta spinduliuotė. [3]

Geriausių piroelektrinių detektorių ekvivalentinė triukšmo galia siekia 500 pW/Hz^{1/2}. [4]

1.1.3 Bolometriniai jutikliai

Bolometras susideda iš dviejų pagrindinių dalių - sugėriklio ir elemento, kurio varža priklauso nuo temperatūros (pvz. termistoriaus). Į bolometro sugėriklių krentant spinduliuotei, ši yra sugerama ir sugėriklis įšyla. Dėl įšilusio sugėriklio šyla ir bolometre esantis termistorius



3 pav. Bolometro stuktūrinė schema

(ar kitas elementas). Keičiantis termistoriaus temperatūrai, keičiasi ir jo varža, dėl to atsiranda įtampos pokytis, kurį galime fiksuoti.

Bolometras reaguoja į šiluminį elektromagnetinės bangos poveikį, tad juo fiksuojamas signalas priklauso nuo spinduliuotės galios, bet nepriklauso nuo spinduliuotės bangos ilgio, tad bolometrą galima naudoti labai plačiame dažnių diapazone. Jis nereaguoja į spinduliuotės fazės pokyčius.

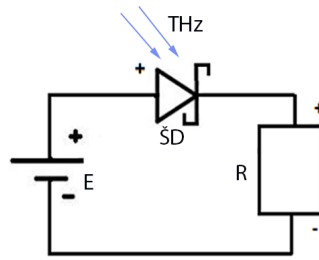
Pagrindiniai bolometrų ir visų šiluminių detektorių kokybės parametrai yra jų jautris (išreiškiama V/W arba A/W , priklausomai nuo to, koks parametras matuojamas kaip atsakas) ir jų ekvivalentinė triukšmo galia (matuojama $W/Hz^{1/2}$) apibrėžiama kaip tokia į detektorių krentančios spinduliuotės galia, kad detektoriaus išėjime signalo-triukšmo santykis būtų lygus 1.

Bolometro sugėriklio medžiaga turi turėti didelę sugerties gebą ir mažą šiluminę talpą. Sugėriklis gali būti pagamintas iš metalo, stipriai legiruoto puslaidininkio ar superlaidininko plėvelės. Kambario temperatūroje bolometrų su metaliniais sugėrikliais tipinis jautris yra $100 V/W$ ir ekvivalentinė triukšmo galia apie $4.5 \times 10^{-10} W/Hz^{1/2}$. [5]

1.2 Diodiniai detektoriai

1.2.1 Šotkio barjero THz detektorius

Šotkio diodas gaunamas tuomet, kai stipriai p-tipo arba n-tipo atomais legiruotas puslaidininkis yra padengiamas gryno metalo sluoksniu (dažniausiai metalas yra užgarinamas ant puslaidininkio). Vos šioms dviem medžiagoms susilietus elektronai iš puslaidininkio teka į metalą. Dėl šios priežasties sandūroje susidaro krūvio sanakaupa, kuri iškreipia puslaidininkio elektronų energijos lygmenis ir susidaro energijos slenkstis, kurio elektronai negali įveikti be išorinio lauko poveikio. Detektoriaus funkciją šotkio diodas atlieka jį pasiekusį kintamą signalą išlygindamas, t.y. išduodamas DC signalą, kurio amplitudė proporcinga detektorių pasieku-



4 pav. Detektoriaus su Šotkio diodu schema

sios elektromagnetinės bangos galiai. Gautą signalą galima matuoti tiesiogiai, arba galima juo įkrovinėti kondensatorių, kurio įtampą taip pat galima išmatuoti.

Lyginimas šiame detektoriuje gaunamas dėl netiesinės diodo Šotkio sandūros voltamperinės charakteristikos. Dėl šios priežasties, parinkę tinkamą anteną galime naudoti kaip tiesioginės veikos THz detektorių.

Šotkio diodais paremtų detektorių jautris įprastai būna tarp 4000 V/W prie 100 GHz ir 400 V/W prie 900 GHz . Ekvivalentinė triukšmo galia siekia $1.5 \cdot 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$. [6]

1.3 Tiriamasis detektorius su Si lauko tranzistoriais

Šio darbo tiriamasis objektas - VU FF TFK Terahercų elektronikos laboratorijoje silicio lauko tranzistorių pagrindu pagamintas jutiklis. Šiame jutiklyje srovės lyginimui išnaudojamas tranzistoriaus kanale vykstantis reiškinys, kurio neriboja tranzistoriaus ribinis darbo dažnis, kurį, savo ruožtu, lemia krūvininkų pernašos trukmė. Šis reiškinys - kanale susidarantys krūvininkų tankio svyravimai arba kitaip - plazminės bangos. Iš esmės tai reiškia, kad nors krūvininkai fiziškai nespėja įveikti kanalo, tam kad sukeltų fiksuojamą signalą, tačiau jie spėja susiburti į tam tikras sritis, kuriose krūvių tankiai skiriasi. Taigi susidaro tam tikras kanalu sklindantis svyravimas arba kitaip - banga, kuri ir išnaudojama signalo detekcijai.

