

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRO  
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

PAULIUS RAGULIS

PLAČIAJUOSČIŲ MIKROBANGŲ JUTIKLIŲ KŪRIMAS, TYRIMAS  
IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P), puslaidininkių fizika (P 265)

Vilnius 2013

Disertacija rengta 2008 – 2013 metais Fizinių ir Technologijos Mokslo Centro  
Puslaidininkių fizikos instituto Mikrobangų laboratorijoje

Mokslinis vadovas:

Habil. dr. Žilvinas Kancleris (FTMC Puslaidininkių fizikos institutas,  
fiziniai mokslai, fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265)

Konsultantas:

Prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai,  
fizika – 02P, puslaidininkių fizika – P265)

## **Padėka**

Noriu padėkoti Fizinių ir Technologijos Mokslų Centro Mikrobangų laboratorijos kolektyvui už suteiktą galimybę ir pagalbą atliekant šį darbą. Ypatingai esu dėkingas vadovui habil. dr. Žilvinui Kancleriui už suteiktas žinias, vertingas idėjas, patarimus, už pagalbą interpretuojant gautus rezultatus, pasitikėjimą dirbant mokslinį darbą ir nuolatinį rūpinimąsi darbo eiga.

Nuoširdžiai dėkoju dr. Rimantui Simniškiui ir prof. dr. Vincui Tamošiūnui už mokslines diskusijas, naudingus pasiūlymus ir pagalbą atliekant eksperimentus.

Esu dėkingas Angelei ir Gyčiui Steikūnams, UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“, doc. dr. Sauliui Balakauskui už pagalbą praktiškai realizuojant rezistorinius jutiklius.

Dėkoju savo tėvams, žmonai Jurgitai, dukrelei Agotai už visapusišką palaikymą, supratimą ir kantrybę.

# Turinys

1	Įvadas.....	7
2	Literatūros apžvalga.....	13
2.1	Mikrobangų galios matavimas.....	13
2.1.1	Vidutinės galios matuokliai.....	13
2.1.2	Impulsinės galios matuokliai.....	21
2.1.3	Jutiklių HPM impulsams matuoti apibendrinimas.....	31
2.2	H tipo bangolaidis.....	33
2.3	Prietaisų elektromagnetinis pažeidžiamumas.....	35
2.3.1	Elektromagnetinių trikdžių tipai.....	36
2.3.2	Elektromagnetinio pažeidžiamumo modeliai.....	38
2.4	Baigtinių skirtumų laiko skalėje metodas.....	39
2.5	Apibendrinimas.....	41
3	Modeliavimo rezultatai.....	43
3.1	Rezistorinis jutiklis pritaikytas WR90 bangolaidžiui.....	43
3.2	Rezistoriniai jutikliai pritaikyti H tipo bangolaidžiams.....	48
3.2.1	Du jautrieji elementai ant bangolaidžio keteros.....	50
3.2.2	Rezistorinis jutiklis su skersai bangolaidžio keterų įtvirtu jautriuotu elementu.....	52
3.2.3	Rezistorinis jutiklis su koncentatoriumi pritaikytas WRD250 bangolaidžiui.....	57
3.2.4	Rezistorinis jutiklis pritaikytas WRD840 bangolaidžiui su koncentatoriumi.....	62
3.2.5	Rezistorinis jutiklis sujungtas su ruporine antena.....	64
4	Eksperimento metodikos.....	68
4.1	Rezistorinio jutiklio dažninės charakteristikos matavimas.....	69
4.2	Rezistorinio jutiklio varžos pokyčio nustatymas naudojant didelės galios mikrobangų impulsus.....	72
4.3	Dažninės charakteristikos matavimas WR90 bangolaidyje.....	74
4.4	Rezistorinio jutiklio sujungto su ruporine antena jautrio matavimai.....	75
4.5	Rezistorinių jutiklių gamyba.....	77
5	Matavimų rezultatai.....	79
5.1	WR90 rezistorinis jutiklis.....	79
5.2	Rezistoriniai jutikliai pritaikyti WRD250 bangolaidžiui.....	82
5.3	WRD250 rezistorinio jutiklio sujungto su ruporine antena matavimai.....	86
6	Rezistorinių jutikliu taikymai elektromagnetinio atsparumo tyrimuose.....	89
6.1	Elektroninių prietaisų gedimo modeliai.....	89

6.1.1	Šiluminis gedimo modelis .....	89
6.1.2	Parazitinio krūvio modelis .....	92
6.2	DGM impulsų poveikio elektronei aparatūrai tyrimai .....	93
6.3	Maršrutizatorių atsparumo DGM impulsams tyrimai .....	97
6.4	Šviesolaidinių konverterių atsparumo DGM impulsams tyrimai .....	101
7	Rezultatai ir išvados .....	107
8	Naudotos literatūros sąrašas .....	109

## Santrumpos

- RJ – rezistorinis jutiklis  
JE – jautrusis elementas  
DGM – didelės galios mikrobangos  
SBK – stovinčios bangos koeficientas  
BSLS – baigtinių skirtumų laiko skalėje

## Lentelių sąrašas

- 1 lentelė. Jutiklių skirtų mikrobangų galiai matuoti palyginimas. 32 psl.
- 2 lentelė. Stačiakampių ir H tipo bangolaidžių charakteringų dydžių palyginimas. 34 psl.
- 3 lentelė. Rezistorinio jutiklio padaryto iš  $h \times w = 4 \times 1 \text{ mm}^2$  n-Si, maksimalus jautrio pokytis ir stovinčios bangos koeficientas esant skirtingiems jutiklių ilgiams ir savitosioms varžoms. Skliausteliuose įrašytos reikšmės gautos modeliuojant jutiklį, kurio aukštis  $h = 3,8 \text{ mm}$ . 56 psl.
- 4 lentelė. JE savitoji varža, kuriai esant stebimas mažiausias dažninės charakteristikos netolygumas skirtingo skerspjūvio 1 mm aukščio jutikliams su skirtingos dielektrinės skvarbos koncentratoriais. Skliausteliuose nurodyta suminė jutiklių varža  $k\Omega$  61 psl.
- 5 lentelė. WRD840 bangolaidžiui pritaikyto jutiklio santykiniai jautrio pokyčiai, kai JE aukštis  $h = 3 \text{ mm}$ , o koncentratoriaus dielektrinė skvarba  $\epsilon_k = 11,9$ . 63 psl.
- 6 lentelė. WR90 rezistorinio jutiklio charakteringi parametrai ir jautris. 79 psl.
- 7 lentelė. Rezistorinio jutiklio pritaikyto WRD250 bangolaidžiui charakteringi jautriojo elemento matmenys. 82 psl.

# 1 Įvadas

Tobulėjančios ir besiplečiančios ryšių technologijos užima vis svarbesnę vietą kasdieniniame gyvenime. Ryšio ir automatikos elektroninėse sistemose naudojami vis sudėtingesni ir didesnės integracijos grandynai, didėja programinės įrangos bei perduodamos informacijos apimtis, vis daugiau įvairių prietaisų yra jungiama prie tinklo, o duomenys gali būti perduodami tarp begalės prietaisų tokių kaip kompiuteriai, jutikliai, radarai ir t.t. Iš vienos pusės, dėl puslaidininkių technologijos pažangos visų šių prietaisų elektronikos komponentai mažėja, dėl ko jie tampa mažiau atsparūs elektromagnetinei spinduliuotei. Iš kitos pusės, stebima pažanga mikrobangų elektronikos srityje leidžia sukurti mažesnių gabaritų, didelės galios mikrobangų (DGM) impulsų šaltinius, kurių spinduliuojami impulsai gali paveikti elektronikos prietaisus. Negalima atmesti ir tikslingo DGM impulsų panaudojimo galimybes. Todėl tenka atlikti specialius tyrimus ir imtis įvairių priemonių, norint užtikrinti patikimą ir nesutrikdomą elektroninių sistemų eksploataciją. Norint nustatyti silpnąsias prietaisų vietas, sukurti prietaisus atsparesnius elektromagnetinei spinduliuotei, 1 – 10 GHz dažnių ruože yra atliekami elektromagnetinio atsparumo tyrimai. Atliekant tokius tyrimus būtina pastoviai stebėti DGM impulsų galią matavimo metu. Dideli matavimo kiekiai reikalauja, kad matavimo įranga ir metodai būtų tikslūs, patikimi ir lengvai panaudojami.

Vienas iš galimų variantų matuojant DGM impulsų galią yra rezistorinis jutiklis (RJ), kurio veikimas grindžiamas elektronų kaitimo efektu puslaidininkiuose. Jis registruoja DGM impulsus tiesiogiai, nebijo perkrovimų bei pasižymi puikiomis ilgalaikio stabilumo savybėmis. Viena iš pagrindinių priežasčių ribojanti platesnį RJ panaudojimą yra palyginti siauras jo veikimo dažnių ruožas, kurį sąlygoja stačiakampio bangolaidžio, į kurį yra talpinamas jutiklio jautrusis elementas (JE), savybės. Pritaikant rezistorinį jutiklį plačiajuosčiam H tipo bangolaidžiui, būtų galima gerokai praplėsti dažnių ruožą, kuriame šis jutiklis galėtų būti panaudotas.

Kadangi elektromagnetinio atsparumo tyrimai yra atliekami atviroje erdvėje, norint rezistorinį jutiklį panaudoti šiems tyrimams jis yra jungiamas prie ruporinės antenos. Suderinus ruporinės antenos ir rezistorinio jutiklio parametrus galima sukurti matavimo prietaisą su plokščia dažnine charakteristika.

Disertacijoje yra pateikiami teoriniai rezistorinių jutiklių, pritaikytų WR90, WRD250 ir WRD840 bangolaidžiams, jautriojo elemento elektrofizikinių parametrų modeliavimo rezultatai, aprašomi, geriausias savybes demonstruojančių, jutiklių, pritaikytų WR90 ir WRD250 bangolaidžiams, tyrimai. Praktines rezistorinių jutiklių taikymo galimybes iliustruoja mikrobangų elektrinio lauko stiprio matavimai atliekant internetinių maršrutizatorių ir šviesolaidinių konverterių elektromagnetinio atsparumo tyrimus.

**Darbo tikslas** buvo: sukurti plačiajuostį rezistorinį jutiklį, pritaikytą H tipo bangolaidžiui, su plokščia jautrio dažnine charakteristika, kurio varža neviršytų 1 k $\Omega$ , o stovinčios bangos koeficientas būtų mažesnis nei 1,5. Eksperimentiškai ištirti tokio jutiklio charakteristikas ir sujungus jį su plačiajuoste ruporine antena išmatuoti mikrobangų galios tankį (elektrinio lauko stiprį) atviroje erdvėje atliekant internetinių maršrutizatorių elektromagnetinio atsparumo tyrimus.

#### **Darbo uždutys:**

- Sumodeliuoti baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu rezistorinį jutiklį, pritaikytą WR90, WRD250 ir WRD840 bangolaidžiams bei surasti optimalius tokių jutiklių parametrus: matmenis, savitąją varžą.
- Praktiškai realizuoti rezistorinius jutiklius su optimaliais parametrais ir eksperimentiškai išmatuoti tokių jutiklių charakteristikas bei stovinčios bangos koeficientą nuo jų.
- Pademonstruoti praktines rezistorinių jutiklių taikymo galimybes elektromagnetinio atsparumo tyrimuose.



### **Ginamieji teiginiai:**

- Santykinis vidutinis elektrinis laukas rezistorinio jutiklio jautriajame elemente, patalpintame H tipo bangolaidyje, priklauso nuo jo skersinių matmenų ir savitosios varžos, todėl, keičiant šiuos parametrus, galima pasiekti, kad santykinio vidutinio elektrinio lauko jame dažninė priklausomybė kompensuotų elektrinio lauko pokytį, atsirandantį dėl elektromagnetinės bangos dispersijos bangolaidyje.
- Plačiajuostis rezistorinis jutiklis, kurio jautrusis elementas yra pagamintas iš  $10 \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos n-Si, o matmenys  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , matuoja didelės galios mikrobangų impulsus 2,6 – 7,8 GHz (bangolaidis WRD250) dažnių ruože su  $\pm 25\%$  dažninės charakteristikos netolygumu.
- Sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos sistemos, skirtos elektriniam laukui laisvoje erdvėje matuoti, jautris nepriklauso nuo dažnio, jei parenkant rezistorinio jutiklio jautriojo elemento parametrus atsižvelgiama į ruporinės antenos stiprinimo koeficiento priklausomybę nuo dažnio.
- 1 Gb/s spartos internetiniai maršrutizatoriai yra jautriausi aukštesnio dažnio (5,7 GHz) didelės galios mikrobangų impulsams, kai tuo tarpu 100 Mb/s spartos maršrutizatoriai yra jautriausi 2,75 GHz dažnio mikrobangų spinduliuotei.

### **Publikacijų sąrašas disertacijos tema ISI sąrašo leidiniuose:**

- Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, and M. Dagys, "Wide band waveguide sensor for microwave pulse measurement" Lithuanian Journal of Physics 53.2 pp. 99-103, (2013).
- Ž. Kancleris, and P. Ragulis. "Interaction of semiconductor sample with TE10 mode in double ridged waveguide." Lithuanian Journal of Physics 52.1 pp. 1-9, (2012).

