

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Ieva Morkūnaitė

**Šiluminės spinduliuotės detekcija naudojant radiometrą su Si KMOP
tranzistoriumi**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos
studijų programa

Studentė

Ieva Morkūnaitė

Darbo vadovas

Dr. Prof. Alvydas Lisauskas

Instituto direktorius

Dr. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2024

Turinys

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| Įvadas | 3 |
| 1. Radiometrija | 4 |
| 1.1 Radiometrų tipai | 5 |
| 1.1.1 Tiesioginis detektavimas | 5 |
| 1.1.2 Heterodininis detektavimas | 5 |
| 2. Tirti THz detektoriai ir jų parametrai | 6 |
| 2.1 Plačiajuostis THz detektorius | 6 |
| 2.2 250 GHz rezonansinis detektorius | 9 |
| 3. Šiluminė detekcija | 10 |
| 3.1 Juodo kūno spinduliavimas | 10 |
| 3.2 Triukšmui ekvivalentinis temperatūrų skirtumas | 12 |
| 3.3 Tiesioginis šiluminio signalo detektavimas | 12 |
| 4. Heterodininio tipo radiometro modeliavimas | 16 |
| 4.1 Antena ir detektorius | 16 |
| 4.2 Dviejų pakopų stiprintuvas | 18 |
| 4.3 Galios detektavimas | 19 |
| 4.4 Heterodininio tipo Radiometras | 22 |
| Išvados | 26 |
| Literatūra | 27 |

Įvadas

Terahercų (THz) spinduliavimas yra elektromagnetinių bangų dažnių spektre tarp radijo ir infraraudonųjų (IR) bangų dažnių. Dažniausiai THz dažnių juosta yra nuo 0,1 THz iki 10 THz. Šiandien THz technologija naudojama daugelyje taikymo sričių: vidaus saugume, biologijos ir medicinos moksluose, maisto kokybės kontrolėje, informacinių ir ryšių technologijose. Daugumai panaudojimų reikalingas, arba bent jau būtų naudingas absoliutaus spinduliavimo galios matavimo būdas – radiometrija [1].

THz dažnių diapazone populiariausi radiometrai yra radiometrai su Šotkio diodo detektoriumi [2],[3],[4]. Jie yra paprasti, pigūs ir turi gerus radiometrinius parametrus. Tačiau THz dažniuose atsiranda palyginus geri detektoriai su elektrinio lauko tranzistoriais, kurių charakteristikos nenusileidžia Šotkio diodo detektoriams.

Literatūroje yra aprašyta ir šiluminė detekcija, naudojant THz plačiajuosčius detektorius, su kuriais buvo išmatuota ir žmogaus rankos skleidžiamos šiluminės spinduliuotės galia [6],[7].

Ateityje terahercų (THz) diapazono taikymams reikalingi nauji kompaktiški, universalūs ir nešiojami imtuvai ir siųstuvai. Šiuo metu pagrindinės THz maišytuvų taikymo sritys yra susiję su heterodiniais imtuvais, naudojamais radioastronomijoje, pvz. atmosferos tyrimuose, tačiau jie taip pat naudojami didelės duomenų perdavimo spartos ryšių sistemose, šiuo atveju THz ryšių, kur THz heterodininio tipo imtuvai turi būti ne tik kompaktiški, bet ir veikti kambario temperatūroje [10].

Šiame darbe buvo bandoma atkartoti tiesioginės šiluminės spinduliuotės detekciją naudojant du skirtingus THz detektorius ir juos palyginti, išsiaiškinti, kuris detektorius geriausiai tinka tiesioginio tipo radiometrui. Taip pat buvo sumodeliuotas heterodininio tipo radiometras.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra atlikti šiluminę detekciją naudojant radiometrą.

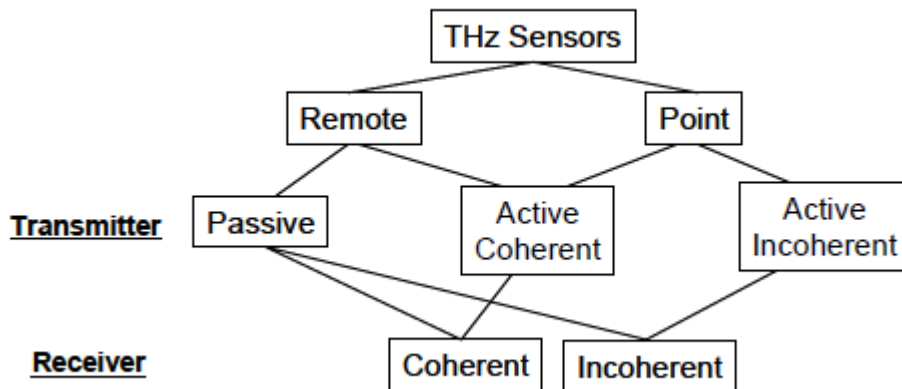
Šiam tikslui įgyvendinti buvo iškelti šie uždaviniai:

1. Susipažinti su radiometrijos literatūra ir išsiaiškinti, kokie yra radiometrų tipai ir jų detektavimo ypatumai.
2. Sumodeliuoti heterodininio tipo radiometrą.
3. Atlikti tiesioginį šiluminį detektavimą su dviem skirtingais detektoriais.
4. Nustatyti radiometrų triukšmui ekvivalentinį temperatūrų skirtumą.

1. Radiometrija

Terahercų (THz) jutiklių sistema susideda iš dviejų pagrindinių dalių: siųstuvo ir imtuvo. Pav. 1 parodyta, kokie yra THz jutiklių tipai. THz jutikliai skirstomi į nuotolinius ir taškinius. Nuotoliniai jutikliai dažniausiai yra pasyvūs radiometrai naudojantys heterodininį detektavimą, o taškinės sistemos dažniausiai yra Furjė transformacijos spektrometrai, kurie susideda iš nekoherentinių imtuvų ir siųstuvų. Taškinių jutiklių sistemos bandinys yra sąlyginai netoli esančio jutiklio, o THz spinduliuotę skleidžia siųstuvai, kuris gali būti koherentinis arba nekoherentinis. Dėl bandinio artumo praktiškai visa galia gali būti perduodama per bandinį, arba iš jo į imtuvą. Nuotoliniuose jutimo sistemose bandinys yra palygintinai toli nuo imtuvo, todėl tik nedidelė dalis galios gali pasiekti jutiklį. Jei ši maža dalis yra detektuojama, tai jutiklis vadinamas aktyviuoju. Tačiau tyrinėjant žvaigždes ar kitus dangaus kūnus dažnai per mažai yra gaunama galios dėl atmosferos neskaidrumo, todėl kitas tipas yra pasyvieji jutikliai, kurie galią gauna iš objekto aplinkos apšvietimo nekoherentinės spinduliuotės. Nuotoliniai jutikliai dažniausiai naudoja bendros galios radiometrus, kurie turi daugiausia panaudojimo būdų. Pagrindė – astrofizikoje (nustatant žvaigždžių dujų sudėtį, ar jų temperatūrą) ir meteorologijoje, todėl pasirinkome būtent šią THz jutimo sistemą.

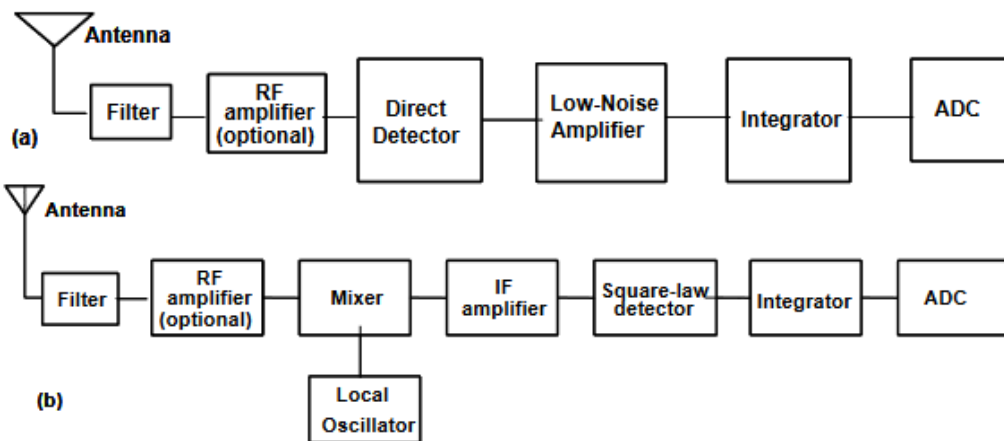
Toliau, 1 pav., imtuvai gali būti koherentiniai arba nekoherentiniai. Koherentinių imtuvų tipai: heterodininis ir homodininis (tiesioginis), kadangi heterodininio tipo detektorius teoriškai gali aptikti ir išskirti mažesnę triukšmų temperatūrą. O nekoherentiniai yra galios arba fotono aptikimo tipai. Pasyvusis jutimo metodas gali būti suporuotas tiek su koherentiniu, tiek su nekoherentinių imtuvu, todėl puikiai tinka mūsų tyrimui, norint detektuoti juodo kūno spinduliuotę.[5]



1 pav. Terahercų spektro jutiklių sistemų tipai ir išsidėstymas

1.1 Radiometrų tipai

Pasyvūs radiometrai gali būti tiek koherentiški, tiek nekoherentiški. Jie skirstomi į dvi grupes pagal detektavimo būdą: tiesioginio detektavimo (angl. direct) ir heterodininio detektavimo. Jų principinės blokinės schemos pavaizduotos 2 pav. [5]



2 pav. (a) Tiesioginio detektavimo ir (b) heterodininio detektavimo radiometrų principinės blokinės schemos [5]

1.1.1 Tiesioginis detektavimas

Ateinanti spinduliuotė iš šiluminio bandinio ar iš galios šaltinio yra surenkama imtuve, kur spinduliuotė iš terahercų dažnių juostos nukreipiama į bazinę detektoriaus juostą. Nukreiptas THz signalas yra sustiprinamas ir demoduliuojamas į nuolatinę srovę naudojant sinchroninį detektavimą. Beveik visada šie radiometrai konvertuoja galią į įtampą arba galią į srovę. Tai reiškia, kad šie prietaisai perduoda proporcingai įtampą arba srovę įeinančio signalo galios atžvilgiu. Populiariausi tokio tipo imtuvai yra lauko detektoriai ir bolometrai. Elektriniai lauko detektoriai, pvz., Šotkio diodai, tiesiogiai reaguoja į THz elektrinį lauką ir generuoja išėjimo srovę arba įtampą dėl kvadratinio nario srovės ir įtampos charakteristikos. Bolometrai yra sudėtingesni įtaisai, sudaryti iš THz absorbento ir termistoriaus. THz sugėriklis paprastai termiškai izoliuotas nuo aplinkos, kad sugertų THz galią ir pakeltų absorbuojančio ir prijungto termistoriaus temperatūrą. Termistorius yra prietaisas, kuris rodo didelį varžos pokytį esant mažam temperatūros pokyčiui. [5]

Pagrindinis visų tiesioginių detektorių parametras yra spektrinės juostos plotis, todėl darome prielaidą, kad jis yra ribotas nuo ν_0 iki $\nu_0 + \Delta\nu$. Tai gali būti tikrasis dažnių juostos plotis, apibrėžtas THz dažnių juostos filtru, arba aproksimacija tikrajam spektrui. [5]

1.1.2 Heterodininis detektavimas

Iš bandinio gaunama šiluminė spinduliuotė, ar perduodama galia yra sumaišoma su vietinio osciliatoriaus (angl. local oscillator (LO)) galia. Jei signalas ir LO dažnis yra skirtingi,

signalu mušimai bus generuojami tarpiniame dažnyje (angl. intermediate frequency (IF)) tarp šių dviejų dažnių. Tai vadinama heterodinine konversija. Jei signalo ir LO dažnis yra vienodas, mušamasis signalas pereina į nuolatinę srovę, ir šis procesas vadinamas homodinine konversija. Nepriklausomai nuo konversijos proceso, visiems koherentiniams detektoriams reikia įrenginio, kuris galėtų efektyviai konvertuoti radijo dažnių galią į IF dažnių juostą. Populiariausi maišytuvai yra lauko tipo įtaisai, pasižymintys stipriu kvadratinium netiesišku. Geri pavyzdžiai Šotkio diodai, superlaidininko-izoliatoriaus-superlaidininko (SIS) tunelinės sandūros ir superlaidūs karštųjų elektronų bolometrai. [5]

Koherentinė konversija į žemesnį dažnį turi keletą privalumų, lyginant su tiesioginio tipo aptikimo radiometru. Pirma, silpno signalo maišymas su santykinai stipriu LO veiksmingai stiprina priimtą signalą lyginant su imtuvo triukšmu, o tai gali labai padidinti jautrį. Antra, paprastai silpno signalo atveju signalams THz srityje, maišymo procesas yra tiesinis. Tai reiškia, kad signalo galia ties IF yra tiesiškai proporcinga įėjime esančio signalo galiai. Todėl imtuvo praleidžiamoji juosta gali būti apibrėžiama IF juostos pralaidumo filtru, kurio kaina paprastai yra daug mažesnė ir pasižymi daug didesniu našumu nei bet kuris THz filtras. Dėl šios savybės paprastai koherentiniai imtuvai yra priimtinausias būdas, kai reikia didelės spektrinės skiriamosios gebos. Tačiau, tiesioginio tipo imtuvas yra labiau naudojamas dėl geresnių rezultatų plačiajuosčio diapazono taikymuose, pavyzdžiui, termovizijoje ([6],[7]) dėl spektrinės juostos pločio ir paprastumo. [5]

Heterodininio radiometro schema (2 pav. (b)) labai panaši į tiesioginio tipo (2 pav. (a)), vietoje detektoriaus, yra naudojamas maišytuvas kuris susideda iš detektoriaus ir LO.