1.3.1 Varžinė signalų detekcija lauko tranzistoriais

Nors toliau aptariamam atveju detektorius THz signalams detektuoti netinka, tačiau nuo čia paprasčiau pradėti aiškinti THz detekcijos mechanizmą. Panašiai kaip ir detektoriaus su Šotkio diodu atveju, lauko tranzistorius gautą signalą lygina ir išduoda nuolatinės įtampos signalą. Šiame eksperimente naudojami silicio detektoriai išlygina gaunamą signalą ir tranzistoriaus santakoje fiksuojamas nuolatinis signalas, proporcingas krentančios elektromagnetinės bangos galiai.

Srovę lauko tranzistoriaus santakoje nusako išraiška:

$$I_d = G_{ds} U_{ds} \quad (1)$$

Čia G_{ds} - tranzistoriaus kanalo laidis; U_{ds} - įtampa tarp tranzistoriaus ištakos ir santakos. Pasiiekti signalo lyginimą detektoriuose su lauko tranzistoriais galima naudojantis užtūros ištakos suporavimu [7].

Jei tarp ištakos ir užtūros elektrodų įjungsime kintamą signalą, moduluosime kanalo laidį tokiu pačiu dažniu, kokį turi signalą kurianti elektromagnetinė banga:

$$U_{gs} = U_g + U_{RF} \sin(\omega_{RF} \tau) \quad (2)$$

Kad gautume signalo lyginimą, tokiu pat kintamu signalu reikia moduluoti ir įtampą tarp tranzistoriaus ištakos ir santakos kontaktų:

$$U_{ds} = U_{RF} \sin(\omega_{RF} \tau) \quad (3)$$

Tai pasiekama naudojant šuntuojantį kondensatorių, jungiantį santakos ir užtūros kontaktus.

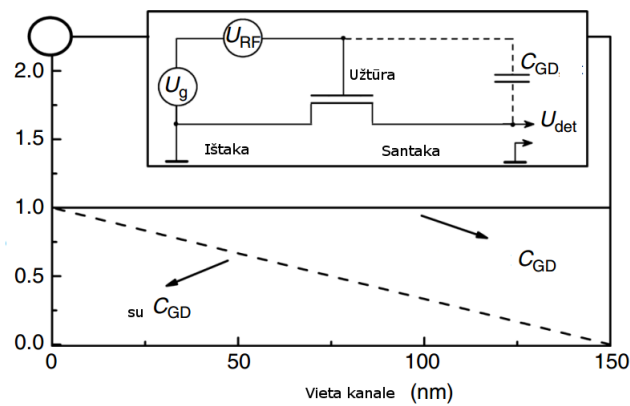
Dėl tokios dvigubos moduliacijos santakoje atsiranda srovė:

$$I_d \propto \sin^2(\omega_{RF} \tau) \quad (4)$$

Taigi, detektuojama santakos srovės vertė [8]:

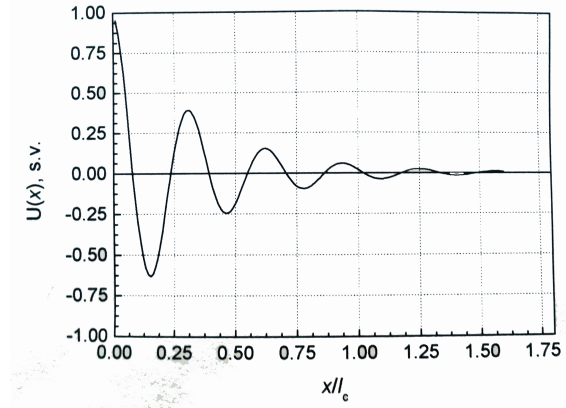
$$I_{det} = \langle I_d \rangle = G_{ds} \frac{U_{RF}^2}{4(U_g - U_{th})} \quad (5)$$

Gauname, kad detektuojamas signalas proporcingas krentančios spinduliuotės galiai U_{RF}^2 .



5 pav. Įtampos tarp užtūros ir kanalo osciliacijų amplitudės priklausomybė nuo bangos nueito atstumo kanale [7]

Varžinė signalų detekcija veikia kai neviršijamas lauko tranzistoriaus ribinis dažnis. Šiuo principu veikiantys detektoriai funkcionuoja esant iki 3 GHz dažniui [9].



6 pav. Plazminė banga tranzistoriaus kanale [4]

1.3.2 Plazminiai THz detektoriai su lauko tranzistoriais

Įprastai laikoma, kad lauko tranzistoriai nustoja veikti kai viršijamas tam tikras ribinis dažnis (angl. cutoff frequency), kurį lemia krūvio pernašos trukmė τ nagrinėjamame tranzistoriuje. Šis teiginys galioja, kai kalbama apie galios stiprinimą arba loginius elementus. Tačiau jei norime, kad tranzistorius lygintų srovę, šis teiginys tampa neteisingu dėl tranzistoriuje tam tikromis sąlygomis susidarančių krūvininkų tankio svyravimų (plazminių bangų) [10], kurie ir naudojami signalo detekcijai.