- M. Dagys, Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, and V. Tamošiūnas, "Investigation of susceptibility of routers to high power microwave pulse radiation" in Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference, Vol. 1 pp. 126-128 (2010).
- P. Ragulis, V. Tamošiūnas, Ž. Kancleris, R. Simniškis, and M. Tamošiūnienė, "Optimisation of resistive sensor for ridge waveguide," in Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference, Vol. 2 pp. 714-717 (2010).
- Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Dagys, V. Tamošiūnas, and P. Ragulis, "Experimental Investigation of High Pulse Power Microwave Resistive Sensor with Flat Frequency Response," ACTA PHYSICA POLONICA A, vol. 115 pp. 1122-1124, 2009.

**Publikacijų sąrašas disertacijos tema kituose recenzuojamuose leidiniuose:**

- Ž. Kancleris, R. Simniškis, P. Ragulis, M. Dagys, „Investigation of susceptibility of network switches and media converters to high power microwave pulse radiation“, NATO RTO SCI-232; Norfolk, USA, May 10-11, 2011.

**Pranešimai mokslinėse konferencijose:**

- Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, M. Dagys „Susceptibility of computer network components to high power microwaves“, EUROEM 2012, 2-6 July 2012, Toulouse, France.
- Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, M. Dagys „Resistive sensor for high power microwave pulse measurement in double ridged waveguide“, EUROEM 2012, 2-6 July 2012, Toulouse, France.

- P. Ragulis, Ž. Kancleris, G. Šlekas, R. Simniškis, M. Dagys, „Skersai bangolaidžio įtvertas rezistorinis jutiklis H tipo bangolaidžiui“, 39-oji LNFK, 2011 spalio 6-8 d., Vilnius.
- M. Dagys, Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, „Resistive sensor for high power microwave pulse measurement“, ICEAA'11; Torino, Italy, September 12-16, 2011.
- P. Ragulis, Ž. Kancleris, R. Simniškis, „Impact of high power microwave radiaradiation on functionality of switches and media converters“, Electronics'2011, Kaunas and Vilnius, May 17-18.
- M. Dagys, Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, V. Tamošiūnas, „Investigation of susceptibility of routers to high power microwave pulse radiation“, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference.
- P. Ragulis, V. Tamošiūnas, Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Tamošiūnienė, „Optimisation of resistive sensor for ridge waveguide“, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference.
- P. Ragulis, V. Tamošiūnas, Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Tamošiūnienė, „Optimisation of Resistive Sensors for H Type Microwave Waveguides“, E2010 14th International Conference On Electronics.
- V. Tamošiūnas, Ž. Kancleris, R. Simniškis, P. Ragulis, M. Tamošiūnienė, „Rezistorinių mikrobangų jutiklių optimizavimas H tipo bangolaidžiams“ („Optimisation of resistive sensors for H type microwave waveguides“), 38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Vilnius.

### **Moksliniai projektai**

Šis darbas buvo šių tarptautinių ir nacionalinių projektų sudedamoji dalis:

- Europos komisijos laisvės saugumo ir teisingumo generalinio direktorato inicijuotos ypatingos programos „Terorizmo ir kitų su saugumu susijusių pavojų prevencija, pasirengimas ir padarinių valdymas“ projektas „Didelės galios elektros tinklo valdymo centro tyčinio sutrikdymo radijo dažnio signalais rizikos įvertinimas ir sumažinimas“, 2008-2010.
- Tyrimų ir technologijų organizacijos prie NATO Sistemų koncepcijos ir integracijos komiteto inicijuotas projektas SCI-198/RTG „Karinių ryšio tinklų apsaugojimo nuo didelės galios mikrobangų atakų“, 2008-2011.
- Tyrimų ir technologijų organizacijos prie NATO Sistemų koncepcijos ir integracijos komiteto inicijuotas projektas SCI-250/RTG „Radijo dažnio kryptingos energijos ginklų panaudojimas taktiniame scenarijuje“, 2012-2014.
- Lietuvos mokslo tarybos mokslinių grupių projektas „Rezistorinis jutiklis didelės galios mikrobangų impulsams matuoti H tipo bangolaidyje“, 2011-2012.
- Lietuvos mokslo tarybos mokslininkų grupių technologinės plėtros projektas „Mikrobanginių trikdžių aptikimo sistema“, 2012-2014.
- Septintosios bendrosios programos FP7 – SEC–2011 projektas „Protection of Critical Infrastructures against High Power Microwave Threats“, 2012-2015.

### **Autoriaus indėlis**

Disertacijos autorius atliko rezistorinių jutiklių pritaikytų H tipo bangolaidžiams modeliavimus baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu, realizavo jutiklius su geriausiomis dažninėmis charakteristikomis, atliko jų eksperimentinius tyrimus ir pademonstravo rezistorinių jutiklių taikymą elektroninių prietaisų elektromagnetinio pažeidžiamumo tyrimuose. Autorius prisidėjo rengiant mokslines publikacijas ir konferencijų pranešimus disertacijos tema.

## **2 Literatūros apžvalga**

Šiais laikais sparčiai auga elektroninių prietaisų naudojimas, jie tampa neatsiejama mūsų gyvenimo dalimi. Iš vienos pusės, dėl sparčios puslaidininkinių technologijų pažangos šiuolaikinių elektroninių prietaisų matmenys mažėja, kas savo ruožtu lemia, kad tokie prietaisai gali būti labiau veikiami išorinio mikrobangų spinduliavimo. Mikrobangų spinduliuotės paveikti prietaisai gali laikinai nebeatlikti savo funkcijų, ar tiesiog nepataisomai sugesti. Iš kitos pusės, didelė mokslo pažanga lėmė tai, jog kuriami vis galingesni ir lengviau transportuojami didelės galios mikrobangų generatoriai, dėl ko didėja tikimybė, kad tokie prietaisai gali būti panaudoti tikslingoms atakoms prieš elektroninius įrenginius. Dėl visų šių priežasčių išauga didelės galios mikrobangų jutiklių, kurie gali būti naudojami tiek tokių atakų aptikimui, tiek elektromagnetinio pažeidžiamumo tyrimuose, svarba. Tokie jutikliai turi pasižymėti plačiu dažnių diapazonu, būti atsparūs elektromagnetiniam spinduliavimui, bei tiksliai matuoti mikrobangų impulsų galią.

### **2.1 Mikrobangų galios matavimas**

Šiame poskyryje trumpai apžvelgsime prietaisus naudojamus mikrobangų impulsams matuoti, pateiksime jų veikimo principą, privalumus ir trūkumus, daugiau dėmesio skirdami naujausiems moksliniams rezultatams ir galimam tokių prietaisų taikymui DGM impulsų matavimams.

Poskyris suskirstytas į dvi dalis. Pirmojoje dalyje bus aprašyti prietaisai skirti matuoti vidutinei mikrobangų galiai, o antrojoje dalyje – prietaisai galintys išmatuoti momentinę mikrobangų impulsų galią.

#### **2.1.1 Vidutinės galios matuokliai**

Tiek pramonėje, tiek mokslinėse laboratorijose labiausiai paplitę yra vidutinės mikrobangų galios matavimo prietaisai. Tokie prietaisai mikrobangų galios matavimams yra naudojami ne vieną dešimtmetį. Šiame poskyryje bus

apžvelgti prietaisai dažniausiai naudojami vidutinei galiai matuoti: termistoriniai ir termoporiniai jutikliai.

### 2.1.1.1 Termistoriniai jutikliai

Terminas termistorius yra trijų angliškų žodžių „thermally sensitive resistor“ trumpinys. Kas išvertus iš anglų kalbos reikštų: temperatūrai jautri varža. Termistoriai pagal naudotas jų gamybai medžiagas yra skirstomi į dvi grupes: metalų oksidų ir monokristalinių puslaidininkių. Šios dvi termistorių grupės tarpusavyje nekonkuruoja, nes jos skirtos skirtingiems temperatūrų ruožams. Termistoriai dažniausiai yra daromi iš tokių metalų oksidų junginių:  $Mn_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  ir  $U_2O_3$ , o monokristaliniai termistoriai gaminami iš legiruotų priemaišomis ( $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) Ge ar Si puslaidininkių [1].

Termistorių jautris temperatūrai labiausiai priklauso nuo puslaidininkio draustinių energijų tarpo  $E_g$ . Jutikliams veikiantiems aukštesnėse temperatūrose naudojami didesnio draustinių energijų tarpo puslaidininkiai. Germanio termistoriai naudojami žemose temperatūrose nuo 1 K iki 100 K, silicio – žemesnėse nei kambario temperatūrose  $T < 250 \text{ K}$ , o metalo-oksido termistoriai – temperatūrose nuo 200 K iki 700 K.

Kadangi termistorius yra varža, tai jo savitasis laidumas gali būti užrašytas:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1)$$

čia  $\rho$  pažymėta savitoji varža,  $q$  – elektrono krūvis,  $n$  ir  $p$  – elektronų ir skylių koncentracija, o  $\mu_n$  ir  $\mu_p$  yra jų judriai.

Beveik visi termistoriai naudojami tame temperatūrų diapazone, kur jonizuotų priemaišų koncentracija stipriai priklauso nuo temperatūros:

$$\text{Priemaišų koncentracija} \propto \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (2)$$

kur  $E_a$  yra aktyvacijos energija,  $k$  – Bolcmano konstanta, o  $T$  yra absoliutinė temperatūra. Iš (2) matyti, kad, augant termistoriaus temperatūrai, didėja priemaišų koncentracija, dėl ko jo varža sumažėja. Tokių termistorių

temperatūrinis varžos koeficientas yra neigiamas. Termistoriaus varžos priklausomybę nuo temperatūros neblogai aprašo empirinė formulė:

$$R = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (3)$$

kur  $R_0$  – yra varža kambario temperatūroje  $T_0$ .  $B$  – charakteringoji temperatūra, kuri yra apie 2000 K – 5000 K. Iš (3) nesunkiai gaunama temperatūrinio varžos koeficiento  $\alpha$  išraiška:

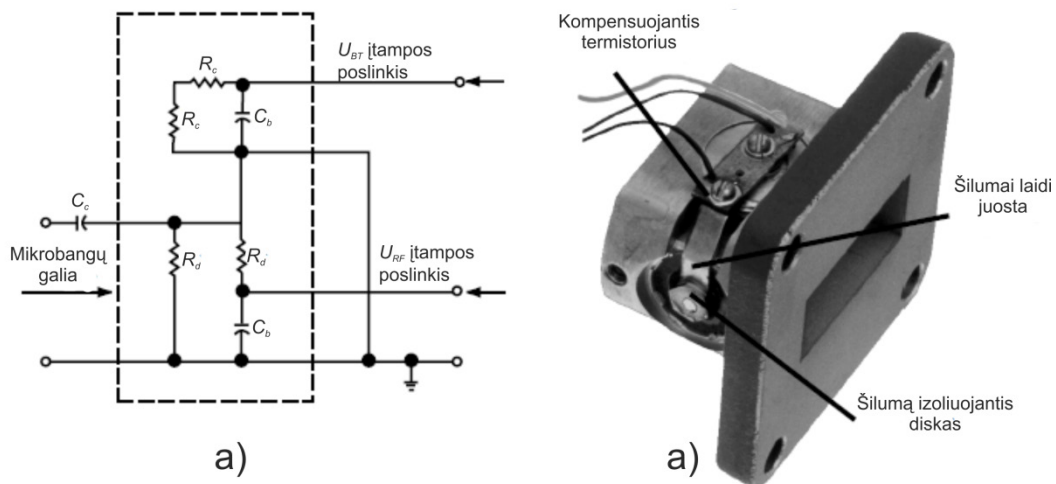
$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{-B}{T^2}. \quad (4)$$

Neigiamas  $\alpha$  parodo, jog termistoriaus varža mažėja didėjant temperatūrai. Esant nedideliems temperatūroms pokyčiams, iš (3) ir (4) galime užrašyti tokią priklausomybę aprašančią termistoriaus varžos pokytį:

$$\Delta R = R \alpha \Delta T \quad (5)$$

Dažniausiai temperatūrinis varžos koeficientas yra  $\alpha \approx -0,05 \text{ K}^{-1}$ , o termistoriaus varža siekia nuo 1 k $\Omega$  iki 10 M $\Omega$ .

Matuojant mikrobangų galią su termistoriais papildomai yra naudojami bolometriniai elementai, verčiantys mikrobangų galią į šilumą, dėl ko keičiasi termistoriaus temperatūra. Termistorinis jutiklis mikrobangų galiai matuoti dažniausiai yra mažas metalo oksido rutuliukas, kurio skersmuo yra apie 0,4 mm. Kadangi termistoriaus varžos priklausomybė nuo mikrobangų galios yra labai netiesinė, todėl yra naudojamas balansuotas tiltelis (1a pav.), kurio



1 pav. Termistorinio jutiklio prijungimo schema (a) ir bangolaidinio termistoriaus vaizdas (b), adaptuota iš [2].

pagalba yra palaikoma pastovi termistoriaus varža. Termistorių veikiant mikrobangų elektriniam laukui, termistoriaus varža mažėja, todėl įtampa, krentanti ant termistorinio elemento  $U_{RF}$  (1a pav.), sumažinama tiek, kad termistoriaus varža išliktų tokia pati. Kadangi šis įtampos sumažinimas yra proporcingas mikrobangų galiai, kurią absorbavo jutiklis, iš jo ir yra nustatoma galia.