2. Tirti THz detektoriai ir jų parametrai

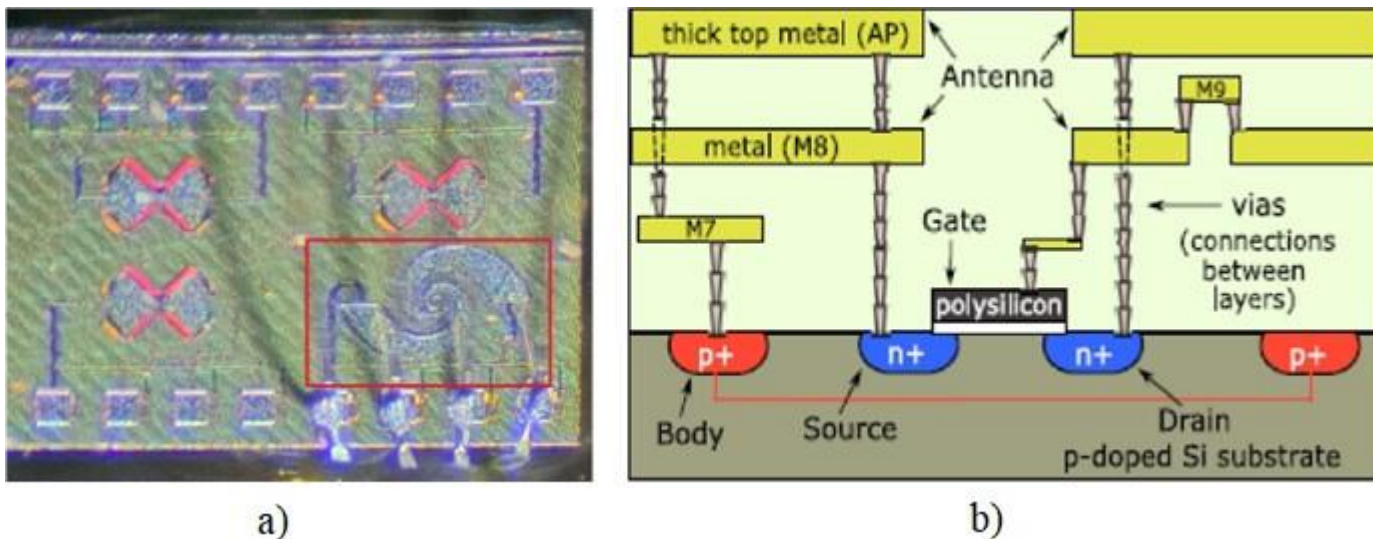
Šiame darbe buvo naudojami du skirtingi KMOP detektoriai. Buvo bandoma detektuoti šiluminį signalą ir juos palyginti, kuris kuriam geriausiai tinkamas konkrečiam radiometro tipui. THz detektoriai yra taikomi įvairiose srityse, todėl jie turi būti praktiški, gerai apibrėžti parametrai ir paruošti masinei gamybai. Šie detektoriai yra pagaminti taikant KMOP technologiją. KMOP (komplementarūs metalo oksido puslaidininkiai) - papildomo metalo oksido ir silicio technologija yra komerciškai prieinama ir labiausiai įprasta puslaidininkių technologija. Ši technologija taip pat užtikrina didelę funkcinės integracijos galimybę, kuri yra svarbi būsimam prototipų kūrimui ir masinei gamybai [6].

2.1 Plačiajuostis THz detektorius

Pirminei šiluminės spinduliuotės detekcijai pasirinkome plačiajuostį detektorių su spiralės tipo antena pavaizduota 3 pav. (a), kadangi literatūroje aprašyta šiluminė ir net žmogaus rankos skleidžiamos galios detekcija būtent su plačiajuosčiu detektoriumi su spiralės tipo antena [6], [7]. Detektoriaus mikroschema buvo pagaminta naudojant 90 nm KMOP liejimo technologiją su silicio lauko tranzistoriumi. Detektoriaus skerspjūvio struktūra parodyta 3 pav. (b) paveikslėlyje. Aktyviąją sritį sudaro NMOP lauko tranzistorius, įgyvendintas ant 0,28 μm storio p- legiruoto Si substrato. Tranzistorių supa p+ tipo korpusas [7].

Antena įmontuota ant galinės konstrukcijos dalies, naudojant M8 metalo sluoksnį ir storą viršutinį metalą (AP). Viena antenos dalis yra pagaminta tuose M8 ir AP sluoksniuose ir sujungta vijomis su tranzistoriaus ištaka. Kiti antenos dalies metalo sluoksniai nesujungti

vijomis, o paprasčiausiai viršutinis metalo sluoksnis jungiasi su santaka, o apatinis – su užtūra [12].

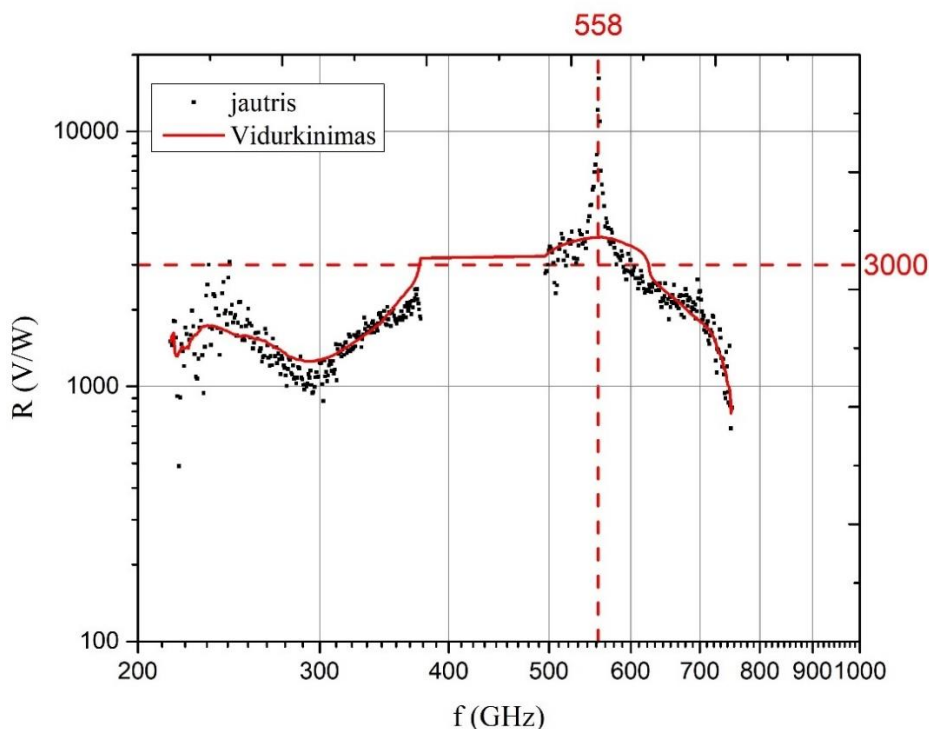


3 pav. a) Detektoriaus lustas su spiraline antena b) Detektoriaus mikroschemos skerspjūvio schema (mastelio neatitinka) [7].

Norint įsitikinti, kad detektorius plačiajuostis, buvo atliktas detektoriaus jautrio tyrimas. Jautris – tai detektoriaus išėjimo signalo įtampos ir į detektorių ateinančio signalo galios santykis (V/W), aprašomas formule [13]:

$$R_V = \frac{U_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

Atlikus tyrimą, buvo gautas plačiajuosčio detektoriaus jautris nuo dažnio. pavaizduotas 4 pav.:



4 pav. Plačiajuosčio detektoriaus jautris nuo dažnio

Aiškliai pastebimas jautrio šuolis ties 558 GHz. Tikėtina, kad ties šiuo dažniu yra vandens linija, todėl buvo sugerta ir detektuota. Šiuo dažniu negalima pasitikėti, todėl vidurkinant jis buvo pašalintas, kad būtų galima gauti realų jautrio grafiką. Iš grafiko nustatėme, kad detektorius yra plačiajuostis ir turi maždaug 3000 V/W jautrį. Skaičiavimuose buvo įtrauktas ir 2 pakopų stiprintuvas, kuris stiprina 100 kartų.

Kitas svarbus detektoriaus parametras – triukšmui ekvivalentinė galia (angl. noise equivalent power (NEP)). Šis parametras apibūdina, kokia galia turi kristi ant jutiklio, kad signalas jutiklio išėjime būtų lygiai tokio pat dydžio kaip ir foninio triukšmo sukeltas signalas. Norėdami tiksliai apibrėžti NEP, turime tiksliai apibrėžti matavimo sąlygas.

Todėl NEP paprastai apibrėžiamas konkrečiam dažniui [13]. Šis dydis matuojamas W/\sqrt{Hz} ir nusakomas formule:

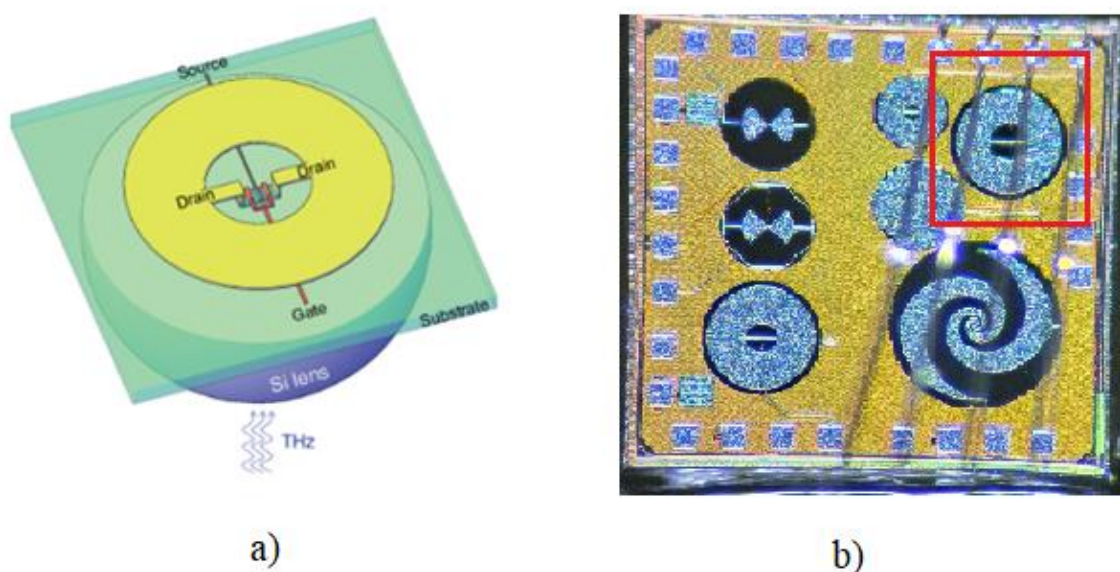
$$NEP = \frac{U_{triukš.}}{R_V} \quad (2)$$

Iš šio detektoriaus paėmę jautrį ir padalinę iš detektoriaus triukšmo $U_{triukš.}=1,45\mu V$ gauname $NEP = 480 pW/\sqrt{Hz}$. Išmatuotas NEP yra 11 kartų blogesnis nei literatūroje aprašytas panašus spiralės plačiajuosčio detektoriaus $NEP=42 pW/\sqrt{Hz}$ [6]. Prastesnis R_V ir Prastesnį jautrį ir NEP galėjo lemti tai, kad visa matavimo sistema nebuvo tinkamai optimizuota – šaltinio galia nebuvo pilnai sufokusuota ant detektoriaus antenos.