Pirmieji galimybę fiksuoti THz bangas pasinaudojant lauko tranzistoriais aprašė Djakonovas ir Šuras [11, 12]. Pagal Djakonovą ir Šurą, THz detekcija vyksta dėl to, kad veikiant elektromagnetinei bangai tranzistoriaus kanale (o tiksliau tik jo dalyje, pačioje kanalo pradžioje) susidaro plazminė banga. Kaip atsakas šiai bangai, susikuria nuolatinė įtampa tarp tranzistoriaus ištakos ir santakos. Ši nuolatinė įtampa yra proporcinga detektorių pasiekiančios spinduliuotės galiai.

Kad būtų galima paaiškinti lyginimo reiškinį [10], pirmiausiai užrašome lygtis, aprašančias krūvininkų pernašą tranzistoriaus kanale pagal hidrodinaminį modelį:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{e}{m} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{v}{\tau} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nv}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Tada įskaitom išorinį virpesinį dažnį ω ir amplitudės V_a sužadinimą:

$$U(x, t) = \bar{U} + \frac{1}{2} [U_1 e^{i\omega t} + U_2 e^{i2\omega t} + \dots] + c.c. \quad (8)$$

$$v(x, t) = \bar{v} + \frac{1}{2} [v_1 e^{i\omega t} + v_2 e^{i2\omega t} + \dots] + c.c. \quad (9)$$

$$n(x, t) = \bar{n} + \frac{1}{2}[n_1 e^{i\omega t} + n_2 e^{i2\omega t} + \dots] + c.c. \quad (10)$$

Statom į (6) ir (7) lygtis, palikdami tik nuostovius ir nuo laiko nepriklausančius narius:

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{e}{m} \bar{U} + \frac{v_1 v_1^*}{4} \right] + \frac{\bar{v}}{\tau} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dx} [s^2 \bar{v} + \frac{e}{m} \frac{v_1 U_1^* + v_1^* U_1}{4}] = 0 \quad (12)$$

Žvaigždutės čia žymi kompleksiskai jungtinius narius. Kanalui be įtampos nuostovus greitis:

$$\bar{v} = -\frac{e}{m} \frac{v_1 U_1^* + v_1^* U_1}{4s^2} \quad (13)$$

Dabar pasinaudojant (11), detektoriuje indukuotas signalas $\Delta U = U(L) - U(0)$:

$$\Delta U = \frac{e}{m} \frac{V_a^2}{4s^2} f(\omega) \quad (14)$$

Čia bedimensis daugiklis apibrėžiamas kaip:

$$f(\omega) = -\left(1 + \frac{2\omega\tau}{sqr{1 + (\omega\tau)^2}} \frac{\sinh^2 k_2 L - \sin^2 k_1 L}{\cosh^2 k_2 L - \cos^2 k_1 L}\right) \quad (15)$$

Tikėtinas tokio detektoriaus jautris:

$$R = \frac{1}{2\eta V_T \ln(1 + \frac{1}{2} e^{(V_G - V_{th})/\eta V_T}) (1 + 2e^{-(V_G - V_{th})/\eta V_T})} \quad (16)$$

Lygtis (23) nusako srovinį jautrį ties kvazi-statinės veikos riba panašiai kaip tai vyksta diodiniuose srovės lygintuvuose. Įskaičius nuostolius detektoriaus antenoje, taip pat nesuderintus antenos bei tranzistoriaus impedansus turime tokią išraišką:

$$R_i = \frac{\frac{\Delta U}{R_{d, QS}}}{P_{in}} = R_{I, QS} f(\omega) \frac{Re Z_{ant}}{R_{d, QS}} \frac{\epsilon}{2} \left| \frac{2Z_d}{Z_d + Z_{ant}} \right|^2 \quad (17)$$

Tokio jutiklio ekvivalentinė triukšmų galia:

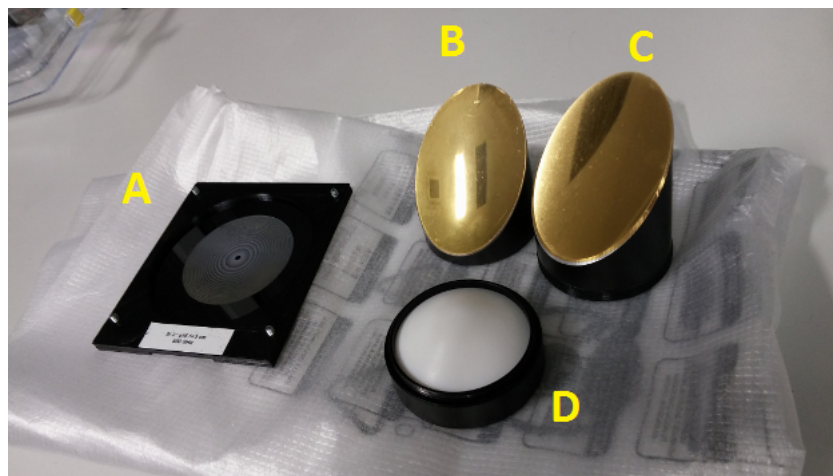
$$NEP = \frac{\sqrt{4k_B T}}{\sqrt{R_{d, QS} R_I}} \quad (18)$$