Termistoriniai elementai naudojami mikrobangų galiai matuoti yra montuojami į koaksialinę liniją arba į bangolaidį (1b pav.). Pagrindinis tokio montavimo reikalavimas yra toks, kad įmontuotas termistorius absorbuotų kiek įmanomą didesnę kiekį į jį krintančios mikrobangų galios. Taip pat jutiklio varža turi gerai sutapti su perdavimo linijos bangine varža visame dažnių ruože. Nereikia pamiršti ir fakto, kad jutiklis turėtų mažus ominių ir dielektrinius nuostolius. Naujausi termistoriniai jutikliai turi antrą porą termistorių, kurie naudojami kompensuoti aplinkos temperatūros pokyčius [2]. Šių kompensuojančių termistorių temperatūrinė varžos priklausomybė turi būti identiška mikrobangas detektuojantiems termistoriams. Kompensuojantys termistoriai yra elektriškai izoliuoti nuo detektuojančių termistorių. Visi keturi termistoriai yra montuojami ant to pačio temperatūrai laidaus elemento, kuris yra pakankamai didelis, norint išvengti staigių temperatūros svyravimų. Todėl visi šiuolaikiniai termistoriniai galios matuokliai yra sudaryti iš keturių termistorių (1a pav.). Beje, reikia paminėti, jog termistoriniam jutikliui reikalinga apie 30 mW maitinimo galia, kuri yra naudojama pakelti termistorinio jutiklio temperatūrą iki darbinės temperatūros, kuri dažnai siekia net 430 K [3].

Kadangi termistoriniai jutikliai mikrobangų galią nustato matuodami varžos pokytį, atsiradusį dėl temperatūros pokyčio, jų atsako trukmė svyruoja nuo 9 ms iki 40 ms [3], tačiau ji gali išaugti iki kelių sekundžių [4] ar net kelių valandų metrologiniuose matavimuose [5]. Tai yra pagrindinė priežastis ribojanti termistorinių jutiklių taikymą greitiems impulsams ir jų formai matuoti. Bandoma sukonstruoti jutiklius, kurių atsako trukmė būtų kelių  $\mu$ s eilės [6]. Tokie jutikliai daromi ant didelės savitosios varžos ( $\rho = 1000 \Omega\cdot\text{cm}$ )



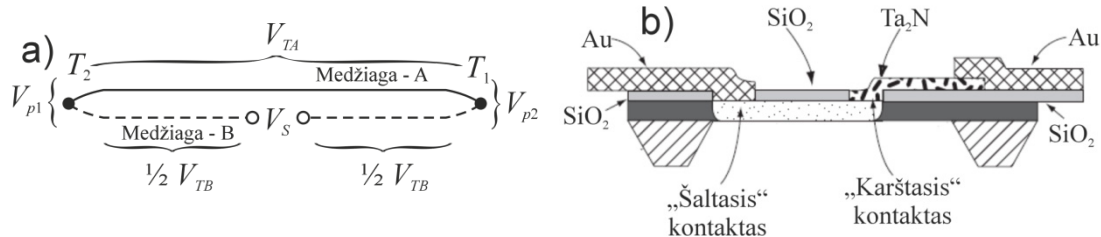
silicio padėklų, kurių storis  $h = 380 \mu\text{m}$ . Geras silicio šiluminis laidumas užtikrina trumpas atsako trukmes. Realizuojant spartųjį termistorių, ant silicio padėklo buvo suformuota įžeminto koplano bangolaidžio struktūra [7], ant kurios, savo ruožtu, buvo užnešti du lygiagretūs rezistoriai iš NbN, kurių bendra varža kambario temperatūroje siekė  $70 \Omega$ . SBK nuo tokio jutiklio neviršijo 1,3, o dažnių ruože nuo 500 MHz iki 1GHz jautris kito nuo  $4,4 \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$  iki  $6,1 \text{ V}\cdot\text{W}^{-1}$ . Nors darbo autoriams [7] ir pavyko pagerinti sukurtojo jutiklio atsako trukmę ir jautrį, bet maksimali mikrobangų galia matuojama su šiuo jutikliu nesiekia 1W.

Reikia paminėti, kad jau keletą metų rinkai pateikiami termistoriniai galios matuokliai nebėra tobulinami. Tai gali būti siejama su termoporinių galios matuoklių sėkme [3], tačiau termistoriniai galios matuokliai yra sėkmingai įsitvirtinę metrologinėse laboratorijose, kaip etaloniniai galios matuokliai [5],[8]. Siekiant gauti didesnę matavimo tikslumą, kalorimetras, kuriame būna talpinamas jutiklis, yra daromas pakankamai didelis, todėl reikia nemažai laiko, kad jo temperatūra nusistovėtų. Iš vienos pusės, stengiamasi sukurti naujus matavimo metodus leidžiančius sumažinti šį laiką [8], o iš kitos – stengiamasi sumažinti kalorimetro masę neprarandant matavimo tikslumo [5]. Tačiau termistoriniams jutikliams ir šioje srityje kyla grėsmė prarasti lyderio pozicijas, nes jau yra darbų [9] lyginančių termistorinius ir termoporinius jutiklius metrologiniuose matavimuose, kuriuose geresnius rezultatus parodo termoporiniai galios matuokliai.

### **2.1.1.2 Termoporos**

Termopora – tai dažniausiai grandinė ar kilpa, padaryta iš dviejų skirtingų medžiagų, kurių vieno sąlyčio taško temperatūra yra pakeliama. Jų veikimas yra paremtas šiluminės ir elektros energijų sąveika, trumpiau tariant, tai termoelektra. Termoporų veikimą galima paaiškinti trimis paprastais Zėbeko (Seebeck), Peltjė (Peltier) ir Tomsono (Thomson) efektais (2a pav.) [1].

Iš dviejų skirtingų metalų, ar puslaidininkių padarius uždara grandinę joje srovė netekės jei abiejų sąlyčio taškų temperatūra bus vienoda. Tačiau, jei



2 pav. Termoporinis jutiklis (a), adaptuota iš [1], ir jo realizacija (b), adaptuota iš [2].

kontaktų temperatūros skirsis, dėl kontaktinio potencialų skirtumo priklausomybės nuo temperatūros, gandinėje pradės tekėti srovė. Šis reiškinys vadinamas termoelektriniu arba Zėbeko reiškiniu.

Jeigu per dviejų skirtingų metalų kontaktą teka elektros srovė, tai jame išsiskiria arba yra absorbuojama šiluma, vadinama Peltjė šiluma, o šis reiškinys – Peltjė reiškinys. Srovei tekant kontaktu krūvininkai pereina iš vienos medžiagos į kitą. Dėl skirtingų išlaisvinimo darbų krūvininkų energija skirtinguose medžiagose yra skirtinga, todėl, patekę iš vienos medžiagos į kitą, jie turi didesnę arba mažesnę energiją, nei tos medžiagos elektronai. Kai turima energija yra didesnė, tai šiluma yra išskiriama, o kai energija yra mažesnė – šiluma yra absorbuojama. Šilumos absorbcija rodo, kad sąlytyje atsiranda elektrovaros jėga.

Jei laidininke yra sudarytas temperatūros gradientas, tai elektronai dreifuoja iš šiltesnio laidininko galo link šaltesnio. Šis reiškinys vadinamas Tomsono efektu. Šiltesniame gale elektronų kinetinė energija didesnė, nei šaltesniame, todėl judėdami į šaltesnę sritį jie atneša papildomą energiją, kuri atiduodama gardelei.

Iš 2 pav. matyti, jog Zėbeko įtampa yra lygi:

$$V_s = (S_A - S_B)(T_1 - T_2), \quad (6)$$

čia  $S_A$  ir  $S_B$  yra medžiagų, A ir B Zėbeko koeficientai, o  $T_1$  ir  $T_2$  pažymėtos termoporos kontaktų temperatūros.

Termoporos mikrobangų galios matavimuose naudojamos nuo 1974 metų, kuomet pirmą kartą buvo pagamintos plonasluoksnės puslaidininkinės termoporos [10]. Kadangi termoporos yra jutikliai, matuojantys temperatūrų skirtumą, jie skirti vidutinei mikrobangų galiai registruoti. Reikia pažymėti, jog

termoporos pasižymi didesniu jautriu nei termistoriai, o jų signalas yra proporcingas mikrobangų galiai. Dažniausiai mikrobangų matavimams naudojamos kelios termoporos, kurios sujungtos taip, kad kiekvienos poros vienas iš sąlyčio taškų yra veikiamas mikrobangų elektrinio lauko, o kitas ne. Tokiu būdu termoporų atsakas susideda ir yra gaunamas didesnis jautris.

Pirmosios plonasluoksnės puslaidininkinės termoporos [10] pjūvis, pagamintos 1974 metais, parodytas 2b pav. Termoporos šaltasis kontaktas susidaro tarp aukso ir difuzinio sluoksnio, o pats difuzinis silicio sluoksnis sudaro vieną iš termoporos pečių. Difuzinio sluoksnio gale yra formuojamas tantalo nitrido sluoksnis, o kontaktas tarp šių dviejų sluoksnių yra „karštasis“ kontaktas. Abiejuose struktūros galuose yra užnešami aukso kontaktai, kurie naudojami ne tik termoporos prijungimui, bet ir šilumos nuvedimui nuo lusto. Tantalo nitridui verčiant mikrobangų energiją į šilumą, lusto centras, kuris yra labai plonas, įkaista daugiau nei lusto galai, nes dėl lusto formos srovė, o tuo pačiu ir šiluma, koncentruojasi jo centre, o galuose esantys kontaktai yra pakankamai stori ir efektyviai nuveda šilumą. Dėl to periferiniai kontaktai tampa „šaltaisiais“. Labai svarbus yra centrinės dalies storis, nes termoporos atsakas yra proporcingas temperatūrų skirtumui tarp „karšto“ ir „šalto“ kontaktų. Kadangi silicis yra labai geras šilumos laidininkas, tai centrinė dalis turi būti labai plona ir dažnai ji būna kelių mikrometrų eilės. Jei jutiklis yra sudarytas iš vienos tokios termoporos, jo jautris siekia 0,1 V/W. Sudarant jutiklį iš dviejų tokių termoporų jautris padidėja iki 0,16 V/W.

Nors nuo pirmosios plonasluoksnės termoporos panaudojimo mikrobangų galios matavimuose praėjo beveik 40 metų, tačiau vis dar yra kuriami nauji termoporiniai jutikliai, kurie pasižymi didesniu jautrumu ir platesniu matuojamu galios ruožu [11, 12]. Siekiant pasiekti didesnę jautrį buvo tyrinėjami įvairūs III-V grupių puslaidininkiai su įvairiomis priemaišų koncentracijomis [11]. Nors buvo nustatyta, kad geriausiomis savybėmis pasižymi n-tipo trinariai junginiai iš InGaAs, kai priemaišų koncentracija  $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , tačiau, atsižvelgus į tai, kad panašias savybes demonstruoja ir n-GaAs sluoksniai, pastarieji buvo pasirinkti eksperimentinių termoporinių

jutiklių gamybai dėl mažesnių gamybos kaštų lyginant su InGaAs. Tokių termoporinių jutiklių jautris yra 0,85 V/W, o mažiausiais matuojamas signalas siekia -33 dBm (0,5  $\mu$ W). Didžiausias matuojamas signalas nedaug skiriasi nuo signalo matuojamo su termistoriais ir yra kelių šimtų mW eilės.

Termoporos iš AlGaAs/GaAs, pagamintos ant to paties padėklo kaip ir dipolinė antena [12, 13], buvo sėkmingai panaudotos mikrobangų galios tankio (elektrinio lauko stiprio) matavimams atviroje erdvėje. Jutikliui nereikia išorinio maitinimo, jis naudoja matuojamų mikrobangų signalo energiją. Pagrindinis tokio jutiklio ypatumas yra tas, kad šiuo atveju termoporos varža derinama ne prie koaksialinės ar bangolaidinės linijos banginės varžos [14], bet prie priimančios dipolinės antenos varžos [13]. Jutikliai buvo daromi ant GaAs padėklo suformavus AlGaAs/GaAs heterosandūrinę membraną, ant kurios formuojamos GaAs/Cr termoporos. Tokių jutiklių jautris siekė net 12 V/W, tačiau maksimali galią absorbuojama termoporoje neturi viršyti 55 mW. Esant didesnei galiai prasideda termoporoje esančio NiCr rezistoriaus degradacija. NiCr rezistoriaus forma ir padėtis taip pat turi nemažą įtaką jutiklio jautriui bei maksimaliam matuojamam signalui [13]. Daugumos termoporų šiluminiai rezistoriai yra stačiakampio formos su aštriais kampais, todėl šiuose kampuose susidaro karšti taškai, ir šilumos pasiskirstymas rezistoriuje pasidaro nevienodas. Dėl to ne visos termoporos fiksuoja vienodą temperatūrą. Be to dėl šių karštųjų taškų termoporų gedimai pasireiškia esant mažesnėms mikrobangų galioms [13].

Tobulėjant integrinių grandynų ir mikromechaninių sistemų technologijoms, bandoma pagaminti naujos rūšies mikrobangų jutiklius, matuojančius mikrobangas dviem principais [15, 16]: mažų galingumų matavimui panaudojamos termoporos, o esant didesniems galingumas mikrobangų galia matuojama su kintamos kondensatoriaus talpos mikrobangų jutikliais [17, 18]. Kintamos talpos kondensatoriaus panaudojimą mikrobangų impulsų detekcijai pirmą kartą aprašė Seppa 2001 metais [19]. Tokių detektorių pagrindas – judanti membrana, esanti tarp dviejų elektrodų, į kuriuos paduodamas matuojamas mikrobangų signalas. Mikrobangos

elektrinis laukas keičia membranos įtempimą, dėl ko pasikeičia kondensatoriaus talpa ir, tokiu būdu, yra detektuojamas mikrobangų signalas. Šiuose jutikliuose membrana ne tik matuoja mikrobangas, tačiau ir apsaugo termoporas nuo per didelės mikrobangų galios sukeliama perkaitimo. Mikrobangų galiai pasiekus 80 mW, membranos poslinkis tampa juntamas [15, 16], o galiai pasiekus 100-200 mW, mikrobangų matavimai vyksta su kintamos talpos mikrobangų jutikliu. Toks jutiklis gali detektuoti mikrobangas iki ~ 500 mW, o ribinė galia siekia ~ 700 mW.