2.2 250 GHz rezonansinis detektorius

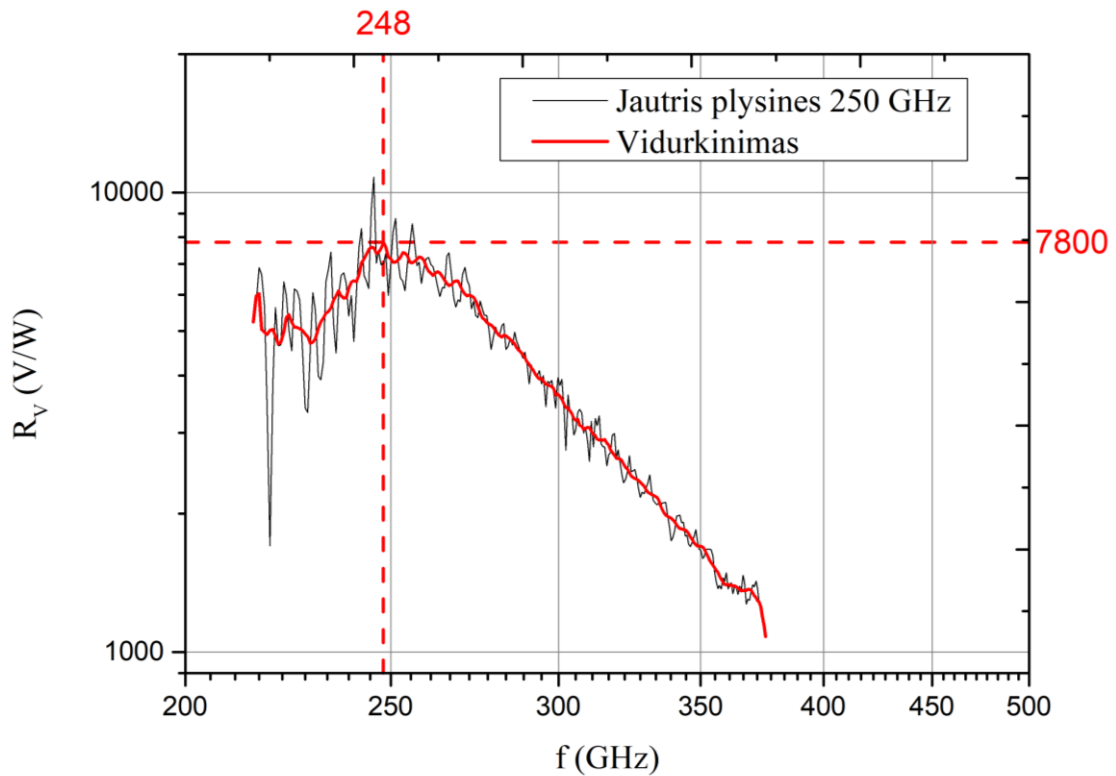
Toliau pasirinkome 250GHz rezonansinį detektorių su plyšine antena. Šis detektorius ne taip gerai turėtų detektuoti šiluminį signalą tiesioginiu būdu, kadangi jis turi palyginus mažą dažninę juostą, su kuria galėtų surinkti kuo daugiau atėjusios šiluminės spinduliuotės, kuri turi platų dažnių diapazoną. Todėl rezonansinis detektorius puikiai tinka heterodininio tipo radiometrui. Kadangi šiluminį signalą sumaišius su LO, kurio dažnis turi būti artimas detektoriaus rezonansiniam, šiluminis signalas sustiprėja, todėl galima detektuoti daugiau šiluminio signalo nei tiesioginiu būdu.

Šis detektorius taip pat pagamintas naudojant 90 nm KMOP technologiją, bet turi apvalią žiedo formos anteną su integruotu dipoliu. Svarbu paminėti, kad ištaka yra elektriškai sujungta tik per antenos metalizaciją. Šio detektoriaus 3D lustas pavaizduotas pav. 5 (a) kartu su realiu detektoriumi, nufotografuotu po mikroskopą [8].



5 pav. a) Antenos 3D modelis [8] ir b) antenos fotografija realybėje

Taip pat kaip ir su ankstesniu detektoriumi buvo atliktas jautrio matavimas, kurio rezultatai pavaizduoti pav. 6. Čia matomas ties maždaug 250 GHz dažniu didžiausias jautris – 7800 V/W. Taip pat skaičiavimuose buvo įtrauktas stiprintuvas.



6 pav. 250 GHz rezonansinio detektoriaus jautris nuo dažnio

Buvo paskaičiuotas $NEP = 200 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Čia taip pat išmatuotas NEP buvo 10 kartų blogesnis, nei literatūroje aprašyto detektoriaus [8]. Su plyšine antena 90nm detektoriumi jie ties 247 GHz gavo $NEP = 21 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Taip pat yra spėjama, kad blogesnę NEP lėmė blogai suvesta matavimo sistema.

3. Šiluminė detekcija

3.1 Juodo kūno spinduliavimas

Kaip buvo minėta, THz nuotolinio jutiklio bendros galios radiometras, dažnai naudojamas matuojant dujų pėdsakus atmosferoje arba tarpžvaigždinės terpės spinduliuotę [5]. Žvaigždes ar kitus dangaus kūnus galime laikyti absoliučiai juodais kūnais, kurie yra idealūs absorbentai ir idealūs šiluminiai šaltiniai. Todėl sakome, kad jų šiluminio spinduliavimo koeficientas yra $\epsilon=1$.

Kiekvienas kūnas, turintis temperatūrą T spinduliuoja plataus spektro bangas, todėl karšti juodieji kūnai spinduliuoja daug didesnę spektrinę galią IR diapazone, o šaltesnių juodųjų kūnų spinduliavimo galia pasislenka į sub-THz dažnį. Todėl vienas iš pasyvaus galios gavimo sub-THz ir THz diapazone panaudojimų yra šaltojo visatos fono stebėjimas [6].

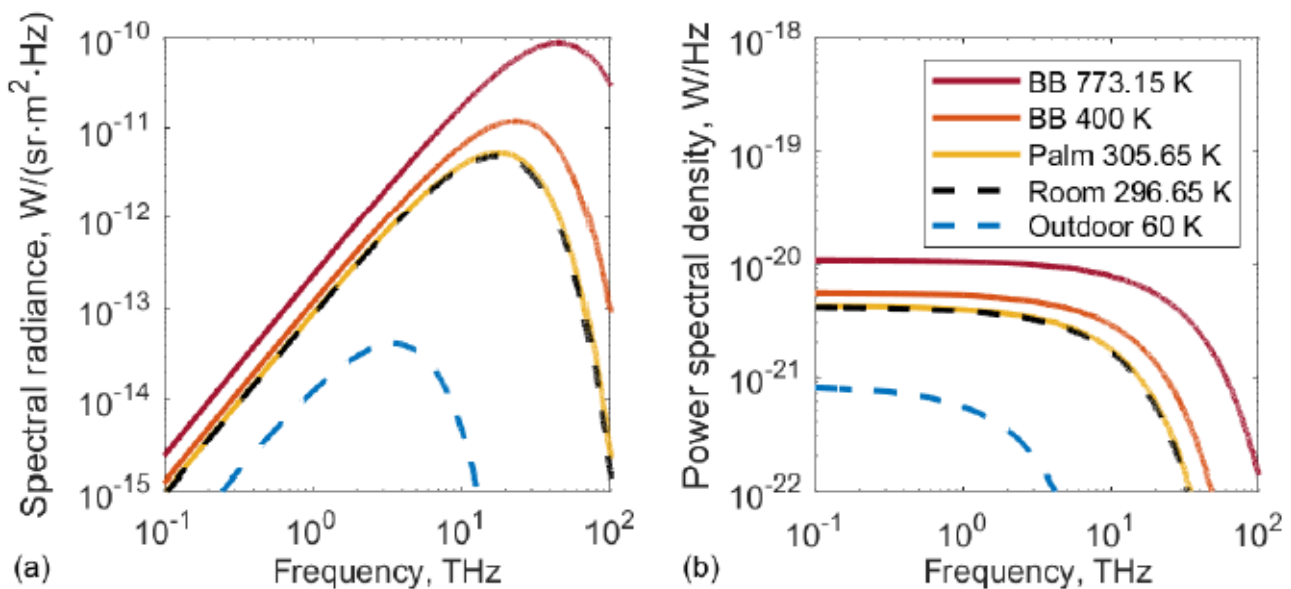
Įeinančią spinduliuotės galią galime apskaičiuoti pagal Planko dėsnį, kai juodojo kūno šaltinio spinduliavimas patenka per vientisą regėjimo kampą Ω_A į detektorius, kurio efektyvusis antenos plotas A_e .

$$P = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\epsilon 2 h f^3}{c^2} \cdot \frac{\Omega_A \cdot A_e(f)}{e^{\frac{h}{k_B T} - 1}} df \quad (3)$$

kur h yra Planko konstanta, c – šviesos greitis ir k_B - Bolzmano konstanta.

Lygtį (3) galime supaprastinti naudodami Reilėjaus – Džinso aproksimaciją, kuri galioja dažniams $f < k_B T / h \approx 6,15$ THz kambario temperatūroje. Be to, galime naudoti ryšį tarp efektyviosios antenos pločio ir jos kryptingumo, kad gautume $\Omega_A A_e(f) = (c/f)^2$. Pastarasis santykis yra labai naudingas, nes leidžia kiekybiškai prognozuoti detektoriumi prieinamą galios spektrinį tankį, neatsižvelgiant į fizikines antenos savybes. Tai iš esmės skiriasi nuo šiluminių detektorių, pvz., Golay elementų, kurie integruoja krintančios spinduliuotės galią detektoriaus plote [7]. Juodo kūno spektrinis spinduliavimas (a) ir apskaičiuotos galios spektrinis tankis (b), sutelktas į anteną, pavaizduotas 7 pav. Galios spektrinis tankis yra plokščias labai plačiame dažnių diapazone. Todėl spinduliuotę galima aptikti naudojant labai jautrų detektorių, kuris turi būti jautresnis už integruotą galią per detektoriaus dažnių juostos plotį ir sustiprinant stiprintuvu, kuris turi plačią stiprinimo juostą, kad būtų galima surinkti kuo didesnę spinduliuojamos galios spektro dalį.

773,15 K juodas kūnas spinduliuoja 10 nW, 400 K – 5 nW, o žmogaus delnas – 3,9 nW galios (žr. 2 pav., b) į detektoriumi. [6]



7 pav. a) Juodo kūno (angl. black body (BB)) spektrinis spinduliavimas prie skirtingų temperatūrų; b) galios spektrinis tankis kuri priima ideali antena. Brūkšniuotomis linijomis parodyta įprasto fono spinduliuotė, patalpoje (296,65 K) ir lauke (60 K). Išsistinės linijos rodo juodojo kūno spinduliuotę esant žmogaus delno temperatūrai (305,65 K), šilumos šaltinio (773,15 K) ir jautrumo ribą, kuriai esant šiluminė spinduliuotė vis dar buvo aptikta (400 K)

[6]

Taigi atlikus integravimą per dažnių juostą (f) lygtyje (3) gauname bendrą supaprastintą galios formulę:

$$P = k_B T \langle \epsilon \rangle \Delta f \quad (4)$$

kur $\langle \epsilon \rangle = 1$, T – temperatūra, o Δf - tiesioginiu būdu nusakoma kaip detektoriaus dažnių plotis, o heterodininių – kaip stiprintuvo stiprinimo juosta.