2 Optinė fokusavimo sistema

Dėl mažos THz šaltinio galios detektoriuje fiksuojamas signalas gali būti silpnas, net jei pats jutiklis yra labai jautrus. Todėl jutiklių charakterizavimo eksperimentuose svarbu kuo daugiau šaltinio spinduliuotės perduoti į detektoriaus antenos efektyvų plotą su kuo mažiau nuostolių, kurie atsiranda veikiant tiek optiniams elementams, kuriais perduodama spinduliuotė, tiek dėl pačios spinduliuotės sąveikos su detektoriumi.

Kursiniame darbe "Kvazioptinių sistemų tyrimas" buvo atlikti eksperimentai siekiant surasti geriausią fokusuojančių optinių elementų kompleksą, gebantį efektyviausiai nukreipti spinduliuotę į efektyvų jutiklio antenos plotą.

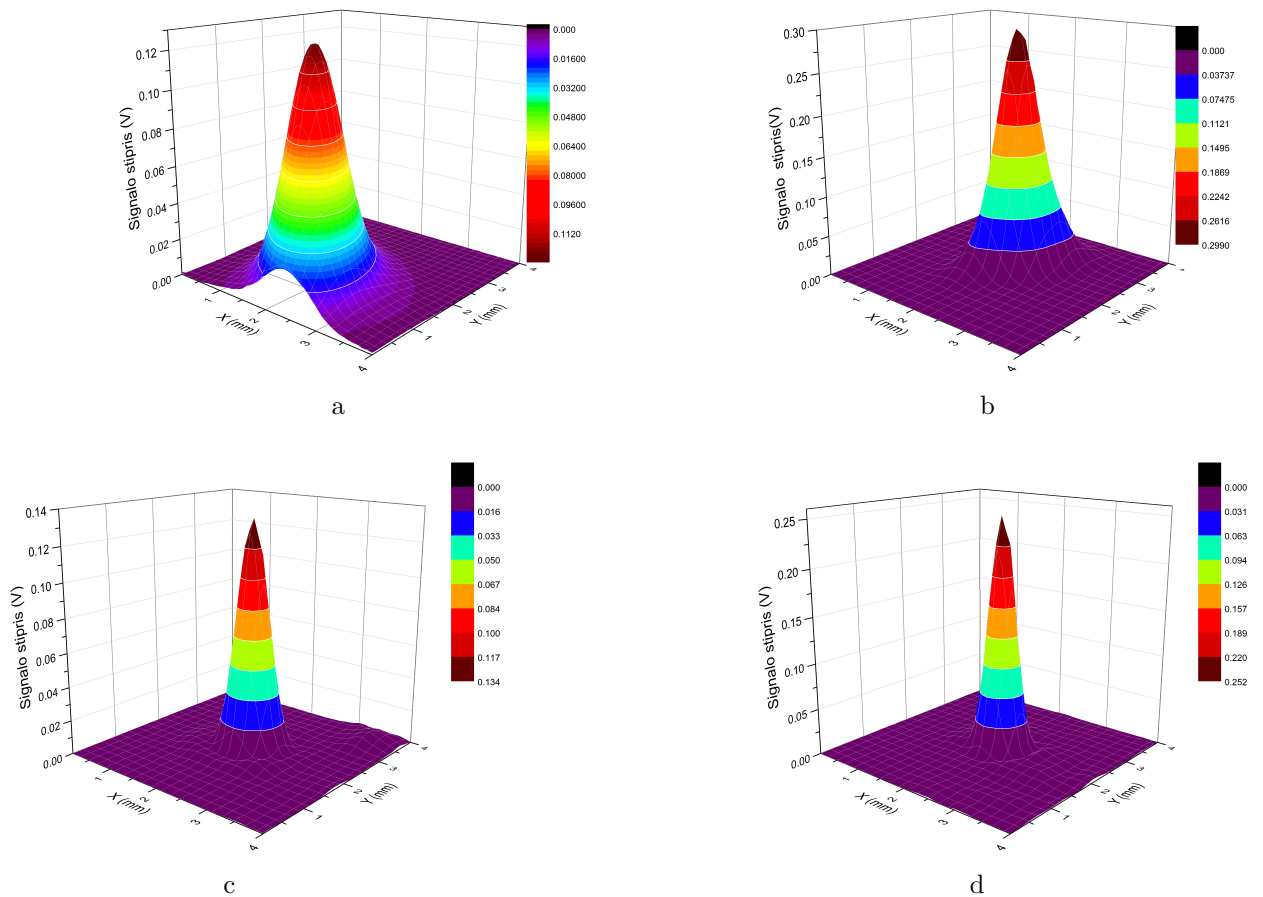
Eksperimento metu buvo keičiami fokusuojančiosios optikos komponentai ir tuomet užfiksuojamas į detektorius krintančio signalo vaizdas. Naudoti tokie optiniai komponentai:



7 pav. A-Frenelio lęšis, $F = 3\text{cm}$; B- parabolinis veidrodis, $F = 5\text{cm}$; C - parabolinis veidrodis, $F = 10\text{ cm}$; D- tefloninis lęšis, $F = 2.5\text{cm}$

Gauti rezultatai - $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ dydžio į detektorius krentančios spinduliuotės skerspjūvių vaizdai. Iš šių vaizdų, programa Origin 8.5, surasti į detektorius krentančių terahercinių spindulių skersmenys ties puse maksimalios amplitudės (angl. FWHM). Duomenys pateikti toliau:

Matome, kad nepaisant naudojamų optinių elementų skirtumų, yra ryški priklausomybė tarp detektorius pasiekusio spindulio skersmens ir optinio elemento židinio nuotolio. Atitinkamai matome, kad prasčiausiai sufokusuotas buvo spindulys atspindėjęs nuo 4 colių parabolinio veidrodžio, čia spindulio skersmuo ties puse maksimalios amplitudės lygus $d = 1.71\text{mm}$. Naudojant veidrodžius taip pat yra šiek tiek iškraipomas vaizdas, nes detektorius užfiksuoja ir atspindžius nuo savęs. Šito galima išvengti naudojant papildomą atenuatorių arba naudojant kitokio tipo optiką (pvz. tefloninius lęšius). Labiausiai fuokusuotą terahercų spindulį gauname tuomet, kai naudojame tefloninį lęšį ($f = 2.5\text{cm}$). Šiuo atveju spindulio skersmuo siekia vos $d = 0.8\text{mm}$. Tačiau iškyla kita problema - dėl sugerties (teflono sugerties koeficientas tiriamame dažnyje yra maždaug $\alpha = 0.8\text{cm}^{-1}$) storame lęšyje prarandama nemažai signalo. Šiuo konkrečiu



8 pav. a- 4 colių veidrodžiu gaunamas vaizdas; b - 2 colių veidrodžiu gaunamas vaizdas; c- Frenelio lęšiu($f=3\text{cm}$) gaunamas vaizdas; d - tefloniniu lęšiu ($f=2.5\text{cm}$) gaunamas vaizdas

atveju teflono lęšis praranda pagrindinį pranašumą prieš 2 colių parabolinį veidrodį, nes net ir sugebėdamas efektyviau sufokusuoti terahercų pluoštą, dalį jo sugeria, o paraboliniame veidrodyje sugertis nepasireiškia. Praktiniuose pritaikymuose tai reikštų didelį signalo praradimą ir suprastėjusį signalo-triukšmo santykį. Žemiau pateikiami rezultatai gauti su visais tirtais optiniais elementais:

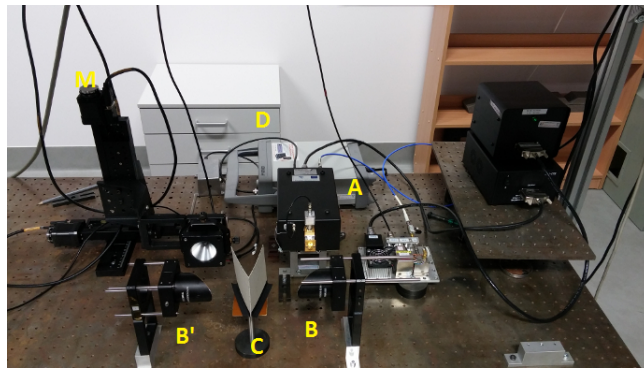
1 lentelė. Sistemų su skirtingais optiniais elementais paremetrų palyginimas

Optinis elementas:	$f(\text{cm})$	$d_{FWHM}(\text{mm})$	$U_{max}(\text{V})$	$R(\text{V/W})$
4 Colių veidrodis:	10.16	1.71	0.112	206.48
2 Colių veidrodis:	5.08	1.42	0.299	174.19
Tefloninis lęšis:	2.5	0.8	0.252	67.3
Frenelio lęšis:	3	0.93	0.134	49.97