### 2.1.2 Impulsinės galios matuokliai

Stačiakampių pasikartojančių mikrobangų impulsų impulsinę galią galima išmatuoti naudojant vidutinės galios matuoklius. Tam tereikia žinoti jų trukmę  $\tau$  ir pasikartojimo periodą  $T$ :

$$P = \frac{T}{\tau} P_v, \quad (7)$$

kur  $P$  yra impulsinė o  $P_v$  – vidutinė galia. Tačiau tokia metodika gali būti naudojama tik stačiakampiems ir pakankamai dažnai pasikartojantiems impulsams matuoti. Nestačiakampių ir retai pasikartojančių mikrobangų impulsų galiai nustatyti tenka naudoti impulsinius galios matuoklius. Dažniausiai šiam tikslui yra naudojami mikrobangų diodai. Tačiau pastaruoju metu į šią nišą bando įsiskverbti ir elektrooptiniai jutikliai. Šiame poskyryje apžvelgsime trijų rūšių impulsinės galios matuoklius: mikrobangų diodus, elektrooptinius ir rezistorinius jutiklius.

#### 2.1.2.1 Mikrobangų diodai

Puslaidininkiniai diodai yra sudaryti iš p ir n-tipo puslaidininkių sandūros. Žemuose dažniuose yra naudojami p-n silicio sandūra. Aukštuose dažniuose tokie diodai yra netinkami naudojimui dėl didelės p-n sandūros talpos ir dėl mažo krūvininkų judrio sandūroje. Todėl dažniausiai mikrobangų diodai yra daromi su metalo-puslaidininkio sandūra. Metalo – puslaidininkio sandūroje susidaro taip vadinamas Šotkio (Schottky) barjeras. Diodai su metalo

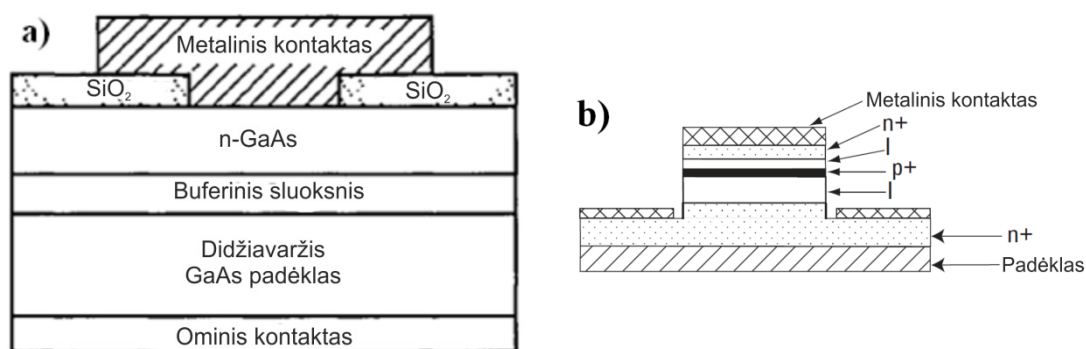
– puslaidininkio sandūra yra prietaisai, kurių laidumą lemia pagrindiniai krūvininkai, o nepagrindinių krūvininkų kaupimosi sandūroje efektai nepasireiškia. Tokie diodai yra vadinami tiesiog Šotkio diodais, jie pasižymi geriausiomis detektavimo savybėmis ir dažniausiai yra naudojami mikrobangų detekcijai. Šotkio diodai dažniausiai daromi iš n-tipo Si ar GaAs ir metalo sandūros kaip parodyta 3a pav. [20]. Pirmą kartą Šotkio diodai mikrobangų galiai matuoti dažniuose iki 18 GHz buvo panaudoti 1974 metais [2]. Pagrindiniai mikrobangų diodų parametrai yra jautris ir atkirtos dažnis. Pastarasis užrašomas taip:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (8)$$

čia  $R$  – diodo varža,  $C$  – sandūros talpa.

Mikrobangų diodai pasižymi ilgalaikiu stabilumu, lengvai integruojami į matavimo sistemas, turi platų dinaminį diapazoną ir gali matuoti mikrobangų impulsus iki kelių šimtu GHz. Tačiau norint su diodu išmatuoti didelės galios mikrobangų impulsus reikia stipriai slopinti signalą, dėl ko yra prarandamas matavimo tikslumas. Matuojant didesnės galios mikrobangų impulsus, diodų voltatinė charakteristika tampa netiesinė, o tai gali įtakoti matavimo tikslumą matuojant moduluotus ar iškraipytus signalus.

Mikrobangų detekcijai gali būti naudojami ne tik Šotkio diodai bet ir planariniai legiruoto barjero (PDB Planar Doped Barrier) diodai [2]. Tipinė PDB diodo struktūrinė schema pavaizduota 3b pav. Matome, kad toks diodas yra sudarytas iš n-i-p-i-n puslaidininkinių sluoksnių, t.y. tarp legiruotų  $n^+$  ir  $p^+$



3 pav. Mikrobangų diodų scheminis vaizdas: a) Šotkio diodas, b) PDB diodas, adaptuota iš [2].

sluoksnių yra įterpti savojo laidumo izoliuojantys sluoksniai. Atitinkamai parenkant šių sluoksnių storius ir legiravimo laipsnius galima pasiekti, jog sandūros talpa  $C$  būtų labai maža ( $\sim 20$  fF) ir beveik nepriklausytų nuo pridėtos įtampos. Todėl tokių diodų jautris žymiai mažiau priklauso nuo elektromagnetinių bangų dažnio bei aplinkos temperatūros [21]. Taip pat verta paminėti, kad padidėja jų jautris.

Norint diodą pritaikyti mikrobangų impulsų matavimams, reikią jį patalpinti koaksialinėje ar bangolaidinėje perdavimo linijoje. Silicio Šotkio diodai patalpinti Ka dažnių ruožo bangolaidžio plačiosios sienelės centre [22] pasižymi neblogu jautriu, apie  $1,2 \text{ mV}/\mu\text{W}$ , o atsako laikas yra mažesnis nei 220 ps. Eksperimentiškai išmatuotas dažnių ruožas siekia nuo 35 GHz iki 39 GHz.

Planarinius GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  heterosandūrinius diodus [23, 24] galima panaudoti ir elektromagnetinių bangų detekcijai mikrobangų ir tolimoje infraraudonojoje srityse. Tokių diodų jautris Ka (26 – 38 GHz) dažnių ruože yra net  $1000 \text{ V/W}$  [23], o W (75 – 110 GHz) dažnių ruože jautris yra apie  $100 \text{ V/W}$  [24].

Kaip jau buvo anksčiau minėta, norint panaudoti Šotkio diodą DGM detektavimui reikia signalą papildomai nuslopinti. Tačiau Šotkio diodai gali būti sėkmingai panaudoti ir DGM impulsų matavimui [25]. Iš [26] darbo rezultatų matyti, kad, naudojant mikrobangų diodus prijungtus prie H tipo ruporinės antenos, galima išmatuoti DGM impulsus, kurių trukmė apie 100 ns, dažnis apie 6 GHz, o galia ties priimančia antena, kai ji nuo spinduliuojančios antenos yra nutolusi 7 metrus, siekia 1 kW.

Panaudojant diodų masyvus galima gauti DGM detektorius, kurio darbinis diapazonas yra 60 dB ar daugiau, o atsako trukmė apie 10 ns [27]. Tokia diodų sistema susideda iš kelių diodų, kurių kiekvienas yra prijungtas prie atskiro stiprintuvo, o visų diodų signalai yra sumuojami. Tokių būdu, pavyksta praplėsti diodų veikimo diapazoną nuo 30 iki 70 dB. Žinoma vis tiek išlieka problema su didelės galios impulsų matavimu, todėl norint juos išmatuoti prieš tokią sistemą reikia įdėti 40 – 60 dB slopintuvą.

Be anksčiau minėtų Šotkio diodų iš Si ir GaAs pastaruoju metu atliekami tyrimai su diodais iš GaN pagamintų ant SiC padėklų [28]. Šie GaN Šotkio diodai pasižymi maža varža  $R = 8,2 \Omega$ . GaN, GaAs ir Si Šotkio diodai kartu su rezonansinėmis antenomis gali būti naudojami elektromagnetinei spinduliuotei paversti į pastovios srovės šaltinį [29]. Kaip matyti iš dažnio ruožo, kuriame šie diodai veikia, juos plačiausiai tikimasi panaudoti bevieliose mobiliuose tinkluose darbui su nedidelio galingumo mikrobangų spinduliuote [30].

Kadangi diodiniai jutikliai yra jautrūs temperatūros svyravimams, norint išvengti matavimo rezultatų netikslumų, komerciniuose gaminiuose taip pat yra montuojami temperatūros jutikliai, kurie naudojami matavimų rezultatų korekcijai atsižvelgiant į aplinkos temperatūrą [3].

Apžvelgus visus rezultatus, galima teigti, kad mikrobangų diodai gali būti panaudoti mikrobangų galios matavimams dažnių ruože iki kelių šimtų GHz. Tokių diodų atsako trukmė gali siekti kelias ns, o mažiausias detektuojamas signalas – kelis  $\mu\text{W}$ . Tačiau platesnį ir paprastesnį jų taikymą DGM impulsams matuoti riboja maksimalus leistinas matuojamasis signalas, kuris yra 100 mW eilės. Todėl norint naudoti diodus DGM impulsams matuoti, tenka signalą nuslopinti iki priimtino prietaisui lygio.

### 2.1.2.2 Elektrooptiniai jutikliai

Elektrooptinis (EO) efektas buvo atrastas 1875 metais. Jį atrado airių mokslininkas John Kerr (1824-1907). Jis pastebėjo, jog permatoma izotropinė medžiaga patiria dvejetainį spindulių lūžį, kai ji yra patalpinta į elektrinį lauką  $E$ . Kristalas išoriniame lauke pasidaro anizotropinis, o jo pagrindinės optinės ašys sutampa su išorinio lauko kryptimi [31]. Skirtumą tarp lygiagretaus ir statmeno elektriniam laukui lūžio rodiklių  $n_{\perp}$  ir  $n_{\parallel}$  galime apskaičiuoti taip:

$$\Delta n = \lambda_0 K E^2; \quad (9)$$

čia  $K$  yra Kero konstanta.

Kaip matyti, Kero efektas yra proporcingas išorinio elektrinio lauko kvadratui, todėl jis dažnai dar yra vadinamas kvadratinio elektrooptiniu efektu.



Vokiečių fizikas Friedrich Carl Alwin Pockels (1865-1913 m.) po intensyvių tyrinėjimų 1893 metais atrado tiesinį EO efektą. Šiuo atveju išorinio elektrinio lauko indukuotas dvejetainis spindulių lūžis yra tiesiškai proporcingas elektrinio lauko stipriui [31]. Šį efektą panagrinėsime detaliau.

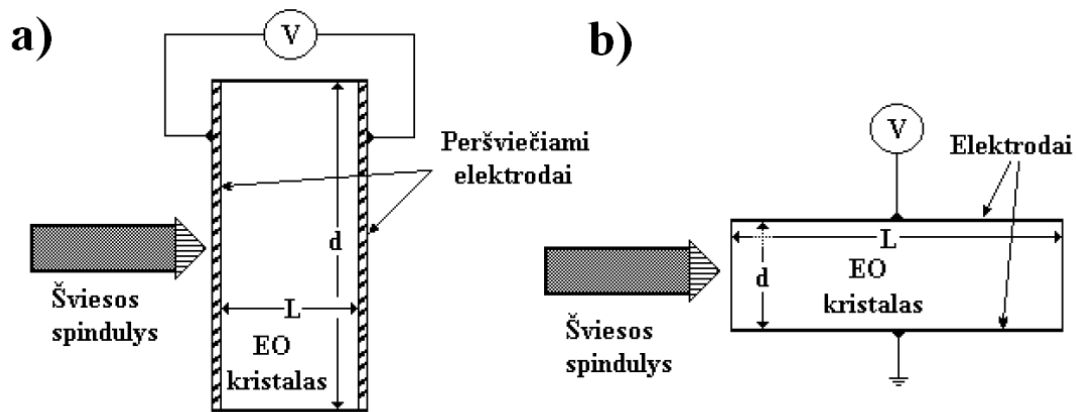
Tiesinis elektrooptinis efektas (Pockelso efektas) – tai medžiagos optinių savybių pokytis, prijungus lėtai, palyginus su optinės spinduliuotės dažniu, kintantį išorinį elektrinį lauką [32, 33]. Prijungtas elektrinis laukas lemia surišusių krūvių persiskirstymą ir šiek tiek deformuoja kristalinę gardelę. Bendru atveju šie pokyčiai gali būti neizotropiniai. Tiesinis EO efektas būdingas tik kristalams, kurie neturi inversijos simetrijos. Tai galima paaiškinti paprastu pavyzdžiu. Sakykime, kad prie kristalo, turinčio inversijos simetriją, yra pridėtas elektrinis laukas. Šis laukas sukelia kristalo lūžio rodiklio pokytį  $\Delta n_1 = sE$ , čia  $s$  yra konstanta, charakterizuojanti tiesinį EO efektą. Jei pakeisime elektrinio lauko kryptį, tuomet kristalo lūžio rodiklio pokytis  $\Delta n_2 = s(-E)$ , tačiau dėl inversijos simetrijos abi elektrinio lauko kryptys yra vienodos, todėl  $\Delta n_1 = \Delta n_2$ . Taip gali būti tik tuomet, kai  $s = -s$ , kas įmanoma, kai  $s = 0$ . Taigi, kristaluose su inversijos simetrija negali būti tiesinio elektrooptinio efekto.