3.2 Triukšmui ekvivalentinis temperatūrų skirtumas

triukšmui ekvivalentinis temperatūrų skirtumas (angl. noise equivalent temperature difference (NETD)). Bendru atveju jis nusakomas pagal formulę:

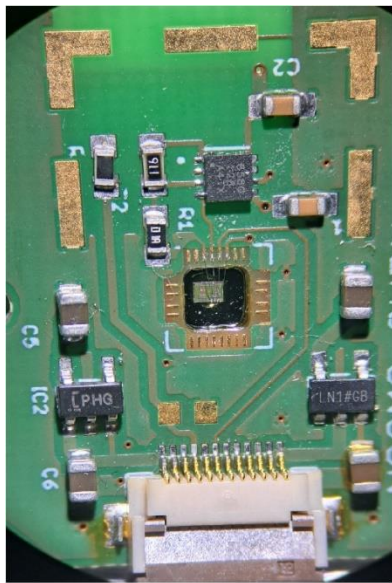
$$NETD = \frac{V_N}{\partial V_{išej.} / \partial T} \quad (5)$$

Vienas iš pagrindinių ir svarbiausių šiluminio spinduliavimo detektoriaus parametrų yra

Šis dydis nusako mažiausią temperatūrų skirtumą ∂T , kurį jutiklis gali aptikti, kurio matymo lauką užpildo spinduliuotė sukianti signalo pokytį $\partial V_{išej.}$

3.3 Tiesioginis šiluminio signalo detektavimas

Tiesioginiam detektavimui buvo būtina paruošti detektorius ir eksperimento stendą. Prie detektoriaus buvo prijungtas dviejų pakopų stiprintuvas. Pirmoji pakopa su OPA858 stiprintuvu buvo sulituota tiesiai ant PCB plokštės, kurios viduryje buvo įklijuotas detektoriaus kristalas su antena (pav. 8 (a)). Antroji pakopa buvo sulituota ant atskiros plokštės su LMH6624 operaciniu stiprintuvu, kuri vėliau buvo sujungta su pirmosios pakopos stiprintuvu (pav. 8 (b)). Galutinis stiprintuvas stiprina signalą 100 kartų. Daugiau apie stiprintuvą aprašyta modeliavimo skyriuje.



a)

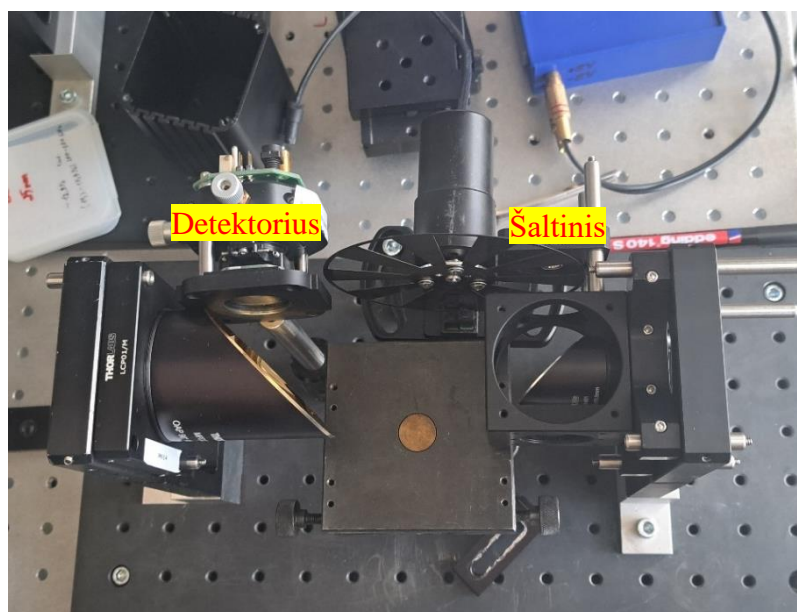


b)

8 pav. Dviejų pakopų stiprintuvas a) pirma pakopa su OPA858, b) antra pakopa su LMH6624

Eksperimento stendas atrodė kaip pavaizduota pav. 9. Šiluminį šaltinį naudojome keramikinį[6],[7], kuris, kaip teigia gamintojai, gali įkaisti iki 600 °C. Tiksliai nežinom ar tikrai iki tiek įkaista, bet pagal panašų tiesioginės detekcijos eksperimentą, buvo nustatyta, kad šaltinis spinduliuoja 140°C [6],[7]. Eksperimento metu kambaryje buvo 21°C, todėl $\Delta T=119$ K.

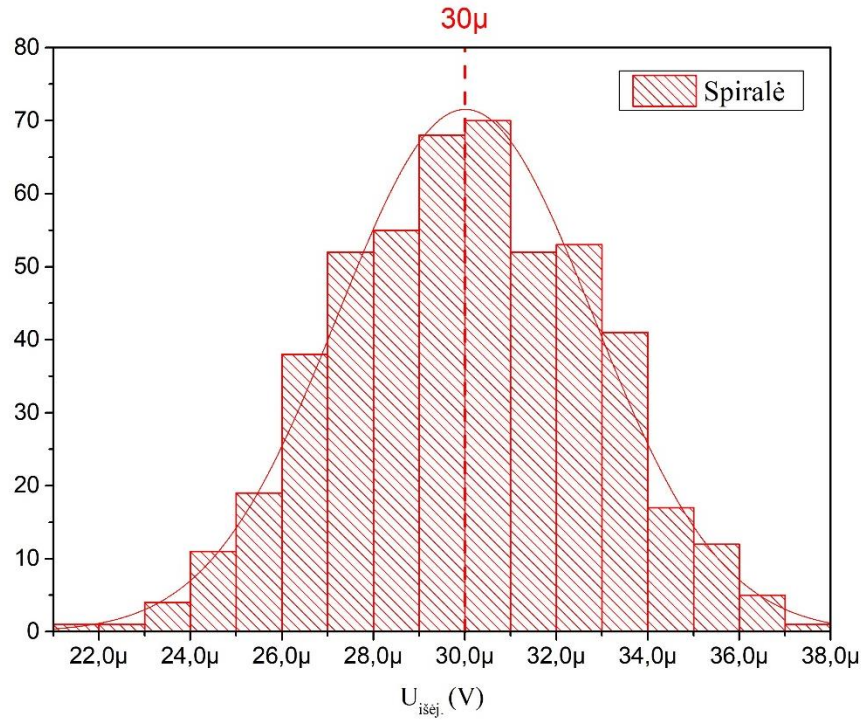
Taigi, šiluminio šaltinio signalas yra sufokusuojamas ir perduodamas su paraboliniiais veidrodžiais į kitą parabolinį veidrodį ir ten jau sufokusuojamas į detektoriaus anteną. Taip pat šaltinis yra moduluojamas mechaniniu karpytuvu, kurio dažnis buvo 1kHz. Šaltinio moduliavimas yra labai svarbus, kadangi detektorius turi „jausti“ temperatūrų skirtumą (karpytuvas „išjungia“ arba „įjungia“ šiluminį signalą). Taip pat moduliavimas reikalingas, kad iš detektoriaus išeinantį signalą būtų galima išmatuoti „Lock-in“ pagalba.



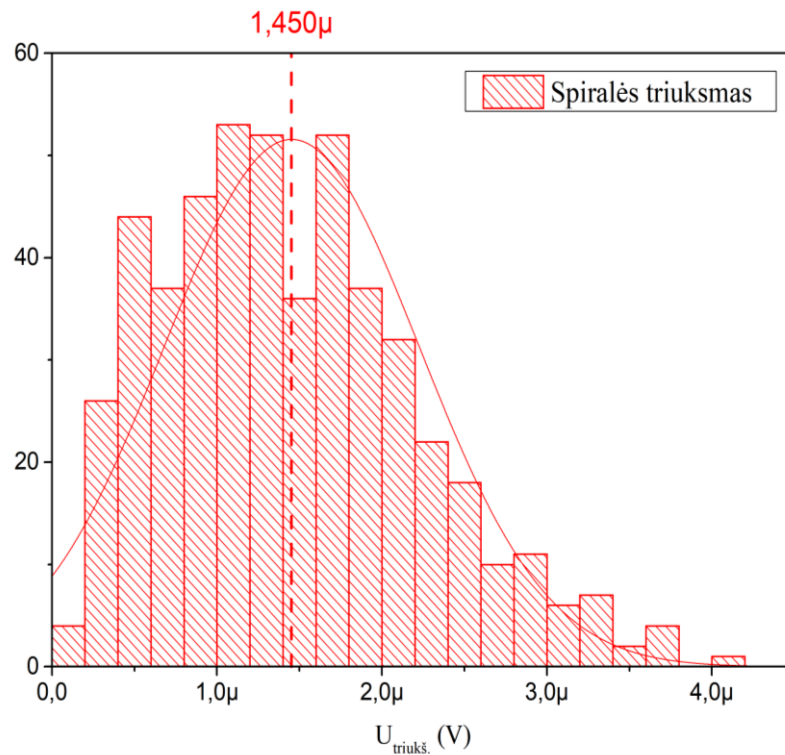
9 pav. Tiesioginis šiluminio signalo detektavimo stendas

Šiluminio signalo triukšmas buvo matuojamas 500 imčių kas 300ms. Iš gautų imčių buvo sudaryta histograma ir apskaičiuotas vidurkis. Be to buvo atliktas toks pat matavimas, tik buvo išjungtas šaltinis, kad būtų galima pamatuoti detektoriaus triukšmą.

Rezultatai su plačiajuosčiu detektoriumi:

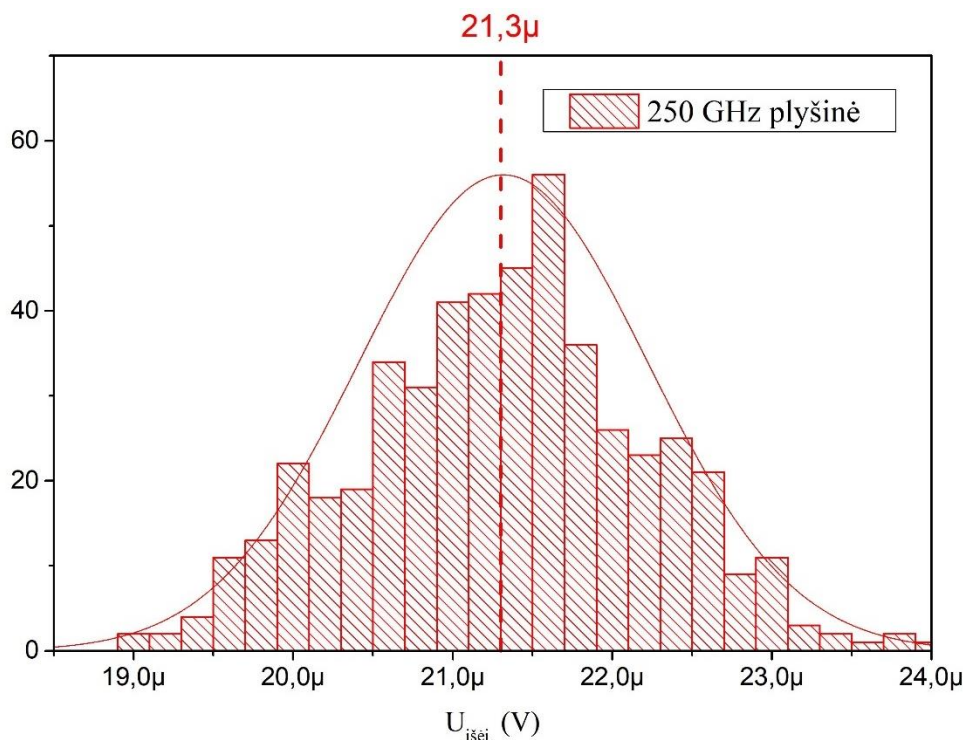


10 pav. Šiluminės spinduliuotės detekcija su plačiajuosčiu detektoriumi.

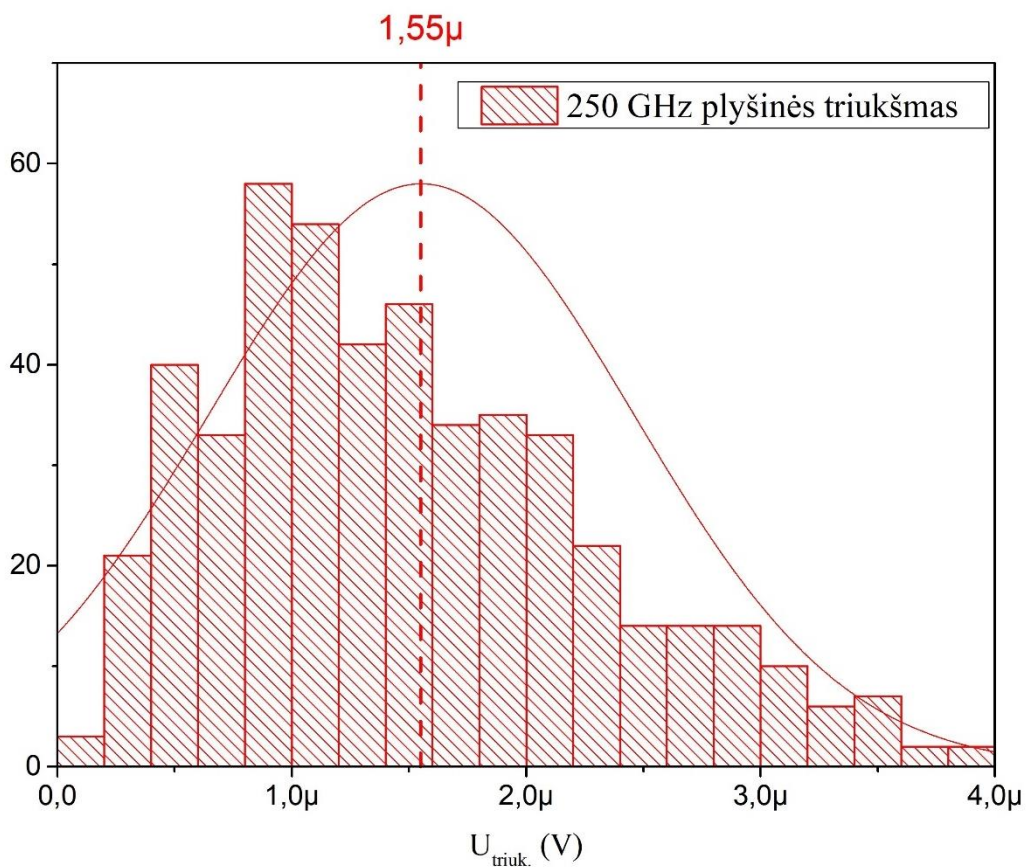


11 pav. Plačiajuosčio detektoriaus triukšmas

Rezultatai su 250 GHz rezonansiniu detektoriumi:



12 pav. Šiluminės spinduliuotės detekcija su 250 GHz rezonansiniu detektoriumi.