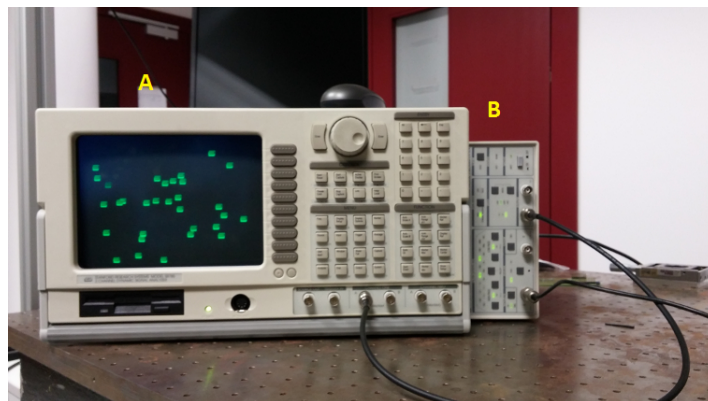
Darbiui "Plačiajuosčio terahercų jutiklio tyrimas" pasirinkta optinė sistema, sudaryta iš 4 colių parabolinių veidrodžių. Tokia sistema pasirinkta dėl darbo su ja paprastumo - esant labai stipriai fokusuotam THz spinduliui pasidaro labai sudėtinga tinkamai pozicionuoti jutiklį.

3 Jutiklio charakterizavimas

Si FET jutiklio charakterizavimas atliktas VU FF RFK Terahercų elektronikos laboratorijoje esančiame terahercų stende. Charakterizavimo metu naudotas VDI-175 terahercų šaltinis. Šaltinis geba generuoti spinduliuotę 500 - 750 GHz intervale. Visa šaltinio spinduliuotė dviem 4 colių paraboliniiais veidrodžiais perduodama į jutiklio anteną. Pats jutiklis patalpintas ant dviejų 8MT175-100 motorizuotų transliatorių. Šių transliacinių staliukų pagalba jutiklis pozicionuojamas tame erdvės taške, kuriame gaunamas didžiausias jutiklio atsakas. Jutikliu užfiksuotas signalas tūkstantį kartų sustiprinamas stiprintuvu ir fiksuojamas spektro analizatoriuje. Dėl paprastesnio signalo išskyrimo THz šaltinis moduluojamas 888 Hz dažniu, tuo pačiu išvengiant pašalinių trikdžių pasireiškimo fiksuojamame signale.



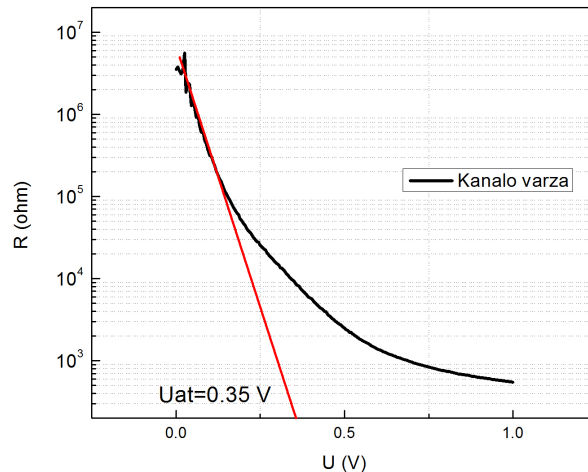
9 pav. A - THz šaltinis veikiantis 500 GHz - 750 GHz dažnių juostoje; B ir B' - 4 colių židinio nuotolio paraboliniai veidrodžiai; C - atenuatorius, neleidžiantis susidaryti stovinčioms bangoms; D - dažnių generatoriaus signalo moduliavimui; M - transliacinių staliukų sistema, skirta detektoriaus pozicionavimui.



10 pav. A - spektro analizatorius, kuriuo matuojamas detektoriaus atsakas; B - stiprintuvas, skirtas detektuojamam signalui sustiprinti;

4 Rezultatai ir jų aptarimas

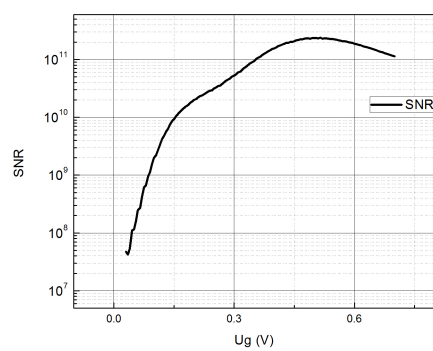
Pirmasis jutiklio charakterizavimo žingsnis buvo rasti jo geriausią darbą tašką, t.y. tokią tranzistoriaus užtūros įtampą, kuriai esant jutiklio ekvivalentinė triukšmų galia yra mažiausia. Pradžioje išmatuota tranzistoriaus voltamperinė charakteristika. Ši charakteristika užfiksuota kaip tranzistoriaus kanalo varžos priklausomybė nuo užtūros įtampos:



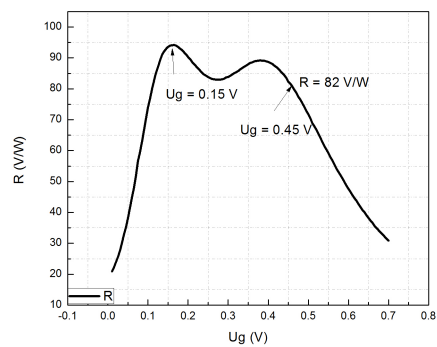
11 pav. Tiriamojo detektoriaus lauko tranzistoriaus kanalo varžos priklausomybė nuo užtūros įtampos

Srovė perskaičiuojama į kanalo varžą nes vėlesniuose skaičiavimuose varža reikalinga šiluminiam triukšmui įvertinti. Dėl dokumentacijos išbaigtumo, tiesinės aproksimacijos būdu iš šios charakteristikos surasta jutiklio atsidarymo įtampa $U_{at} = 0.35$ V.