Lūžio rodiklį EO kristale patogiu atvaizduoti lūžio rodiklio elipsoidu, kurio lygtis, kai nėra išorinio elektrinio lauko, yra tokia:

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1, \quad (10)$$

čia  $x$ ,  $y$  ir  $z$  yra taško, tenkinančio elipsoido lygtį, koordinatės, o  $n_0$  ir  $n_e$  yra lūžio rodiklio reikšmės išilgai ir skersai pagrindinės optinės ašies. Pridėto išorinio elektrinio lauko sukelti pokyčiai yra simetriniai, todėl tenzorius simetrija nėra iškreipta.

Elektrooptinio jutiklio konfigūracija lemia kuri iš šviesos bangos savybių: fazė, poliarizacija, amplitudė, dažnis ar sklidimo kryptis pasikeičia paveikus išoriniam elektriniam laukui.



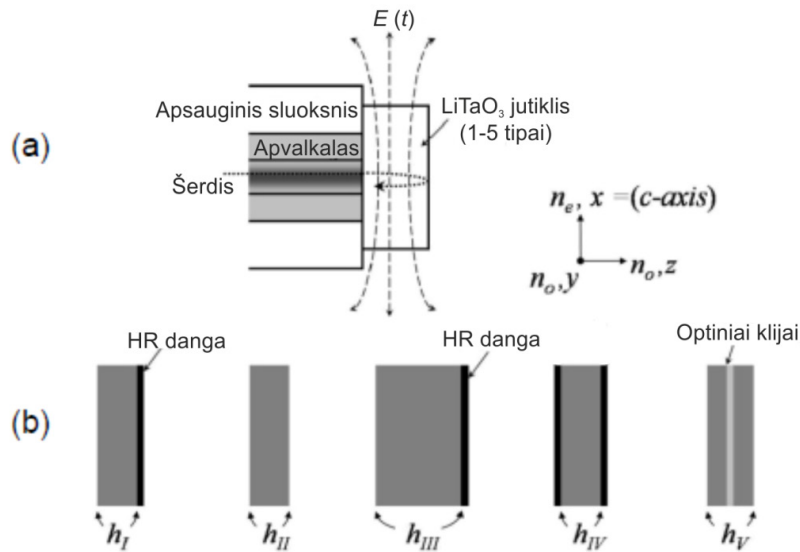
4 pav. Išilginė (a) ir skersinė (b) elektrooptinio efekto konfigūracijos, adaptuota iš [33].

Priklausomai nuo to, kokia kryptimi prijungiama moduluojanti įtampa šviesos sklidimo krypties atžvilgiu [32-34], EO jutikliai gali būti išilginės arba skersinės konfigūracijos (žr. 4 pav.).

Išilginėje konfigūracijoje įtampa yra prijungta lygiagrečiai bangos sklidimo kryptčiai (4a pav.). Tokiu atveju, elektrodai turi būti permatomi, kad šviesa galėtų per juos pereiti. Elektrinio lauko stipris kristale  $E = U/L$ ; čia  $U$  yra moduluojanti įtampa, o  $L$  atstumas tarp elektrodų. Indukuotas fazės pokytis yra proporcingas įtampai  $U$  ir bangos ilgiui  $\lambda$ , bet ne prietaiso matmenims. Taigi, norint pasiekti reikiamo dydžio efektą naudojant išilginius modulatorius, reikia didinti elektrinį lauką, o ne keisti prietaiso matmenis.

Skersinės konfigūracijos atveju įtampa yra prijungiama statmenai šviesos sklidimo kryptčiai (4b pav.). Šiuo atveju, norint padidinti elektrinį lauką  $E$ , galima sumažinti atstumą tarp elektrodų, o tuo pačiu – ir moduliacijai reikalingos įtampos dydį.

Elektrooptinius jutiklius, sumontuotų ant šviesolaidžio galo, galima suskirstyti į penkis tipus [35], parodytus 5 pav. Pirmasis tipas yra paprastas dvigubo šviesos praėjimo pro EO kristalą jutiklis [36]. Ant vienos kristalo plokštumos yra suformuojamas dielektrinis veidrodis nuo, kurio šviesa atsispindi ir grįžta atgal į šviesolaidį. Jei EO kristalo storis yra mažesnis nei 1 mm, kad šviesa be nuostolių sugrįžtų į šviesolaidį, papildomas fokusavimas nereikalingas. Kai EO kristalo storis yra mažesnis nei 0,1 mm, pakanka



5 pav. Elektrooptinio jutiklio sujungimas su šviesolaidžiu (a) ir populiariausi jutiklių tipai (b), adaptuota iš [35].

paprasciausiai gerai nupoliruoti šviesolaidžio galą. O EO kristalo storiui siekiant 1 cm, reikia naudoti papildomą fokusavimą pasitelkiant gradientinio lūžio rodiklio lęšius. Tokie jutikliai veikia fazinės moduliacijos principu, kurią nesunku paversti į amplitudinę moduliaciją pasinaudojant sukryžiuotais poliarizatoriais.

Antrasis jutiklių tipas nuo pirmojo skiriasi tuo, kad ant kristalo plokštumos nėra formuojamas dielektrinis veidrodis. Todėl šiuo atveju atspindžiai nuo abiejų kristalo paviršių yra panašaus intensyvumo, dėl ko stebima šių atsispindėjusių spindulių interferencija [37]. Tokiam elektrooptiniam jutikliui realizuoti nebereikia naudoti poliarizatorių.

Trečiojo tipo jutiklis yra pirmųjų dviejų tipų jutiklių mišinys. Nors jo veikimas, taip pat kaip ir antrojo tipo jutiklio, yra paremtas šviesos spindulių interferencija, tačiau šiuo atveju, ant vienos iš kristalo plokštumų yra suformuotas dielektrinis veidrodis [35].

Ketvirtojo tipo jutiklio veikimo principas remiasi rezonansiniu efektu. Yra nemažai darbų [38-40] aprašančių, kaip padidinti šviesos kelią EO kristale pasinaudojant šviesos atspindžiu nuo kristalo - oro sandūros. Tačiau šio tipo jutiklyje ant abiejų EO kristalo pusių yra suformuojami dielektriniai veidrodžiai, kurių atspindžio koeficientas yra didesni nei pralaidumo

koeficientas. Tokiu atveju šviesos optinis kelias jutiklyje išauga kelis kartus, o tuo pačiu i padidėja ir registruojamas spindulių fazės pokytis.

Penktojo tipo jutiklis yra sudarytas iš trijų sluoksnių [41, 42]. Pirmas ir trečias sluoksniai yra padaryti iš EO kristalo, o vidurinis jungiamasis sluoksnis iš medžiagos, kurios lūžio rodiklis artimas šviesolaidžio šerdies lūžio rodikliui. Taip sudaryti EO kristalai suformuoja savotišką Fabry-Pero rezonatorių. Tokia struktūra pasižymi statesniais interferenciniais pikais, dėl ko padidėja bendras jutiklio jautris.

Naudojant EO jutiklius galima išmatuoti mikrobangų elektrinio lauko stiprį [43], ar netgi elektrinio lauko pasiskirstymą [44].

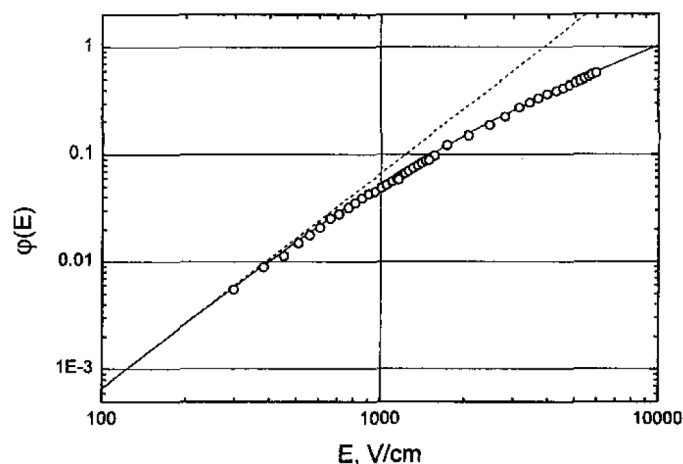
Apžvelgus EO jutiklius galima teigti, kad šie prietaisai yra perspektyvūs elektrinių laukų registracijai. Pagrindinis jų privalumas yra tas, kad jutiklis yra sujungiamas su šviesolaidžiu, kuris silpnai sąveikauja su mikrobangų signalu. Tačiau pati optinių signalų registravimo aparatūra yra jautri išoriniams trikdžiams, kas dalinai apriboja EO jutiklių panaudojimą DGM impulsams registruoti.

### 2.1.2.3 Rezistoriniai jutikliai

Puslaidininkių savybių tyrimai stipriuose elektriniuose laukuose prasidėjo daugiau nei prieš penkiasdešimt metų, kai Ryder ir Šoklis (Shockley) [45] aptiko, kad srovė stipriame elektriniame lauke nukrypsta nuo priklausomybės aprašomos Omo dėsnio. Stipriame elektriniame lauke elektronai įgauna papildomos energijos ir susidaro nauja stabili elektronų sistemos būseną, su vidutine energija, didesne už pusiausvyros energiją. Puslaidininkinio bandinio, esančio stipriame impulsiniame elektriniame lauke  $E_0$ , varžos pokytis apibūrinamas kaip:

$$\varphi(E_0) = \frac{\Delta R(E_0)}{R_0}, \quad (11)$$

čia  $\Delta R(E_0)$  yra varžos pokytis atsirandantis dėl elektronų kaitinimo efekto, o  $R_0$  – bandinio varža, kai  $E_0 \rightarrow 0$ . Tipinė varžos pokyčio  $\varphi$  priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio n-tipo Si pavaizduota 6 pav [46].



6 pav. Santykinės varžos priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio n-tipo Si esant  $T = 300$  K. Taškai parodo eksperimentinius rezultatus. Išsitiesinė linija –karštųjų elektronų (13), o taškuota linija –šiltųjų elektronų (12) artiniai [46].

Kai voltamperinės charakteristikos nukrypimas nuo Omo dėsnio nėra labai didelis, varžos pokytis gali būti išreikštas elektrinio lauko stiprio laipsnine eilute. Dėl puslaidininkio simetrijos savybių, varžos pokytis nepriklauso nuo elektrinio lauko krypties. Taigi, atsižvelgiant tik į pirmą neišnykstantį eilutės narį, gauname, kad varžos pokytis yra proporcingas elektrinio lauko kvadratui:

$$\varphi(E_0) = \beta \langle E \rangle^2, \quad (12)$$

čia  $\beta$  yra taip vadinamas šiltųjų elektronų koeficientas [47]. Sritis, kurioje gali būti naudojama (12) išraiška, vadinama šiltųjų elektronų sritimi. 6 pav. šiltųjų elektronų artinys yra atvaizduotas taškuota linija. Matyti, kad kvadratinė varžos priklausomybė nuo elektrinio lauko tinka iki 1 kV/cm, tuo tarpu prie didesnių laukų yra stebimas didelis nuokrypis nuo šios priklausomybės.

Plačiame elektrinio lauko stiprio diapazone varžos pokytis gali būti aprašytas empirine formule su dviem parenkamais parametrais [46]:

$$\varphi(E_0) = \frac{\sqrt{1 + 4k_n \beta E_0^2} - 1}{2k_n}, \quad (13)$$

čia kintamasis  $k_n$  apibūdina  $\varphi(E_0)$  nuokrypį nuo kvadratinės priklausomybės aprašytos (12) formule.

Ijungus RJ į matavimo grandinę, elektrinis laukas jo jautriausioje elemente susidės iš pastoviosios ir aukšto dažnio dedamųjų:

$$E(t) = E_0 + E \cos(\omega t), \quad (14)$$

kur  $E$  pažymėta mikrobangos, kurios ciklinis dažnis  $\omega$ , elektrinio lauko amplitudinė vertė. Reikia pastebėti, kad praktiškai visuomet yra tenkinama sąlyga  $E_0 \ll E$ .