13 pav. 250 GHz rezonansinio detektoriaus triukšmas

Iš atlikto šiluminės spinduliuotės detektavimo tyrimo galima apskaičiuoti NETD. (5) supaprastinu formulę $NETD = \frac{\Delta T}{SNR}$, čia $\Delta T=119$ K, SNR (angl. Signal-to-noise ratio) yra signalo - triukšmo santykis: $\frac{U_{išėj.}}{U_{triukš.}}$. Tai paskaičiavus NETD gavome:

- NETD = 5,8 K su plačiajuosčiu detektoriumi
- NETD = 8,7 K su 250 GHz rezonansiniu detektoriumi

Šie rezultatai nėra tokie geri kaip literatūroje aprašytas tiesioginis šiluminio spinduliuotės detektavimo tyrimas, kuriame buvo gauta 2,2 K, o matuojant žmogaus delno skleidžiamą spinduliuotę NETD = 4,8 K [6],[7].

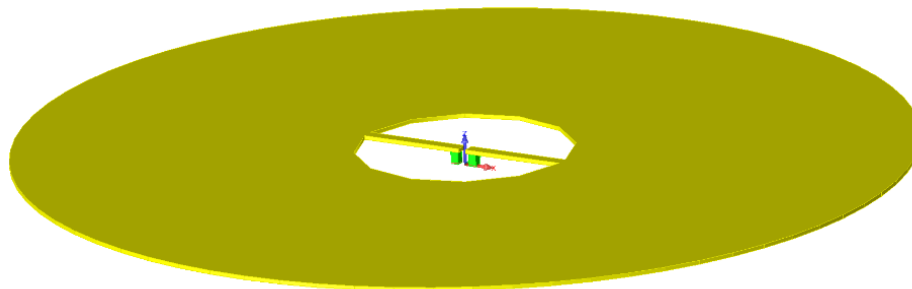
Kaip ir buvo tikėtasi, 250 GHz prasčiau detektavo šiluminę spinduliuotę dėl siauresnės antenos dažninės juostos. Todėl rezonansiniai detektoriai spėjama geriau tiktų heterodininiam radiometro tipui. Čia daro įtaką ne pati antenos dažninė juosta, o stiprintuvo dažninė juosta. Kadangi visa šiluminė galia su LO galia yra sumaišoma ir perkeliama į IF dažnių juostą. Taip pat galima gauti geresnę dažninę rezoliuciją. Vėliau buvo sumodeliuotas heterodininis radiometras ir taip pat paskaičiuotas tikėtinas NETD.

4. Heterodininio tipo radiometro modeliavimas

4.1 Antena ir detektorius

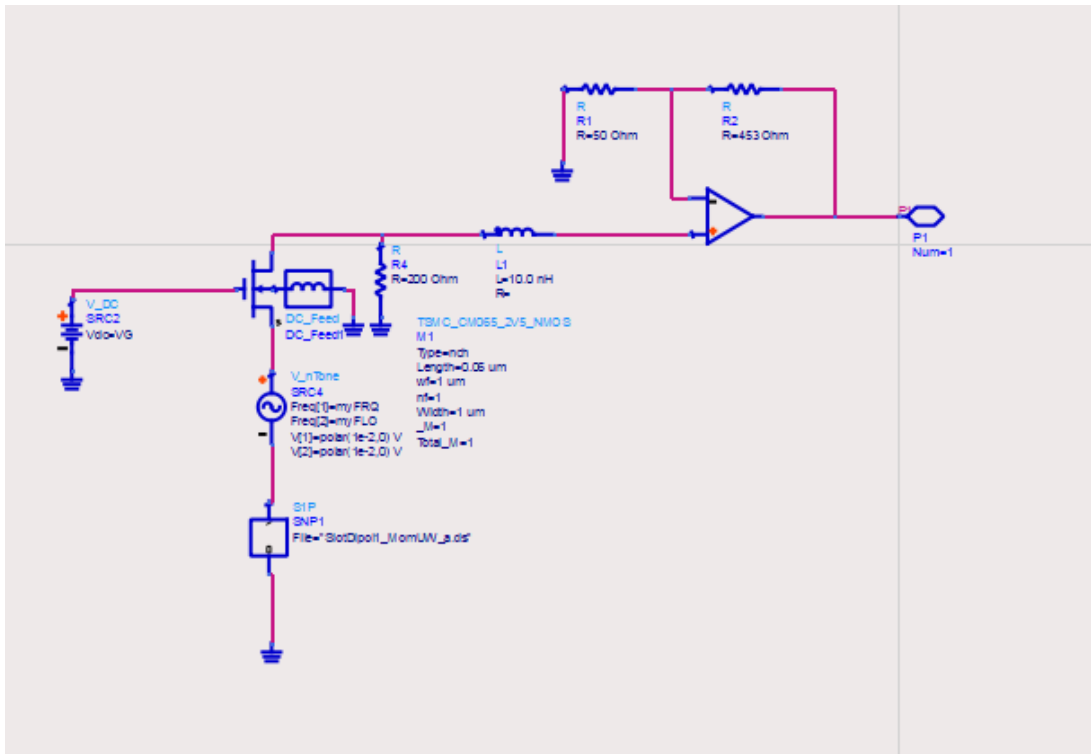
Kadangi antena ir detektorius yra auginami ant vieno kristalo tai tikslinga abu sujungti į vieną skyrelį ir aptarti modeliavimo procesą.

Buvo sumodeliuotas 90 nm silicio KMOP detektorius su antena. 4 pav. parodyta plyšinės antenos 3D modelis. Pagal antenos plyšį parinkome rezonansinį dažnį 250 GHz.

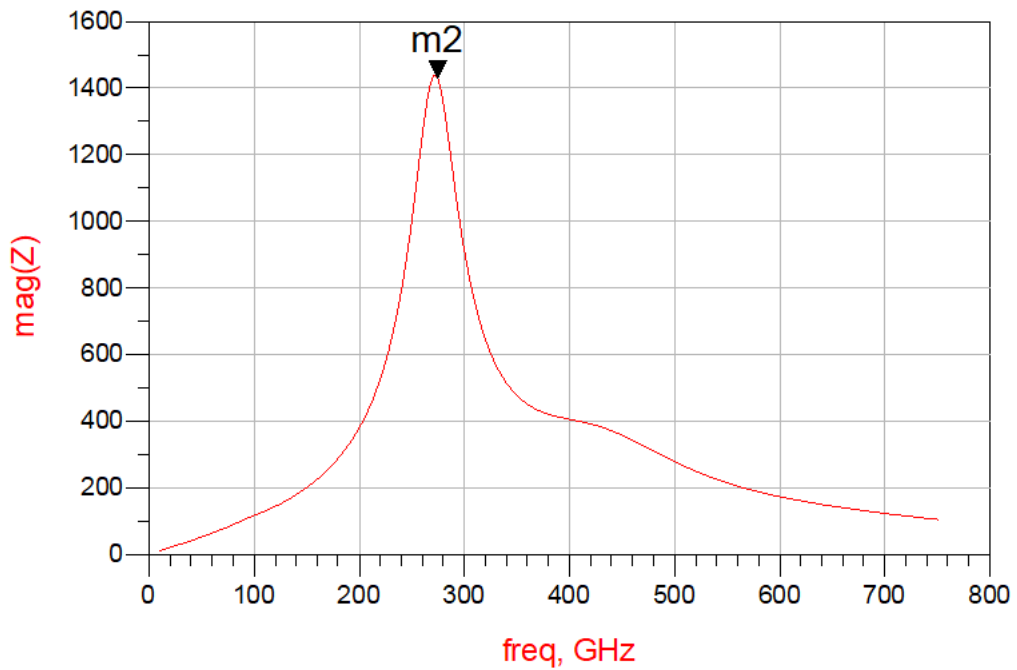


14 pav. Sumodeliuotos plyšinės antenos 3D modelis (paveikslukas neatitinka mastelio)

Toliau buvo modeliuojamas detektorius, jo schema pavaizduota 15 pav. Buvo naudojamas TSMC 90 nm KMOP lauko tranzistorius.



15 pav. Sumodeliuoto 250GHz TSMC KMOP lauko tranzistoriaus detektoriaus ir antenos schema

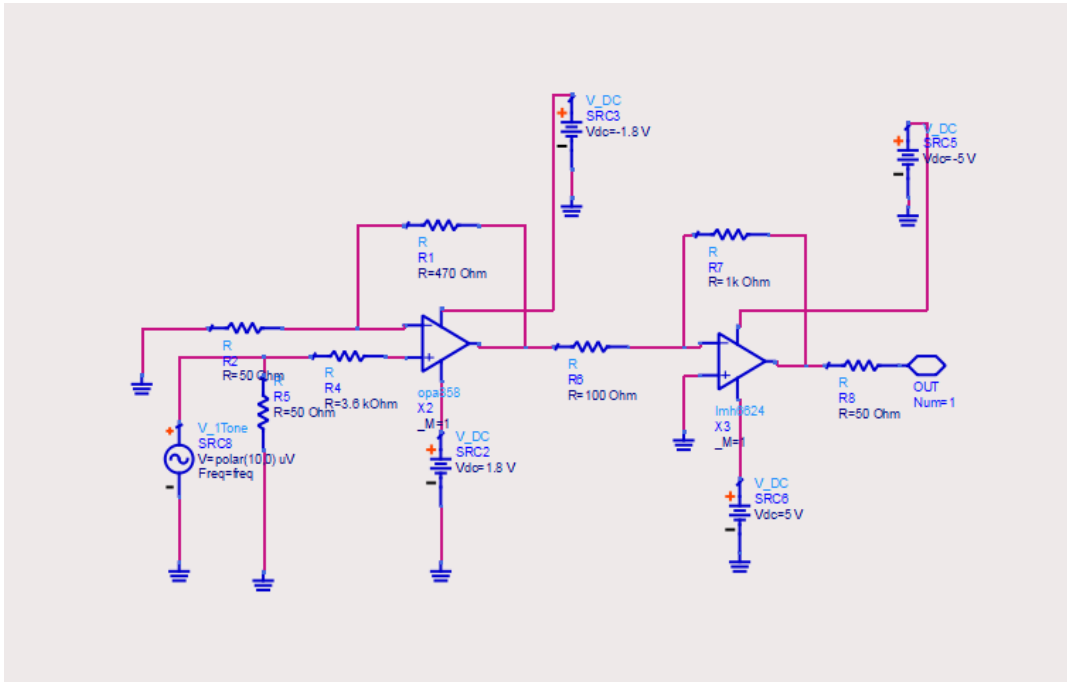


16 pav. Sumodeliuoto detektoriaus dažninė charakteristika

Rezonansinis dažnis ties 248 GHz

4.2 Dviejų pakopų stiprintuvas

Toliau svarbi dalis yra stiprintuvas. Labai svarbu, kad stiprintuvas turėtų plačią juostą, kad visa galia patekusi iš THz dažnių juostos į IF juostą būtų sustiprinama. Tai pat stiprintuvas turi turėti didelį stiprinimo koeficientą. Kadangi tokio operacinio stiprintuvo, nėra pirkti, todėl reikėjo suskirstyti stiprintuvą į dvi pakopas su dviem skirtingais operaciniais stiprintuvais, kurie stiprintuvuose atlieka skirtingas užduotis. Dviejų pakopų stiprintuvas pavaizduotas 17 pav.