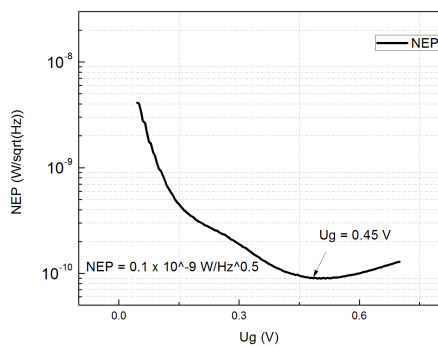
Toliau buvo suskaičiuota ir parodyta jutiklio signalo-triukšmo santykio priklausomybė nuo užtūros įtampos, o taip pat suskaičiuotas jutiklio jautris bei suskaičiuota ekvivalentinė triukšmų galia ir surastas taškas, kur ji yra mažiausia:



12 pav. Tiriamojo detektoriaus signalo-triukšmo santykio priklausomybė nuo užtūros įtampos



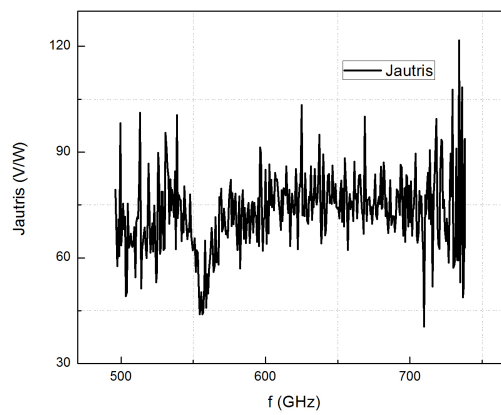
13 pav. Tiriamojo detektoriaus jautrio priklausomybė nuo užtūros įtampos



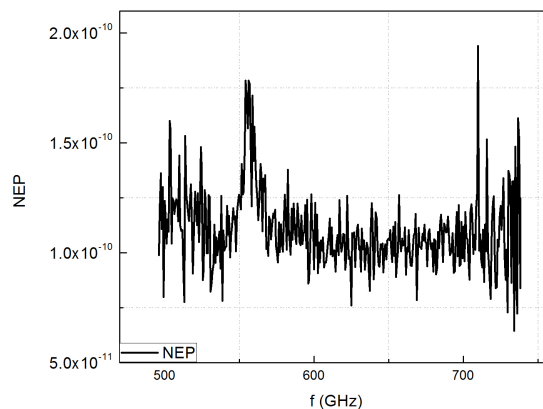
14 pav. Tiriamojo detektoriaus ekvivalentinės triukšmų galios priklausomybė nuo užtūros įtampos

Iš rezultatų matyti, kad tiriamojo detektoriaus jautris didžiausias ties $U_g = 0.15V$, tačiau ekvivalentinė triukšmų galia mažiausia (t.y. geriausia) ties $U_g = 0.45V$. Šiuo atveju darbo taško pasirinkimas priklauso nuo detektoriaus naudojimo tikslo. Jei detektorius naudojamas fiksuoti stipriems signalams ir domina tik pats signalo buvimo faktas, tuomet naudinga naudoti tokią tranzistoriaus užtūros įtampą, kad jutiklio jautris būtų didžiausias. Tačiau jei norima fiksuoti silpnus signalus, reikia rinktis tokį tašką, kad jutiklio ekvivalentinė triukšmų galia būtų mažiausia. Tolimesniuose matavimuose, kur tiriamos dažninės šio jutiklio priklausomybės fiksuojant pakankamai mažus signalus pasirinkta tranzistoriaus užtūros įtampa $U_g = 0.45V$ dėl mažiausios NEP vertės.

Antrame charakterizavimo etape išmatuotos jutiklio dažninės priklausomybės, tam, kad būtų matyti kokiems dažniams fiksuoti jis tinkamas:



15 pav. Tiriamojo detektoriaus jautrio dažninė priklausomybė



16 pav. Tiriamojo detektoriaus ekvivalentinės triukšmų galios dažninė priklausomybė

Iš šių priklausomybių galima matyti, kad tiriamasis jutiklis tinkamas naudoti visoje tirtoje dažnių juostoje tarp 500 GHz ir 740 GHz. Jutiklio ekvivalentinė triukšmų galia šiame dažnių intervale yra $(1 \pm 0.5) \times 10^{-10} \text{ W/Hz}^{1/2}$. Užfiksuoti tik THz šaltinio bei detektoriaus triukšmai bei atmosferos vandens sugertis (550 GHz). Ryški priklausomybė nuo dažnio nepastebėta, tad detektorius yra plačiajuostis tirtame dažnių intervale.