Mus dominančiame dažnių ruože (0,8 – 12 GHz) yra žinoma, kad elektronų kaitimo inertiškumas n-Si kambario temperatūroje dar nepasireiškia [46]. Todėl, norint apskaičiuoti santykinį varžos pokytį, atsirandantį paveikus JE pastoviu ir mikrobangos elektriniu lauku (14), pakanka tiesiog suvidurkinti momentinę srovę, tekančią puslaidininkiu, per mikrobangų periodą. Atlikę tokią procedūrą ir atmetę mažus atžvilgiu  $E_0 \cdot E^2$  narius, gautume, kad santykinio varžos pokyčio priklausomybė nuo mikrobangos elektrinio lauko amplitudės užsirašytų taip:

$$\varphi(E) = \frac{3}{2} \beta \langle E \rangle^2, \quad (15)$$

kur  $\langle E \rangle$  elektrinio lauko amplitudės vidurkis jutiklio JE. Kaip ir reikėjo tikėtis, santykinis varžos pokytis užsirašo per šiltųjų elektronų koeficientą pastoviam elektriniame lauke, ir jis nepriklauso nuo mikrobangos dažnio. Plačiame mikrobangų elektrinio lauko stiprio ruože varžos pokytis gali būti aprašytas analogiška (13) empirine formule su dviem parenkamais parametrais [46]:

$$\varphi(E) = \frac{\sqrt{1 + 6k_n \beta E^2} - 1}{2k_n}. \quad (16)$$

Žinodami rezistorinio jutiklio santykinės varžos pokytį galime apibrėžti jutiklio jautrį, kuris rezistoriniams jutikliams yra užrašomas taip:

$$\zeta = \frac{\varphi(E)}{P} = \frac{\Delta R/R_0}{P}. \quad (17)$$

Kaip taisyklė, didžioji dauguma rezistorinių jutiklių yra montuojami bangolaidžiuose [46, 48, 49], todėl jų pralaidos ruožas yra ribojamas bangolaidžio, į kurį jie yra įmontuoti, dažnių ruožo. Rezistoriniai jutikliai, kurių jautris yra pastovus visame X bangolaidžio dažnių diapazone (8,2 GHz - 12,4 GHz), buvo aprašyti 2008 metais [50]. Tokių jutiklių jautrusis elementas pagamintas iš n-tipo silicio. Šis elementas yra talpinamas stačiakampio

bangolaidžio centre. Vienas elemento kontaktas yra išemintas per metalinę diafragmą. O prie kito kontakto yra prijungta nuolatinė 10 V įtampa. Tokio jutiklio jautris  $\zeta = 0,081 \text{ kW}^{-1}$ , o jautrio pokytis X dažnių ruože svyruoja  $\pm 10\%$ . Juo galima matuoti mikrobangų impulsus, kurių galia siekia 100 kW.

Tokiu pačiu principu veikiantys rezistoriniai jutikliai buvo teoriškai [51] ir eksperimentiškai [48, 52] ištyrinėti W dažnių ruožui. Jautrusis rezistorinio jutiklio elementas taip pat yra gaminamas iš n-tipo silicio. Tačiau, šiuo atveju diafragma nėra naudojama, o pats jautrusis elementas yra padarytas iš dviejų Si plokštelių, tarp kurių yra nedidelis tarpelis. Šios dvi plokštelės ties viena plokštuma yra tarpusavyje sujungtos. Viena plokštelė yra statoma ant karšto kontakto, prie kurio yra prijungta 10 V maitinimo įtampa, o kita plokštelė yra išeminama. Toks rezistorinio jutiklio jungimas smulkiau aprašytas [48] darbe. Iš teorinių modeliavimo rezultatų pateiktų [51] darbe matyti, kad įmanoma sukurti tokį jutiklį, kuriame vidutinis elektrinis laukas, visame bangolaidžio dažnių diapazone 70 GHz – 110 GHz, keistųsi ne daugiau nei  $\pm 6\%$ . Remiantis teoriniais modeliavimais buvo pagaminti du rezistoriniai jutikliai iš n-tipo silicio su savitąją varžą  $\rho = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  ir  $\rho = 2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  [48, 52]. Abiejų jutiklių matmenys buvo vienodi  $h \times w \times l = 0,1 \times 0,15 \times 0,6 \text{ mm}^3$ . Stovinčios bangos koeficientas nuo šių jutiklių neviršijo 1,25 visame dažnių ruože, o jautrio pokytis buvo  $\pm 15\%$  ir  $\pm 7,5\%$  atitinkamai jutikliams pagamintiems iš  $\rho = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  ir  $\rho = 2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos silicio.

Rezistorinio jutiklio padaryto iš  $\rho = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  ir skirto D dažnių ruožui (110-170 GHz) jautris yra apie  $\zeta = 0.6 \text{ kW}^{-1}$ , o jautrio pokytis visame dažnių diapazone yra  $\pm 27\%$  [49, 53], tačiau toks jutiklis pasižymi geromis jautrio dažninėmis charakteristikomis dažnių diapazone nuo 130 GHz iki 170 GHz, kur jautrio pokytis yra  $\pm 9.8\%$ .

### 2.1.3 Jutiklių HPM impulsams matuoti apibendrinimas

1 lentelėje pateikti įvairių rūšių jutiklių, skirtų mikrobangų impulsams matuoti, pagrindiniai parametrai. Iš šios lentelės matyti, kad tiek termistoriniai,

tiek ir termoporiniai jutikliai yra skirti vidutiniam galingumui matuoti, nes jų atsako trukmė yra ms ar net kelios dešimtys ms. Todėl su tokiais jutikliais praktiškai neįmanoma išmatuoti trumpų reto pasikartojimo dažnio mikrobangų impulsų. Dėl šios priežasties tokių jutiklių taikymas įvairių objektų atsparumo tyrimams stipriame impulsiniame elektriniame lauke yra pakankamai kompliktuotas.

Mikrobangų diodų atsako trukmė yra pakankama norint matuoti DGM impulsus, tačiau šiuo atveju susiduriame su jautrio problema. Mikrobangų diodų veikimas yra stipriai ribojamas mikrobangų galios. Nenaudojant papildomos mikrobangų galios slopinimo maksimalus galingumas matuojamas diodais siekia kelis šimtus mW. Kaip matyti iš 1 lentelės, diodinių jutiklių, skirtų mikrobangų galiai matuoti darbo režimas dažniausiai yra nuo -70 dBm iki 20 dBm ribose. Norint matuoti didesnio galingumo impulsus reikalingas papildomas mikrobangų signalo slopinimas.

Kadangi elektrooptiniai jutikliai yra atsparūs perkrovoms, tai maksimalus matuojamo signalo galingumas nėra ribojamas. Tačiau šiuo atveju susiduriama su minimalaus matuojamo signalo problema. Nors 1 lentelėje nurodyta, jog minimalus matuojamas signalas siekia net -90 dBm, tačiau toks jutiklio jautris pasiekiamas laboratoriniuose eksperimentuose, kuriuose yra naudojami preciziniai optinio signalo matavimo prietaisai. Tokių prietaisų naudojimas elektromagnetinio atsparumo tyrimams yra sunkiai pritaikomas dėl kainos ir naudojimo sudėtingumo. Dėl šios priežasties nėra pakankamai jautrių komercinių elektrooptinių jutiklių, kuriuos būtų galima pritaikyti elektromagnetinio atsparumo tyrimams.

1 lentelė. Jutiklių skirtų mikrobangų galiai matuoti palyginimas.

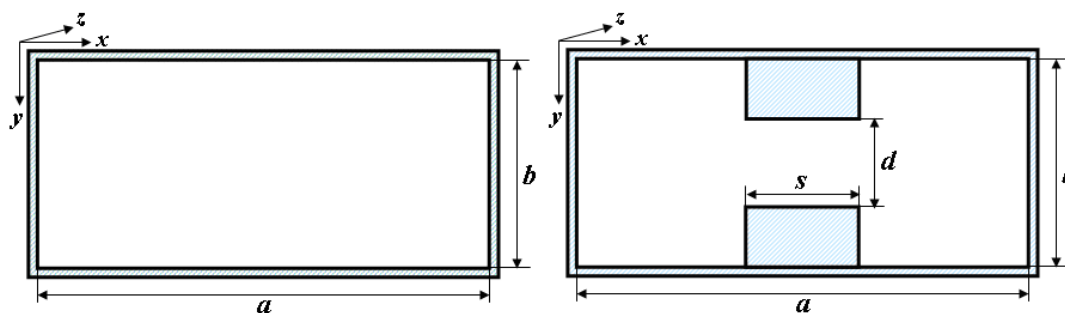
	Termistoriai	Termoporos	Diodai	EO	Rezistoriniai
Atsako laikas	10 – 100 ms	ms	μs	ns	ns
Tipas	Vidutinė	Vidutinė	Impulsiniai	Impulsiniai	Impulsiniai
Galia, dBm	-10 – +10	-30 – +20	-70 – +20	Nuo -90	+30 – +80
Dažnių ruožas	<10 GHz	<10 GHz	<100 GHz	<100GHz	<170GHz



Iš 1 lentelės matyti, kad rezistorinių jutiklių savybės yra beveik idealios elektromagnetinio atsparumo tyrimams. Jie nebijo perkrovų, matavimo jautris yra pakankamas norint juos panaudoti praktiniams taikymams. Tačiau jų veikimo dažnių ruožas yra sąlygotas bangolaidžių, kuriuose yra montuojami tokie jutikliai, pralaidos dažnių juostos. Rezistorinių jutiklių veikimo dažnių ruožą būtų galima praplėsti vietoje įprastų stačiakampių bangolaidžių panaudojus H tipo bangolaidžius, kurių pralaidos dažnių ruožas gali būti daugiau nei 3 kartus platesnis nei standartinių stačiakampių bangolaidžių. Plačiau H tipo bangolaidis aprašytas sekančiame poskyryje.

## 2.2 H tipo bangolaidis

Pirmą kartą H – tipo bangolaidžiai paminėti 1947 metais SB Cohn [54] darbe, tačiau detaliau šiuos bangolaidžius išnagrinėjo S. Hopfer 1955 metais [55]. H tipo bangolaidis skiriasi nuo įprastinio stačiakampio tuo, kad išilgai plačiųjų bangolaidžio sienelių yra suformuojami stačiakampės metalinės keteros 7 pav. Tame pačiame paveiksle nurodyti ir charakteringieji šio tipo bangolaidžio matmenys. Be įprastinių stačiakampiam bangolaidžiui lango matmenų  $a$  ir  $b$  dar yra nurodomas metalinių keterų plotis  $s$  ir tarpas tarp jų  $d$ . Kadangi H bangolaidis yra simetris horizontaliosios ir vertikaliosios plokštumų, einančių per bangolaidžio centrą, atžvilgiu, tai šių dviejų papildomų matmenų pilnai pakanka bangolaidžiui nusakyti. Kai kurių, H tipo bangolaidžio pralaidumo ruožas  $f_{MAX}/f_{MIN} \approx 3$  (žr. 2 lentelę), kai tuo tarpu įprastiniam stačiakampiam bangolaidžiui šis santykis yra apie 1,5. Todėl



7 pav. Stačiakampis ir H tipo bangolaidžiai.

2 lentelė. Stačiakampių ir H tipo bangolaidžių charakteringų dydžių palyginimas.

	$a$ , mm	$b$ , mm	$s$ , mm	$d$ , mm	$f_{min} - f_{max}$ , GHz	$f_{min}/f_{max}$	$P_{max}$ , kW
WRD840	156,64	72,85	30,96	39,17	0,84 – 2,0	2,4	
WRD200	65,97	30,61	13,01	16,46	2,00 – 4,80	2,4	470
WRD250	42,00	18,20	11,2	3,8	2,60 – 7,80	3,0	120
WRD750	17,55	8,15	4,39	3,45	7,5 – 18,0	2,4	5
WR284	72.14	34.04	-	-	2,60 – 3,90	1,5	7600
WR187	47.55	22,15	-	-	3,95 – 5,85	1,48	3300
WR137	34,85	15,79	-	-	5,85 – 8,20	1,4	1900
WR90	22,86	10,16	-	-	8,2 – 12,4	1,5	750

panaudojant H tipo bangolaidį būtų galima gerokai praplėsti dažnių ruožą, kuriame veiktų rezistorinis jutiklis. Dėl susiaurėjusio tarpo tarp horizontaliųjų sienelių, sumažėja ribinė impulsinė galia, kurią galima tokiu bangolaidžiu perduoti. Tačiau iš paskutinio 2 lentelės stulpelio matyti, kad žemesnio dažnių ruožo H tipo bangolaidžiu perduodama galia viršija šimtą kilovatų.

Pirmieji kritinės bangos  $\lambda_c$  H tipo bangolaidyje skaičiavimai rėmėsi skersinio rezonanso metodu [56]. Kompaktiška kritinės bangos išraiška dominuojančiai tokiame bangolaidyje TE<sub>10</sub> modai randama [57] darbe:

$$\lambda_c = 2ab \sqrt{1 + \frac{4b}{\pi\delta a} \left(1 + 0.2 \sqrt{\frac{b}{\delta a}}\right) \times \ln \csc \frac{\pi d}{2b} + (2.45 + 0.2\gamma) \frac{b\gamma}{d\delta}}, \quad (18)$$

čia  $\delta = 1 - s/a$ .

Galia  $P$ , sklindanti bangolaidžiu tam tikrame dažnyje, gali būti išreikšta per galią, kuri sklįstų bangolaidžiu, kai dažnis artėja į begalybę. Sklindančios H tipo bangolaidžiu galios labai aukštame dažnyje išraiška yra pateikta [55] darbe:

$$P_\infty = \frac{E_0^2 d \lambda_c}{2\pi Z_0} \left\{ \frac{2d}{ak} \cos^2 \frac{\pi\gamma}{k} \times \ln \csc \frac{\pi d}{2b} + \frac{\pi\gamma}{2k} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi\gamma}{k} + \frac{d}{b} \cdot \frac{\cos^2(\pi\gamma/k)}{\sin^2(\pi\delta/k)} \left[ \frac{\pi\delta}{2k} - \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi\delta}{k} \right] \right\} \quad (19)$$

čia  $Z_0$  yra laisvosios erdvės banginė varža,  $E_0$  yra elektrinio lauko amplitudė tuščio bangolaidžio centre, o kiti parametrai (19) išraiškoje yra tokie:

$$k = \frac{\lambda_c}{a}, \gamma = \frac{s}{a}, \delta = (1 - \gamma). \quad (20)$$

Galia bet kokiame dažnyje:

$$P = P_\infty \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}, \quad (21)$$

čia  $\lambda$  yra elektromagnetinių virpesių bangos ilgis laisvoje erdvėje. Pasinaudodami (18) – (21) išraiškomis, galime nesunkiai apskaičiuoti kritinį bangos ilgį, H tipo bangolaidyje o, žinant  $E_0$ , ir juo sklindančią galią.