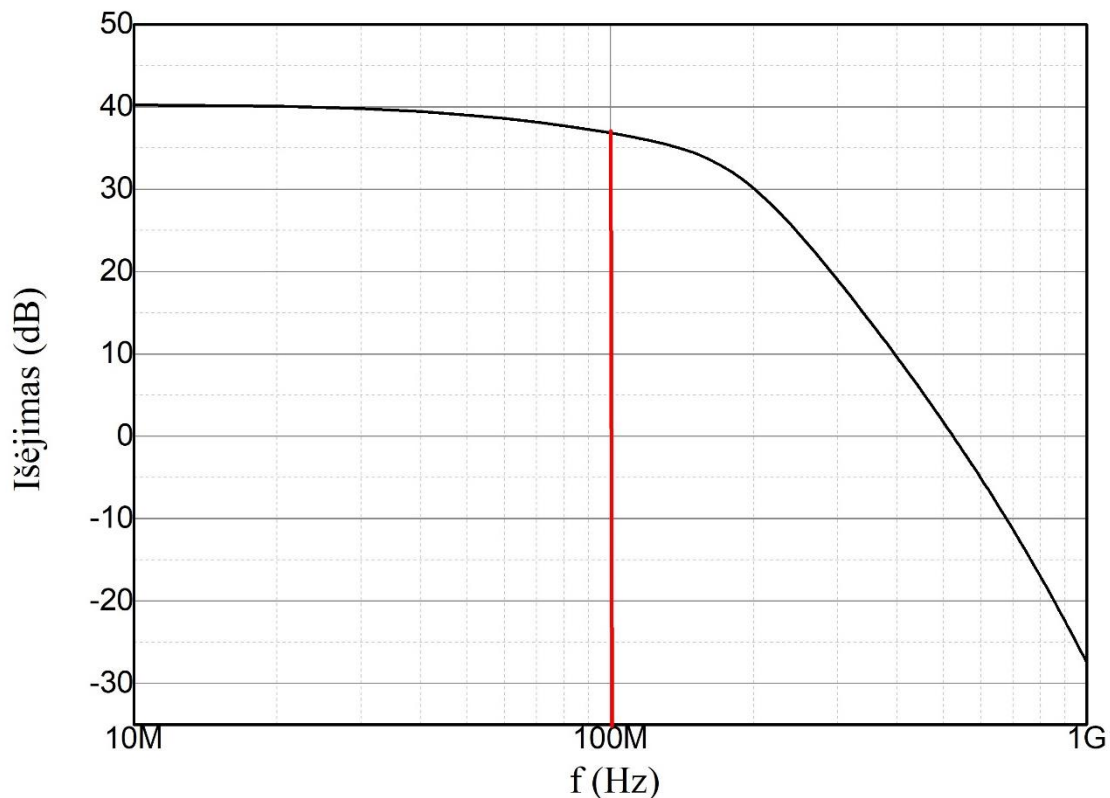


17 pav. Sumodeliuota dviejų pakopų stiprintuvo schema

Pirmajai pakopai buvo pasirinktas OPA858 stiprintuvas. Jis turi plačią stiprinimo juostą – 5,5 GHz, mažą įėjimo triukšmą – $2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Tai yra labai svarbu, nes bus detektuojamas šiluminis triukšmas ir pats stiprintuvas turi turėti kuo mažesnę triukšmą.

Antrajai pakopai buvo pasirinktas LHM6624, kuris turi ne tokią didelę stiprinimo juostą– 1,5GHz, bet sujungtas kartu su OPA858, nesumažina bendros juostos ir padidina bendrą stiprinimo koeficientą. Turi mažiausią įėjimo triukšmą - $0,92 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

OPA858 ir LHM6624 buvo nustatyti po 10 kartų stiprinimo parenkant tam reikalingus rezistorius. Pav. 18 pavaizduota tokio stiprintuvo perdavimo charakteristika. Iš grafiko matyti, kad stiprinimas yra 40 dB, o stiprinimo juosta yra 100 MHz.

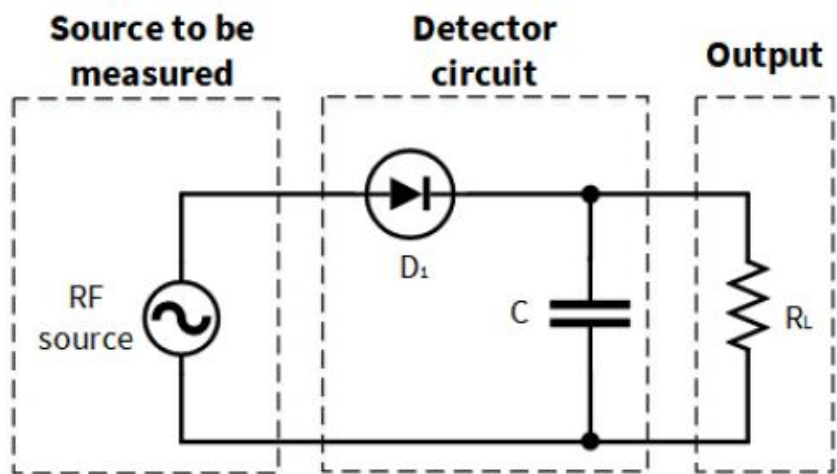


18 pav. dviejų pakopų stiprintuvo perdavimo charakteristika

4.3 Galios detektavimas

Kadangi mūsų tikslas yra detektuoti šiluminę spinduliuotę, surinkti visą jos galią ir detektuoti reikalingą schemą, kuri sustiprintų kintamą signalą ir paverstų į nuolatinės galios signalą.

Paprastas sprendimas - diodinis detektorius. Diodinio aptikimo principas yra kintamosios srovės signalo ištiesinimas per vienakryptį perdavimo charakteristikos diodą ir ištiesintą signalą perduodant per integratorių, kad gautume nuolatinės srovės komponentę. Vieno diodo detektoriaus schema parodyta 19 paveiksle. [11]



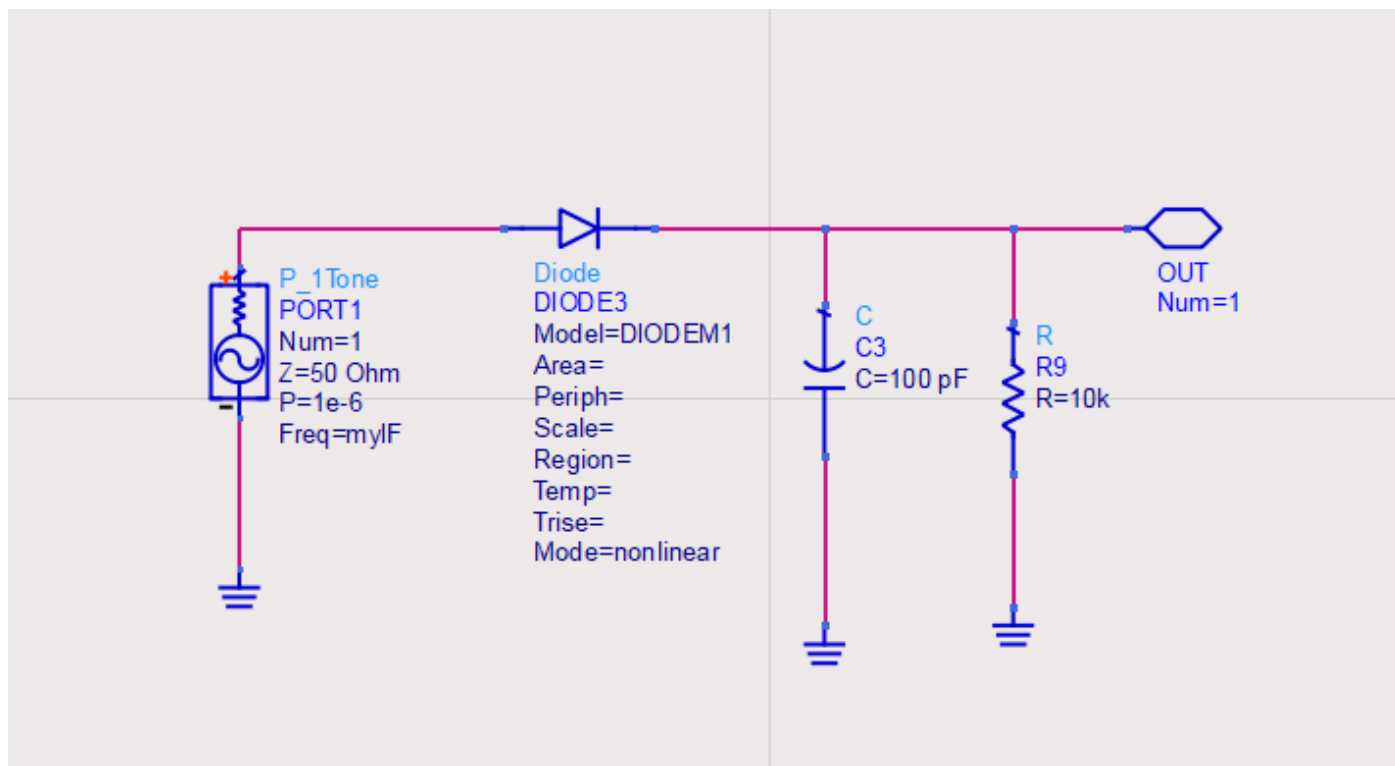
19 pav. Diodo detektoriaus schema

Kondensatorius C parenkamas pakankamai didelis, kad jo talpinė reaktyvioji varža būtų maža, palyginti su diodo varža. Jis turi užtikrinti gerą dažnių jungimą su diodu, kad visa radijo dažnių įtampa atsirastų diodo gnybtuose. Apkrovos rezistorius R_L kartu su kondensatoriumi C lemia aptikimo greitį. [11]

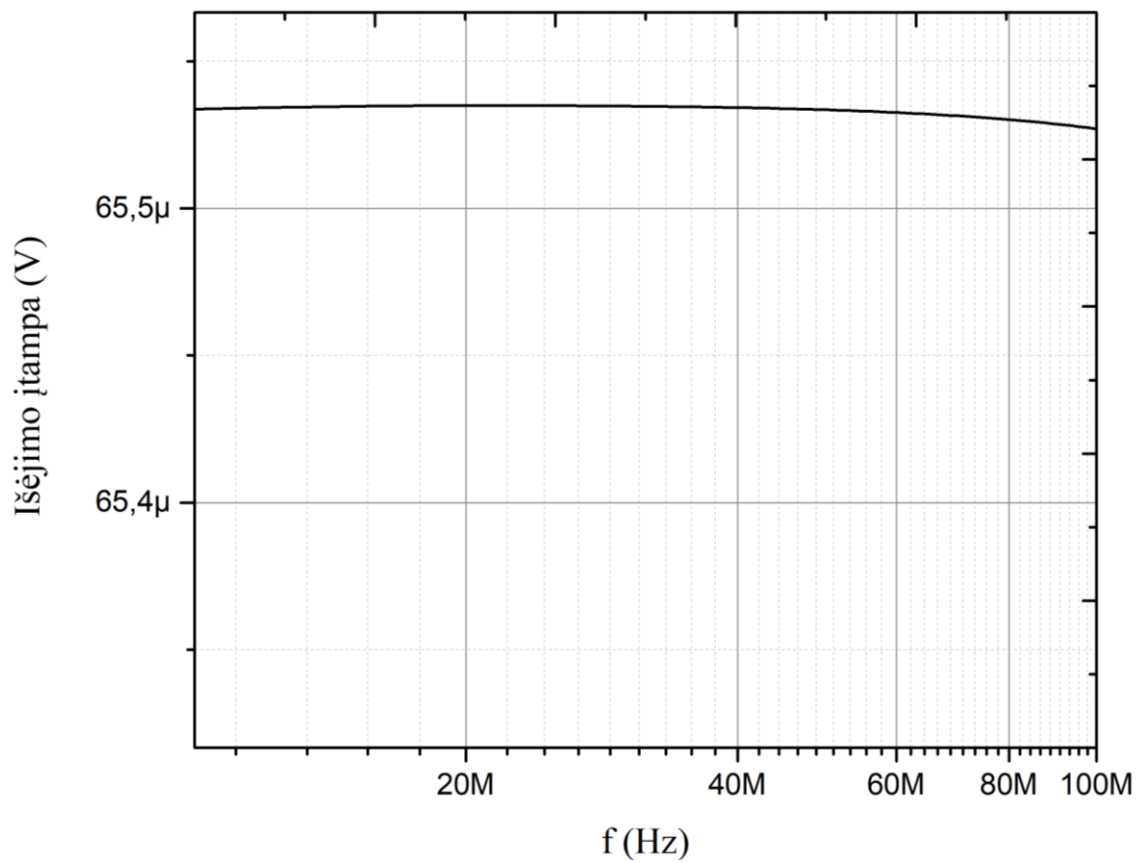
Pagrindinis šios detektoriaus grandinės elementas gali būti Šotkio diodas. Šotkio diodo charakteristikos yra panašios į tipinio PN diodo ir pasižymi panašiomis srovės ir įtampos charakteristikomis. Pagrindinis Šotkio diodo privalumas, palyginti su PN diodu, yra tas, kad jis pasižymi mažesniu tiesioginės įtampos kritimu (nuo 0,15 V iki 0,45 V), palyginti su PN diodu (nuo 0,7 V iki 1,7 V). Be to, PN sandūros diodams būdingas mažas rekombinacijos greitis, tuo tarpu Šotkio diodas valdo krūvininkų pernašą per barjerą. Tai lemia labai greitą Šotkio diodų perjungimą ir daro juos labai patrauklius radijo ir mikrobangų ištiesinimui. [11]

Literatūroje diodo (galios) detektorių vadina kvadratinio dėsnio detektoriumi (angl. *square-law detector*). Kvadratinio dėsnio detektorius - tai prietaisas arba grandinė, kuri priima įėjimo signalą ir duoda išėjimą, proporcingą jo kvadratui, $X_{i\delta} = AX_{i\epsilon}^2$, kur $X_{i\delta}$ gali būti srovė arba įtampa, o A yra proporcingumo konstanta. Tokio detektoriaus naudingumas yra ištiesinimas arba dažnio žeminimo konversija. [5]

20 pav. pavaizduota sumodeliuota galios detektoriaus schema. Buvo pasirinktas Šotkio diodas. Buvo įdėtas $1\mu\text{W}$ galios šaltinis ir išėjime detektorius detektavo $65,47\mu\text{V}$. Sumodeliuoto detektoriaus jautris lygus $65,47\text{V/W}$.