2 lentelė. Įvairių tipų jutiklių parametrų palyginimas

Detektoriaus tipas:	$R(V/W)$	$NEP(W/Hz^{1/2})$
Bolometras:	100	4.5×10^{-10} [5]
Golėjaus narvelis:	10^5	0.8×10^{-10} [1]
Si FET jutiklis:	100	0.1×10^{-9}
Piroelektrinis jutiklis:	10^3	0.4×10^{-9} [4]
Šotkio sandūros jutiklis:	4000 – 400	1.5×10^{-9} [6]

Iš šių rezultatų matyti, kad tiriamasis Si FET jutiklis savo ekvivalente triukšmų galia lenkia Šotkio sandūros bei piroelektrinius jutiklius, tačiau nusileidžia šiluminiais jutikliams. Galima daryti išvadą, kad toks jutiklis yra potenciali alternatyva dabar dažnai komercijoje sutinkamiems Šotkio sandūros jutikliams.

Išvados

- Jutiklių charakterizavimui geriausiai tinka optinė sistema sudaryta iš dviejų 4 colių židinio nuotolio parabolinių veidrodžių dėl itin paprasto jutiklių pozicionavimo.
- Jutiklis tinkamas naudoti THz spinduliuotės detekcijai plačiame dažnių intervale - tirtame dažnių intervale priklausomybė nuo dažnio nepastebėta.
- Si FET jutikliai savo parametrais prilygsta dabar dažniausiai naudojamiems Šotkio sandūros bei piroelektriniams jutikliams, todėl yra komerciškai konkurencingi.

Literatūros sąrašas

- [1] G. Chen, Terahertz-wave imaging system based on backward wave oscillator, *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **2**, 504–512 (2012).
- [2] *Mcgraw-hill concise encyclopedia of physics* (2002).
- [3] E. L. D. F. Brown, Pyroelectric detector evaluation, *Infrared Physics* (15) (1975).
- [4] D. Saeedkia, Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications (2013).
- [5] H. Cherednichenko, A room temperature bolometer for terahertz coherent and incoherent detection, *IEEE Trans. On THz. Sci. and Techn.* **1**(2), 395–402 (2011).
- [6] J. L. Hesler, T. W. Crowe, Nep and responsivity of thz zero-bias schottky diode detectors (2007).
- [7] Boppel, Lisauskas, Roskos, Terahertz array imagers: towards the implementation of terahertz cameras with plasma-wave-based silicon mosfet detectors, *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications* 231–271 (2013).
- [8] U. R. Pfeifer, A. Lisauskas, H. G. Roskos, 0.65 thz local-plane array in a quarter-micron cmos process technology, *IEEE J.: Solid-State Circuits* **44**, 1068–1076 (2009).
- [9] H. G. Krekels, B. Schiek, E. Menzel, Power detector with ga-as field effect transistors., in *22nd European Microwave Conf.* (1992), 174–179.
- [10] D. Saeedkia, Optoelectronic techniques for the generation and detection of terahertz waves, *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications* 6–8 (2013).
- [11] M. Dyakonov, M. Shur, Detection, mixing and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic gas, *IEEE Trans. Electron. Dev.* **43**, 380–387 (1996).
- [12] M. I. Dyakonov, M. S. Shur, Plasma wave electronics: Novel terahertz devices using two dimensional electron fluid, *IEEE Trans. Electron. Dev.* **43**, 1640–1645 (1996).

Tomas Dabulskis

BROADBAND THZ DETECTOR CHARACTERIZATION

Summary

For many years there have been little to no devices capable of detecting terahertz radiation from simple pyroelectric detectors, to very sensitive bolometers working at helium temperatures. But nothing really sensitive and usable in room temperature. But Dyakonov and Shur proposed the idea of using plasma waves which are being created in FETs channel to rectify the induced signal and thus detect the THz radiation. Over the years there have been numerous researches showing this process and how it works, but no FET-based detector would reach sensitivities and NEP as good as Schottky junction based detector, not to mention bolometers and Golay cell. But in VU FF RFK Laboratory of terahertz electronics there are new models of silicon detectors being modeled and created. These detectors proven to be better than most types of other detectors except bolometers and Golay cell. And since they are so small, it is even possible to use them for continuous detection regime which is also an advantage over more responsive, but bigger and slower detectors. After the characterization of one of our detectors it has been found that its sensitivity is around $R = 100V/W$ and $NEP = 0.1 \times 10^{-9} W/Hz^{1/2}$. Since the frequency sweep of these detectors appears to be independent of frequency, we can say that these detectors are broadband and capable of detecting THz radiation at least in range from 500 GHz to 740 GHz.