Tuščiam H tipo bangolaidyje, sužadinus dominuojančią TE<sub>10</sub> modą, elektromagnetinio lauko dedamosios srityje tarp strypų yra analogiškos dedamosioms standartiniame stačiakampiam bangolaidyje. Šioje srityje yra sužadinamos  $E_y$ ,  $H_x$  ir  $H_z$  dedamosios, kurių amplitudės priklauso nuo koordinatės  $x$  (žr. 7 pav.) lygiai taip kaip ir stačiakampiam bangolaidyje. Šoninėse srityse yra sužadinamos  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  ir  $H_z$  dedamosios. Natūralu, kad TE<sub>10</sub> modos bangoje  $E_z = 0$ .

2 lentelėje yra pateikti ir H tipo bangolaidžių WRD250 ir WRD840, kuriems ir buvo kuriami RJ, matmenys, mažiausias ir didžiausias praleidžiamas dažnis, jų santykis bei maksimali impulsinė galia.

### 2.3 Prietaisų elektromagnetinis pažeidžiamumas

Elektroninių prietaisų pažeidžiamumas tobulėjant elektronikos pramonei tampa vis daugiau rūpesčių keliančia sritimi. Tam yra kelios labai svarbios priežastys:

- Technologinė pažanga leidžia sukurti didesnės galios ir mažesnių gabaritų didelės galios elektromagnetinės spinduliuotės šaltinius [58]. Taip pat yra kuriamos naujos didesnio stiprinimo antenos su platesniais dažnių diapazonais.
- Sparčiai daugėja šaltinių, kuriuos galima panaudoti tikslingam elektromagnetiniam pažeidžiamumui (IEMI – intentional electromagnetic interference).

- Sparčiai didėja visuomenės priklausomybė nuo integruotų automatinių sistemų, skirtų perduoti informaciją, užtikrinti saugumą ir t.t.
- Naujų integrinių grandynų veikiančių vis aukštesniuose dažniuose ir prie mažesnių maitinimo įtampų pažeidžiamumas elektromagnetiniams impulsams didėja. Todėl įvairių prietaisų elektromagnetinio pažeidžiamumo tyrimai darosi vis svarbesni.

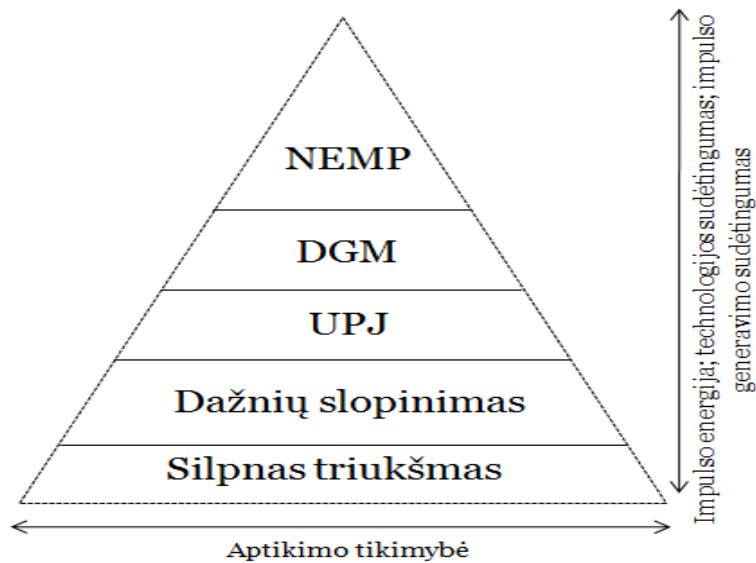
Šiame poskyryje trumpai apžvelgsime šaltinius ir jų generuojamus impulsus naudojamus prietaisų elektromagnetinio pažeidžiamumo bandymuose, bei teorinius modelius, kurie geriausiai paaiškina, kodėl elektroniniai prietaisai yra jautrūs elektromagnetinei spinduliutei.

### **2.3.1 Elektromagnetinių trikdžių tipai**

Elektromagnetinių trikdžių piramidė yra pateikta 8 pav. Piramidės apačioje esantys trikdžiai yra sutinkami dažniausiai, jų energija yra maža, o prietaisai tokiems trikdžiams sukurti yra paprasti. Tuo tarpu trikdžiai, esantys piramidės viršuje, yra didelės energijos, sutinkami labai retai, o prietaisai tokiems trikdžiams gauti yra sudėtingi ir brangūs.

Piramidės apačioje yra silpnas triukšmas, kuris dažniausiai neturi jokios įtakos prietaisų veikimui. Aukščiau yra radijo dažnių slopintuvai. Tai yra prietaisai, sukurti norint nutraukti duomenų perdavimą apibrėžtame dažnių ruože į šį dažnių ruožą spinduliuojant daug pašalinio foninio signalo, dėl ko pasidaro neįmanoma išskirti naudingo signalo. Naudojant radijo dažnių slopintuvus reikalingas tikslus dažnių suderinimas.

Aukštesnį piramidės laiptelį užima ultra plačiajuosčiai impulsai (UPJ), tokių impulsų trukmė dažniausiai būna kelių ns eilės, o spektras apima dažnių ruožą nuo keliasdešimt MHz iki kelių GHz. Kadangi impulso galia tokiam signale yra pasiskirsčiusi plačiame dažnių ruože, tai vienetiniame dažnyje signalo stiprumas yra ganėtinai mažas, todėl tokie signalai dažniausiai yra naudojami naudingo signalo trikdymui. Labai retai dėl tokių impulsų įvyksta fiziniai prietaisų gedimai. Naudojant tokį signalą nereikia tiksliai suderinti



8 pav. Elektromagnetinių trikdžių tipai, adaptuota iš [60].

dažnių. Per pastaruosius metus ultra-plačiajuosčių impulsų sistemos stipriai pasistūmėjo į priekį. Dabar pasaulyje galime aptikti ne vieną laboratoriją [59], kurioje ultra-plačiajuosčių impulsų generatoriai yra pajėgūs generuoti 20 – 50 kV/m signalus.

Virš ultra plačiajuosčių signalų yra didelės galios mikrobangų impulsai. Kadangi šiuo atveju visas signalo galingumas yra sukonzentruotas labai siaurame dažnių ruože, todėl tokie signalai naudojami norint fiziškai pakenkti priimančioms prietaisams. Tačiau šiuo atveju reikia, kad DGM dažniai sutaptų su priimančio prietaiso veikimo ar rezonansiniu dažniu. Elektromagnetinio atsparumo tyrimams naudojami DGM šaltiniai spinduliuojantys 0,5 – 10 GHz elektromagnetines bangas [61, 62]. Kalbant apie prietaisus, skirtus priimti/siųsti elektromagnetinius signalus pvz., telefonai, GPS imtuvai, maršrutizatoriai ir t.t. jie yra jautriausi tokio dažnio spinduliuotei, su kuria jie buvo sukurti dirbti [63, 64].

Aukščiausią pakopą piramidėje užima atominis elektromagnetinis impulsas (NEMP). Aukštuose atmosferos sluoksniuose susprogdinus atominį užtaisą dėl gama spinduliuotės sukuriama elektromagnetiniai trikdžiai [65], kurie gali būti fiksuojami net 1000 km atstumu nuo sprogo epicentro. Šis efektas pirmą kartą buvo pastebėtas 1962 Jungtinėse Amerikos Valstijose per atominio sprogo bandymą virš Ramiojo vandenyno. Tuomet buvo pastebėta,

kad po bandymo sutriko radijo stočių ir elektroninės įrangos veikimas Havajuose, esančiuose 1300 km nuo bandymo vietos.

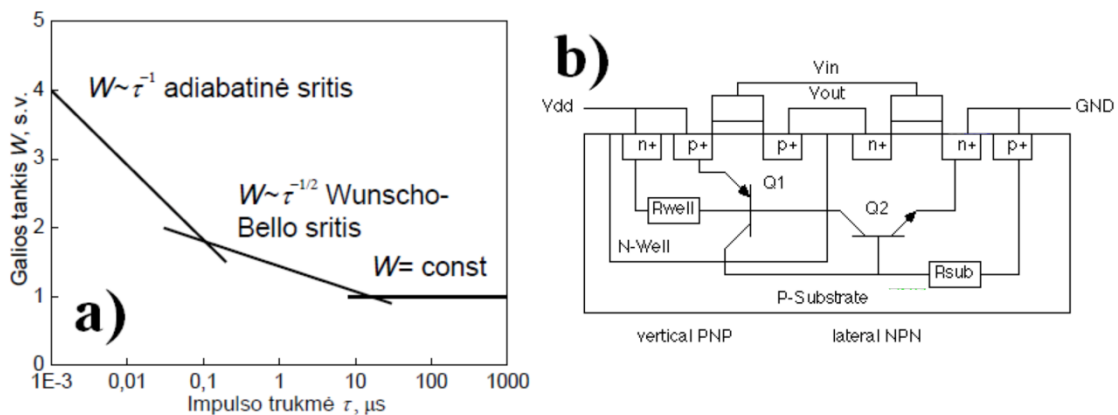
Atliekant elektromagnetinio atsparumo tyrimus laboratorijose dažniausiai yra naudojami dviejų tipų šaltiniai: ultra-plačiajuosčių ir didelės galios mikrobangų impulsų šaltiniai.

### 2.3.2 Elektromagnetinio pažeidžiamumo modeliai

Prietaisų elektromagnetinį pažeidžiamumą dažniausiai aprašo du gedimų modeliai (9 pav.): (i) šiluminio kaitimo modelis ir (ii) parazitinio krūvio modelis.

Dėl išorinio elektrinio lauko poveikio puslaidininkiniai prietaisai kaista, o gedimai pasireiškia tuomet, kai jų temperatūra pasiekia 150–300 °C. Tokių prietaisų šiluminės charakteristikos lemia kelis skirtingus pažeidimo režimus, kurie, kaip matyti iš 9a pav., priklauso nuo elektromagnetinių impulsų trukmės [66], [67]. Jei DGM impulsai trumpesni negu 100 ns, tai šiluminė difuzija nevyksta ir prietaisą pažeidžiantis galios tankis  $W$  yra atvirkščiai proporcingas impulso trukmei  $\tau$ . Esant didesnei impulso trukmei, šiluma pradeda sklaidytis ir pasiekama taip vadinama Wunscho-Bello sritis, kurioje, didėjant impulso trukmei, galios tankis, reikalingas prietaisui pažeisti, mažėja kaip  $\tau^{-1/2}$  [68]. Esant impulso trukmėms, ilgesnėms negu keliasdešimt  $\mu$ s, pasiekama riba, kai  $W$  nebeprisiklauso nuo  $\tau$ .

Kitas labai svarbus prietaisų pažeidimo mechanizmas susijęs su



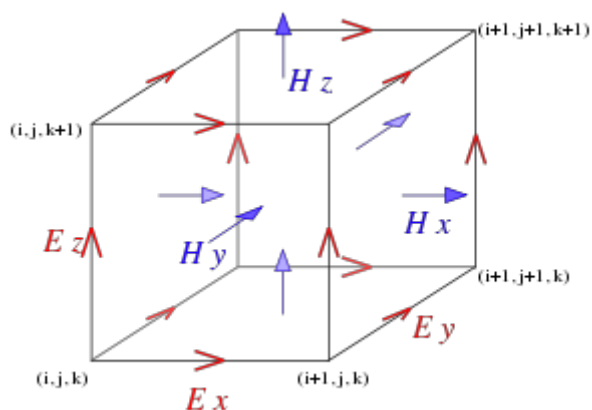
9 pav. Elektromagnetinio pažeidžiamumo modeliai: a) šiluminio kaitimo modelis, adaptuota iš [60], b) parazitinio krūvio modelis, adaptuota iš [69].

krūvininkų akumuliacija KMOP tranzistoriuose. Staigiai šoktelėjus maitinimo įtampai, tokiam tranzistoriuje gali susiformuoti parazitiniai NPN ir PNP tranzistoriai (9b pav.), per kuriuos normaliomis sąlygomis srovė neteka. Tačiau dėl staigaus įtampos šuolio ar dėl krūvininkų akumuliacijos PNPN struktūrose [70], [71], srovė per šiuos tranzistorius gali pradėti tekėti, dėl ko atsiranda srovė iš maitinimo įtampos į žemintą KMOP tranzistoriaus kontaktą.

Tyrinėjant prietaisų elektromagnetinį pažeidžiamumą reikalinga vieninga sistema, pagal kurią būtų galima nustatyti prietaiso atsparumą elektromagnetinei spinduliuotei. Todėl dažniausiai yra naudojama penkių atsparumo lygių skalė, kuri aprašo daugumos elektroninių prietaisų, paveiktų elektromagnetine spinduliuote, sutrikimus: nestebimi jokie veikimo sutrikimai; elektromagnetinio spinduliavimo metu stebimi prietaiso darbo pakitimai; stiprus elektromagnetinės spinduliuotės poveikis, lydintis laikino prietaiso išsijungimo ar persikrovimo, tačiau išjungus elektromagnetinę spinduliuotę, prietaisas toliau atlieka savo funkciją; labai stiprus elektromagnetinės spinduliuotės poveikis, dėl kurio prietaisas nustoja funkcionuoti, prietaiso veikla nebeatsistato nuėmus išorinį poveikį, todėl reikalingas žmogaus įsikišimas, norint, kad prietaisas vėl atliktų jam pavestas funkcijas; katastrofinis elektromagnetinės spinduliuotės poveikis, dėl kurio prietaisas yra fiziškai sugadinamas.