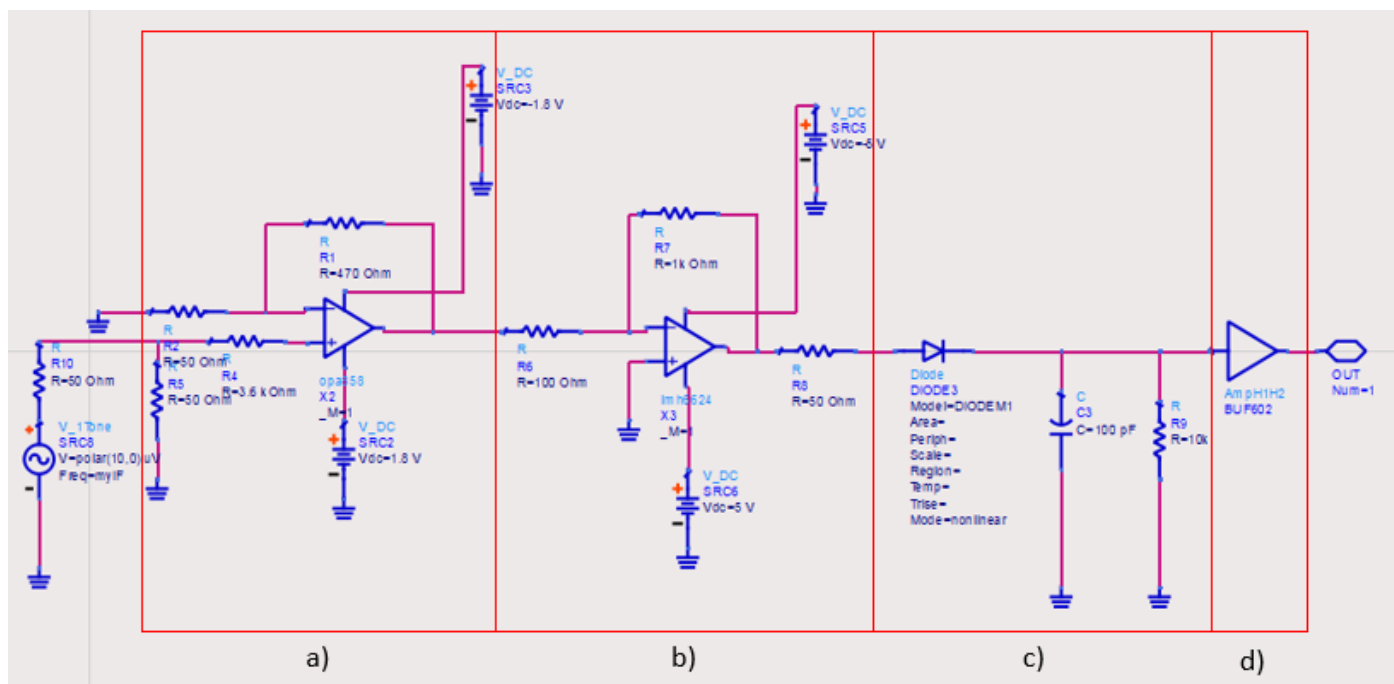
20 pav. Galios stiprintuvo su Šotkio diodu schema



21 pav. Sumodeliuoto galios detektoriaus išėjimo įtampa. $U_{is}=65,47\mu V$

4.4 Heterodininio tipo Radiometras

Sujungus stiprintuvą, galios detektorių ir pridėjus papildomą operacinį stiprintuvą gauname schemą pavaizduotą pav. 22:



22 pav. bendra stiprintuvo ir galios detektavimo schema: a) pirmą pakopą b) antrą pakopą c) galios detektorius d) išėjimo varžos mažinimo schema

d) dalis yra labai svarbi, kadangi papildomai sujungtas operacinis stiprintuvas su vienetiniu stiprinimu sumažina išėjimo varžą. Operacinis turi atitikti tik vieną reikalavimą – turi būti stabilus su vienetiniu stiprinimu. Mūsų atveju pasirinkome BUF602, kuris didelę išėjimo varžą (pagal pav. 20 R9) 10 kΩ paverčia į kelis omus, kad būtų galima išėjimą kabeliais sujungti su prietaisais ir būtų užtikrintas impedansų suderinamumas.

Jau aptartas radiometro dalis sujungėme į bendrą radiometro schemą pavaizduotą 23 pav. LO galios kintamasis yra P_{LO} ir bandinio galia P_{BB} buvo sumodeliuotas pagal formulę (4). T pasirinkome $1 \cdot 10^5$ ir Δf 100 MHz. Pasirinkome tokį didelį temperatūrų skirtumą dėl to, kad modeliuojant mažesnę skirtumą susidūrėme su pačios programos ribojimais: antena pradeda neaptikinti mažų galių ir abiejų šaltinių galios nesimaišo ir tiesiog praeina tiesiai per maišytuvą.

Abu LO ir juodo kūno šaltinius į grandinę jungėme jau už antenos – antena priėmė abiejų šaltinių įtampas. Kai šaltinių ir antenos impedansai tinkamai susiderinę, galime apskaičiuoti perduodamą didžiausią galią antenos, esant fiksuotai šaltinio galiai [9]:

$$P_0 = \frac{U_0^2}{8 \cdot Re(Z_a)} \quad (6)$$

Čia Z_a yra sumodeliuotos antenos realusis impedansas, kuris priklauso nuo dažnio (antenos rezonansinis dažnis ties 250 GHz).

Šaltinių generuojamas įtampas parinkome iš formulės (6) $U = \sqrt{8 \cdot \text{real}(Z_a) \cdot P}$, P – šaltinio galia (P_{BB} ir P_{LO} atitinkamai).

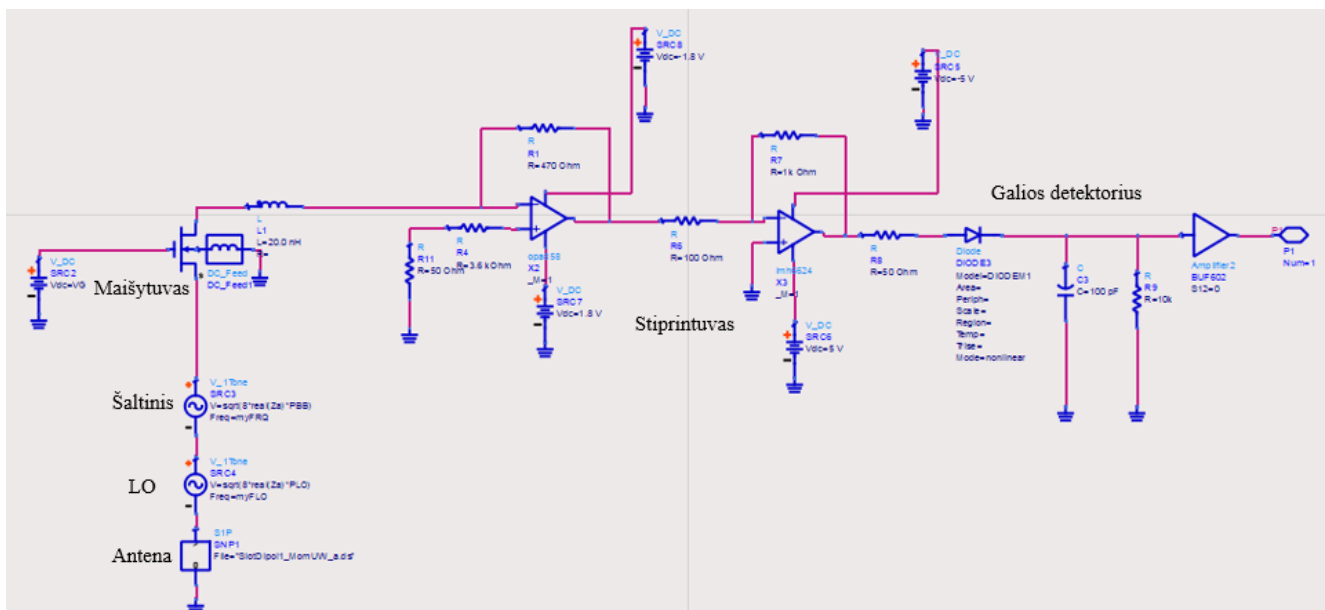
Programai nurodėme, kad su triukšmų generavimo įrankiu „Noise controller“ generuotų triukšmus ir išvestų į išėjimą.

Toliau modeliudami jutiklį pasirinkome keisti LO galią, LO signalo dažnį ir maišytuvo darbinį tašką (maišytuvas, kaip buvo anksčiau minėta, susideda iš detektoriaus ir antenos, tai mūsų atveju detektoriaus darbinis taškas, valdomas su tranzistoriaus užtūros įtampa).

Norint paskaičiuoti heterodininio radiometro NETD, tiesioginiam detektavimui naudota formulė (5) nebetiksli. Kadangi skaičiuojant pagal (5) formulę neįsivertinimą ir dažnių juostą, kurioje yra integruojamas signalas. Todėl su šia formule yra skaičiuojama sistemos triukšmų temperatūrą T_n . Kadangi priėmimo dažnių juosta yra fiksuota, todėl imtuvas gali aptikti tiek mažesnius temperatūrų pokyčius, kiek antenos temperatūra pasikeičia [14]. Todėl $T_n = T / \text{SNR}$. O norint gauti pilnai NETD, reikia įsivertinti stiprintuvo dažnių juostą ir integravimo laiką:

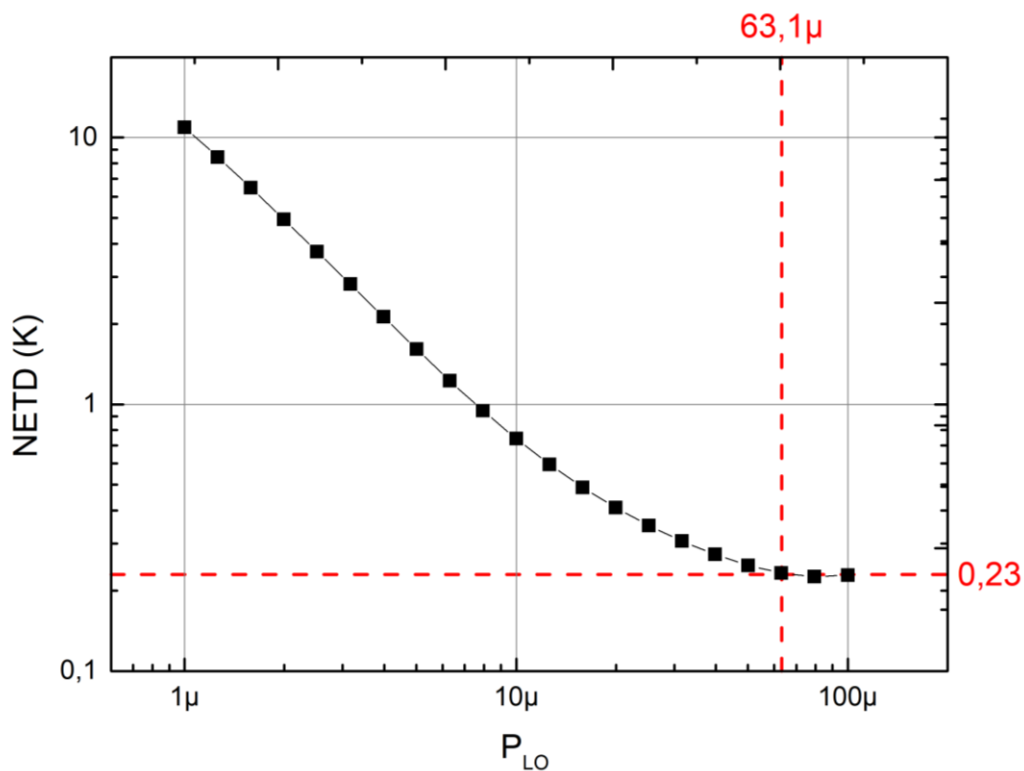
$$NETD = \frac{T_n}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}} \quad [14] \quad (7)$$

Čia τ nusakome, kad integruoja 1 s ir $\Delta f = 100$ MHz, pagal sumodeliuotą stiprintuvą.



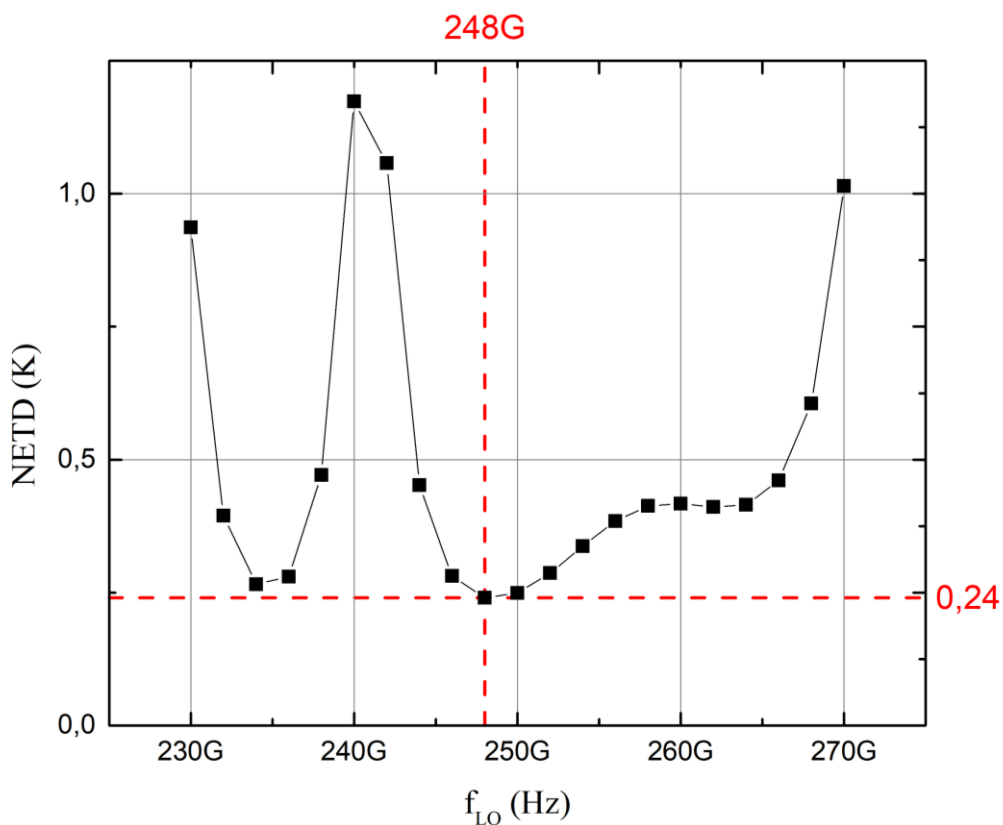
23 pav. Radiometro principinė schema (parametrų modeliavimas)

Atlikus radiometro modeliavimą su ADS programa gavome radiometro NETD, skaičiuotą pagal formulę(7), priklausomybes atitinkamai keičiant LO galią ir dažnį ir tranzistoriaus užtūros įtampą, kad būtų galima sužinoti optimaliausius eksperimento parametrus:



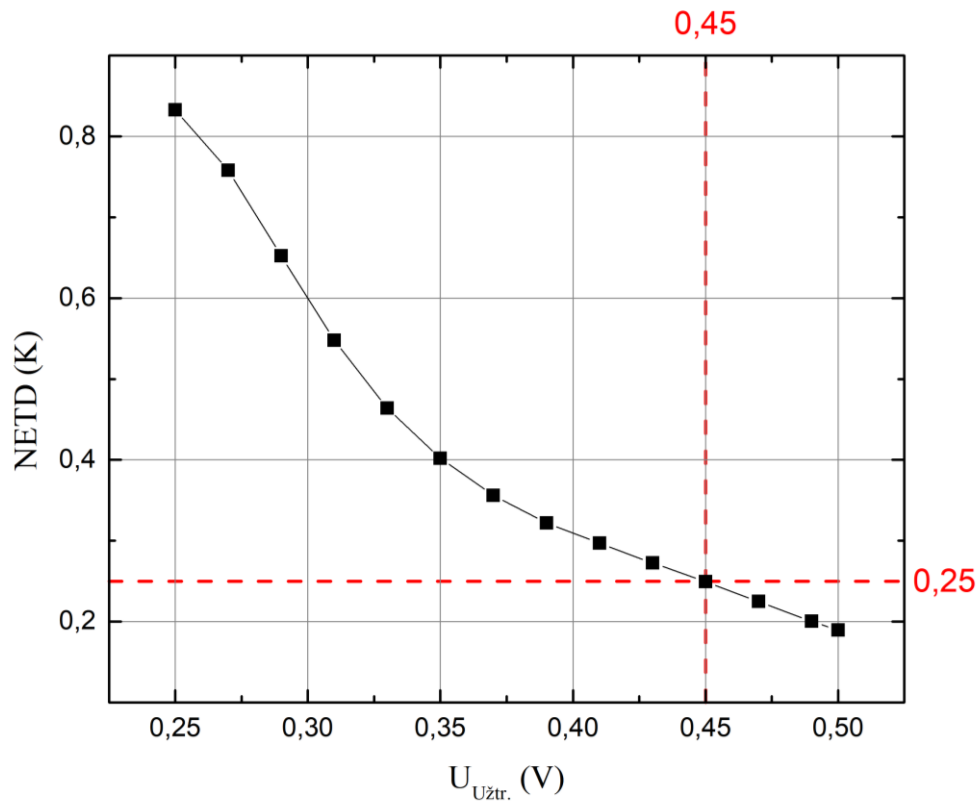
24 pav. Radiometro NETD priklausomybė nuo LO galios.

Geriausias NETD matomas prie 63.1μ , kai $f_{LO}=250\text{GHz}$ ir $U_G=0.45\text{V}$



25 pav. Radiometro NETD priklausomybė nuo LO dažnio.

Geriausias NETD matomas prie 248 GHz , kai $P_{LO}=63 \mu$ ir $U_G=0.45\text{V}$.



26 pav. Radiometro NETD priklausomybė nuo tranzistoriaus užtūros įtampos.

NETD=2.5 K matomas prie 0,45 V, kai $P_{LO}=63\mu$ ir $f_{LO}=250\text{GHz}$

Išvados

Šiame darbe buvo atlikta tiesioginė šiluminės spinduliuotės detekcija, naudojant radiometrą. Eksperimentui atlikti buvo naudojama du skirtingi THz detektorius: plačiajuostis ir 250 GHz rezonansinis. Buvo paskaičiuotas NETD ir palygintas su literatūroje aprašytu šiluminės detekcijos tyrimu [6],[7]. Rezultatai pateikti 1 lentelėje. Taip pat buvo sumodeliuotas pasyvus heterodininio tipo radiometras su Si KMOP elektrinio lauko detektoriumi. Buvo supažindinta su radiometrų teorija ir jų ypatumais, taip pat išmokta naudotis ir modeliuoti su ADS programa. Ateityje bus realizuojamas ir charakterizuojamas radiometras.

Iš gautų rezultatų galime daryti išvadas:

- Pavyko aptikti šiluminį signalą naudojant tiesioginio tipo radiometrą. Buvo gauti NETD 8,7 K su 250 GHz rezonansiniu detektoriumi, taip pat NETD 5,8 K su plačiajuosčiu THz detektoriumi.
- Gauti rezultatai palyginti su literatūroje aprašytais rezultatais (1 lentelė)
- Kaip buvo tikėtasi, rezonansinis detektorius labiau tinka heterodininio tipo radiometrui ir sumodeliavus tokį detektorių gavome NETD 0,2 K.

1 lentelė. NETD palyginimas

| Detektorius | Radiometro tipas | NETD | Šaltinis |
|------------------------------|--------------------------|---------|------------|
| 250 GHz plyšinė antena | Tiesioginis | ~8,7 K | Šis darbas |
| Plačiajuostė spiralės antena | Tiesioginis | ~5,8 K | Šis darbas |
| Plačiajuostė spiralės antena | Tiesioginis | 2,2 K | [6],[7] |
| 250 GHz plyšinė antena | Heterodininis (teorinis) | ~0,24 K | Šis darbas |

Literatūra

- [1] L. Werner *et al.*, “Towards traceable radiometry in the terahertz region,” *Metrologia*, vol. 46, no. 4, 2009. doi:10.1088/0026-1394/46/4/s05
- [2] C. Viegas, B. Alderman, J. Powell, H. Liu, H. Wang and R. Sloan, "Millimeter wave radiometers for applications in imaging and nondestructive testing," *2015 8th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT)*, Cardiff, UK, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/UCMMT.2015.7460610.
- [3] Nett, H., Roser, H. P., Crowe, T., & Schafer, F. (1986). A quasi-optical Schottky barrier diode mixer for the submillimeter region. *SPIE Proceedings*. <https://doi.org/10.1117/12.952321>
- [4] P. H. Siegel, R. P. Smith, M. C. Graidis and S. C. Martin, "2.5-THz GaAs monolithic membrane-diode mixer," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 5, pp. 596-604, May 1999, doi: 10.1109/22.763161.
- [5] E. R. Brown, “Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and thz Remote Sensing,” *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 13, no. 04, 2003. doi:10.1142/s0129156403002125
- [6] D. Čibiraitė-Lukenskienė, *Room-temperature passive terahertz imaging based on high sensitivity field-effect transistor detectors*, Jul. 2021.
- [7] D. Čibiraitė-Lukenskienė *et al.*, “Passive detection and imaging of human body radiation using an uncooled field-effect transistor-based thz detector,” *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4087, 2020. doi:10.3390/s20154087
- [8] M. M. Wiecha *et al.*, “Antenna-coupled field-effect transistors as detectors for terahertz near-field microscopy,” *Nanoscale Advances*, vol. 3, no. 6, pp. 1717–1724, 2021. doi:10.1039/d0na00928h
- [9] Pozar, D. M. (n.d.). *Microwave Engineering* (4th ed.).
- [10] Pérez-Escudero, J. M., Quemada, C., Gonzalo, R., & Ederra, I. (2021). A millimeter-wave 4th-harmonic schottky diode mixer with integrated local oscillator. *Applied Sciences*, 11(16), 7238. <https://doi.org/10.3390/app11167238>
- [11] RF and microwave power detection with Schottky diodes. (n.d.). https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN_1807_PL32_1808_132434_RF%20and%20microwave%20power%20detection%20-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46265f064ff0166440727be1055
- [12] Ikamas, K., Cibiraite, D., Lissauskas, A., Bauer, M., Krozer, V., & Roskos, H. G. (2018). Broadband terahertz power detectors based on 90-nm silicon CMOS transistors with flat responsivity up to 2.2 thz. *IEEE Electron Device Letters*, 39(9), 1413–1416. <https://doi.org/10.1109/led.2018.2859300>
- [13] Lewis, R. A. (2013). *Terahertz Physics*, 190–204. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139088190>
- [14] *Tools of radio astronomy*. (2009). *Astronomy and Astrophysics Library*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85122-6>

Šiluminės spinduliuotės detekcija naudojant radiometrą su Si KMOP tranzistoriumi

Ieva Morkūnaitė
Santrauka

Šiame darbe nagrinėjama šiluminės spinduliuotės detekcija naudojant radiometrą su silicio KMOP tranzistoriumi. Pagrindinis darbo tikslas yra ištirti radiometrijos principus ir sukurti veiksmingą tyrimą šiluminės spinduliuotės aptikimui THz dažnių diapazone. Darbe išanalizuoti radiometrijos pagrindai, apžvelgti radiometrų tipai ir jų detektavimo ypatumai, ypatingą dėmesį skiriant tiesioginio ir heterodininio detektavimo metodams.

Naudojant du skirtingus KMOP detektorius, atlikta tiesioginio šiluminio signalo detekcija, siekiant nustatyti, kuris detektorius geriau tinka tiesioginio tipo radiometrui. Taip pat buvo sumodeliuotas heterodininio tipo radiometras. Eksperimentinėje dalyje išbandyti plačiajuostis THz detektorius su spiraline antena ir 250 GHz rezonansinis detektorius, nustatyti jų jautrumo parametrai ir palyginti.

Darbo rezultatai rodo, kad KMOP technologija pagrįsti detektoriai gali būti sėkmingai naudojami THz dažnių diapazone. Ateityje planuojama toliau tobulinti radiometrų dizainą, siekiant sukurti kompaktiškus, tinkamus įvairioms praktinėms taikymo sritims.

Thermal Radiation Detection Using a Radiometer with a Si CMOS Transistor

Ieva Morkūnaitė

Summary

The research of this thesis aims at the detection of thermal radiation with a radiometer using a silicon CMOS transistor. The goal of the present research is to investigate the basis of radiometry and, based on it, develop a methodological approach to identifying thermal radiation in the THz range. the basic principles of radiometry on the one hand and overview concepts describing some types of radiometer, as well more carefully the properties direct vs. heterodyne detection.

We analyzed two different CMOS detectors for the direct thermal signal detection to find out which can be used properly detecting signal in the direct-type radiometer. In addition, a heterodyne type radiometer was also modeled. The experimental section which was carried out on a broadband THz detector with spiral antenna, and 250 GHz resonant detector, in terms of sensitivity parameters and comparison between them.