## **2.4 Baigtinių skirtumų laiko skalėje metodas**

Optimizuojant rezistorinio jutiklio charakteristikas, reikia mokėti suskaičiuoti elektrinio lauko stiprį jutiklyje, patalpintame vienokiame ar kitokiame bangolaidyje. Tuo tikslu mes naudojome baigtinių skirtumų laiko skalėje (BSLS) metodą, kurį 1966 metais pasiūlė Kane Yee [72]. Sprendžiant elektrodinaminius uždavinius BSLS metodu, visa tiriamoji erdvė yra užpildoma taškais, kuriuose yra skaičiuojamos elektromagnetinio lauko dedamosios, o erdvinės ir laikinės išvestinės Maksvelo lygtyse yra keičiamos baigtiniais skirtumais. Tokiu būdu pavyksta gauti kompaktiškas išraiškas, leidžiančias apskaičiuoti naujas elektromagnetinio lauko dedamąsias iš senųjų.



10 pav. Yee gardelė, kuria yra užpildoma visa modeliuojama erdvė, sprendžiant elektromagnetinius uždavinius BSLS metodu.

Yee pasiūlyta sprendimo schema leido pagerinti skaičiavimo tikslumą pastumiant taškus, kuriuose yra skaičiuojamos elektromagnetinio lauko dedamosios per pusę žingsnio vieną nuo kito. Tokiu būdu yra suformuojama parodyta 10 pav. Yee gardelė, kuria yra užpildoma visa modeliuojama erdvė. Kaip matyti iš paveikslo, kiekviena elektrinio lauko dedamoji  $E$  yra apsupta keturių magnetinio lauko dedamųjų  $H$ , o kiekviena  $H$  dedamoji yra apsupama keturiomis  $E$  dedamosiomis. Sakykime, aplink tašką, kuriame reikia apskaičiuoti dedamąją  $E_x$  plokštumoje  $z0y$ , ant kvadrato kraštinių, kurių ilgis yra lygus erdvinės diskretizacijos žingsniui, yra išdėstyta po du taškus, kuriuose skaičiuojamos dedamosios  $H_y$  ir  $H_z$ . Laiko skalėje skaičiavimai irgi atliekami laiko momentais pastumtais per  $\Delta t/2$ , čia  $\Delta t$  yra laiko žingsnis. Visi  $E$  skaičiavimai yra atliekami, pasinaudojant  $H$  duomenimis anksčiau išsaugotais atmintyje. Apskaičiavus elektrinio lauko dedamųjų reikšmes, sekančiame skaičiavimo procedūros žingsnyje skaičiuojamos magnetinio lauko dedamosios. Joms skaičiuoti naudojamos senosios  $H$  reikšmės saugomos atmintyje. Tokie skaičiavimo ciklai kartojami iš naujo kaskart perskaičiuojant  $E$  ir  $H$  dedamąsias, kol yra pasiekiamas užsibrėžtas tikslumas. Ši skaičiavimo procedūra yra patogi ir tuo, kad kompiuterio atmintyje pakanka saugoti vieną kas du žingsniai pilnai atnaujinamą elektromagnetinio lauko dedamųjų kompleksą.

Praktiniai elektromagnetinio lauko dedamųjų skaičiavimai buvo atliekami tokiu būdu. Visas modeliuojamas bangolaidžio segmentas buvo suskirstytas į



10 pav. parodytas Yee gardeles. Jutiklio jautrusis elementas bangolaidyje statomas vieno bangos ilgio atstumu nuo modeliuojamo bangolaidžio krašto. Modeliavimo metu laikoma, jog visos bangolaidžio sienelės yra idealiai laidžios ir juose tangentinė elektrinio lauko dedamoji yra lygi nuliui. Viename iš kraštų buvo injektuojama  $TE_{10}$  banga, pasinaudojant stacionarios bangos dedamųjų išraiškėmis iš [56]. O abiejuose bangolaidžio galuose buvo tenkinamos neatspindinčios kraštinės sąlygos.

Elektromagnetinio lauko dedamųjų amplitudėms apskaičiuoti buvo naudojami papildomi masyvai, kuriuose atitinkamos dedamųjų reikšmės buvo kaupiamos vieno periodo metu kiekviename Yee gardelės taške. Pasibaigus periodui buvo apskaičiuojamos kiekvienos dedamosios amplitudinės reikšmės. Dedamosios  $E_y$  amplitudės apskaičiuotos duotąjį periodą buvo lyginamos su reikšmėmis apskaičiuotomis viena periodą prieš tai. Jeigu skirtumas tarp apskaičiuotųjų reikšmių neviršydavo iš anksto užduoto dydžio  $\delta$  skaičiavimai būdavo nutraukiami, priešingu atveju buvo skaičiuojamas dar vienas papildomas periodas. Paprastai skaičiavimai buvo atliekami, kol elektrinių laukų amplitudinės vertės skirdavosi mažiau nei 3 procentais ( $\delta=0.03$ ). Magnetinis laukas mūsų parašytose programose buvo matuojamas elektrinio lauko vienetais  $H=Z_0H$ , laukai buvo normuojami į maksimalią elektrinio lauko amplitudę tuščio bangolaidžio centre  $E_0$ . Mes naudojome bedimensius koordinates ir laiką, todėl koordinačių ir laiko žingsniai buvo tokie:  $\Delta x/a$ ,  $\Delta y/a$ ,  $\Delta z/a$  ir  $\Delta t \cdot c/a$ , kur  $c$  yra šviesos greitis atviroje erdvėje.

## 2.5 Apibendrinimas

Išanalizavus prietaisų elektromagnetinį pažeidžiamumą pasirodė, jog norint sukurti jutiklį, tinkantį matuoti galingumą DGM aplinkoje, jis turi būti atsparus perkrovoms, pasižymėti geromis dažninėmis charakteristikomis dažnių ruože nuo maždaug 1 GHz iki 10 GHz.

Apžvelgus įvairius jutiklius, naudojamus mikrobangų galios matavimams, matyti, jog elektromagnetinio pažeidžiamumo eksperimentams

termistoriniai ir termoporiniai jutikliai nėra pats tinkamiausias variantas, nes tokie jutikliai nėra skirti impulsų galiai matuoti.

Kalbant apie mikrobangų diodų pritaikymą, susiduriama su problema, jog diodai yra labai jautrūs perkrovoms ir jie pritaikyti matuoti pakankamai mažiems signalams, kurie yra kelių šimtų mW eilės. Norint juos panaudoti DGM impulsų matavimuose, reikia naudoti papildomus slopintuvus ir pastoviai stebėti impulsų galią, kad nesudeginti mikrobangų diodų.

Elektrooptiniai jutikliai pasižymi geromis dažninėmis savybėmis, tačiau kol kas jie labiau tinkami matuoti kelių dešimčių kV/m eilės elektrinius laukus. Norint juos pritaikyti silpnesnių elektrinių laukų matavimams, reikalinga labai tiksli optinė ir elektroninė įranga, skirta mokslinėms laboratorijoms. Tokios įrangos naudojimas yra ganėtinai sudėtingas, o dėl didelės kainos sunkiai pritaikomas platesniems taikymams.

Atsižvelgiant į visus šiuos faktus, DGM matavimams buvo pasirinkti rezistoriniai jutikliai, kurie pasižymi beveik visomis reikalingomis savybėmis, kurios būtinos norint šiuos jutiklius pritaikyti elektromagnetinio atsparumo tyrimams. Didžiausias tokių jutiklių trūkumas tai – siauras dažnių ruožas. Kadangi jis yra lemiamas bangolaidžio, kuriame tokie jutikliai yra montuojami, pralaidos dažnių ruožo, todėl, įmontavus rezistorinį jutiklį į H – tipo bangolaidį, veikimo dažnių ruožą būtų galima praplėsti apie 3 kartus.

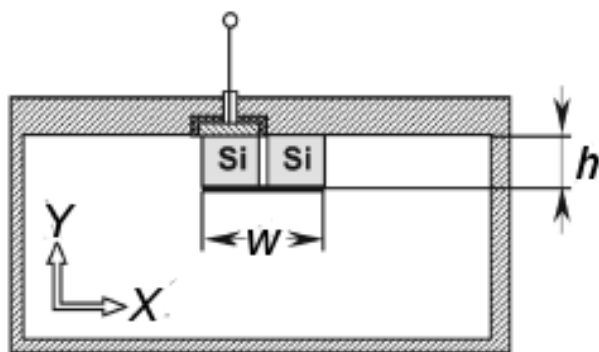
### 3 Modeliavimo rezultatai

Šiame skyriuje aprašomi rezistorinio jutiklio modeliavimo baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu rezultatai. Skaičiavimo metodas trumpai aprašytas antrajame skyriuje, todėl čia pateiksime tik skaičiavimo rezultatus. Skyrius yra suskirstytas į dvi dalis. Pirmojoje dalyje pateikti modeliavimo rezultatai rezistorinio jutiklio pritaikyto standartiniam WR90 (8,2 – 12,4 GHz) bangolaidžiui. Antroji šio skyriaus dalis yra paskirta rezistoriniams jutikliams pritaikytiems H tipo bangolaidžiams. Pateikiami skaičiavimų rezultatai rezistorinio jutiklio JE patalpinto WRD250 (2,6 – 7,8 GHz) ir WRD840 (0,84 – 2,0 GHz) bangolaidžiuose.

#### 3.1 Rezistorinis jutiklis pritaikytas WR90 bangolaidžiui

Pirmuosius rezistorinio jutiklio dažninės charakteristikos optimizavimo skaičiavimus atlikome su jutikliu pritaikytu WR90 bangolaidžiui (11 pav.). Pasirinktoji jutiklio konfigūracija skyrėsi nuo anksčiau šiame dažnių ruože tyrinėtų jutiklių – jutiklio, kurio jaurasis elementas užima visą bangolaidžio langą [46], ar jutiklio patalpinto po skersai bangolaidžio įtempta metaline diafragma [50]. Kaip parodė tolimesni mūsų tyrimai, skirtingai nuo anksčiau tyrinėtų jutiklių, tokio tipo jutiklis galėtų būti sėkmingai naudojamas labai didelės galios mikrobangų impulsams matuoti. Šiame galių ruože jutiklio charakteristika būtų gerokai tiesiškesnė nei anksčiau pasiūlytų jutiklių. Iš kitos pusės, išspręstas rezistorinio jutiklio standartiniame bangolaidyje optimizacijos uždavinys, leido geriau susipažinti su skaičiavimo technika, prieš pradėdant spręsti analogišką uždavinį H tipo jutikliui, kurio pralaidos dažnių ruožas yra beveik 3 kartus platesnis nei standartinio.

Kaip matyti iš 11 pav. rezistorinis jutiklis (RJ) susideda iš dviejų nuosekliai sujungtų jautriųjų elementų (JE), kurių kiekvienas yra pagamintas iš n-Si plokštelės su suformuotais kontaktais. Viršutiniai kontaktai yra sujungti tarpusavyje plona metaline folija, vienas iš apatinių kontaktų yra išžemintas, o kitas – izoliuotas. Prie pastarojo kontakto yra prijungiama maitinimo įtampa ir



11 pav. Rezistorinis jutiklis WR 90 bangolaidyje padarytas iš dviejų Si plokštelių tarpusavyje sujungtų plona metaline folija [73].

nuimamas naudingas signalas. Kadangi tokias detales sudėtinga išskaityti sprendžiant sklaidos uždavinį BSLs metodu, modeliuojamas JE buvo pakeičiamas ištisine n-Si plokštele.

Rezistorinio jutiklio jautrį stačiakampyje bangolaidyje rasime į rezistorinio jutiklio jautrio (17) formulę (30 psl.) įrašę santykinio varžos pokyčio (15) formulę (30 psl.):

$$\zeta = \frac{3\beta\langle E \rangle^2}{2P}. \quad (22)$$

Priminsime, kad  $\beta$  yra pažymėtas šiltųjų elektronų koeficientas,  $\langle E_0 \rangle$  yra mikrobangų elektrinio lauko vidurkis JE, o  $P$  pažymėta mikrobangų impulso, sklindančio bangolaidžiu galia. Pasinaudoję (21) išraiška (35 psl.), kuri tinka ir standartiniam stačiakampiam bangolaidžiui gausime, kad:

$$\zeta = \frac{3\beta E_0^2}{2P_\infty} \times \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \times \frac{\langle E \rangle^2}{E_0^2}, \quad (23)$$

kur  $E_0$  yra elektrinio lauko stipris tuščio stačiakampio bangolaidžio centre, o:

$$P_\infty = \frac{abE_0^2}{4Z_0}, \quad (24)$$

čia  $a$  ir  $b$  yra bangolaidžio matmenys, o  $Z_0$  – laisvosios erdvės banginė varža.

Jautrio išraiškoje (23) galime išskirti tris narius. Pirmasis narys nepriklauso nuo dažnio. Antrasis narys atsiranda dėl elektromagnetinės bangos dispersijos bangolaidyje. Todėl, didėjant mikrobangų dažniui elektrinis laukas bangolaidyje mažėja, o tai lemia ir jautrio mažėjimą. Trečiasis narys yra elektrinio lauko vidurkio kvadratas sunormuotas į elektrinį lauką tuščio bangolaidžio centre. Kaip matome iš (23) išraiškos, norint, jog rezistorinio

jutiklio jautris nepriklausytų nuo dažnio, reikia taip parinkti jautriojo elemento parametrus, kad elektrinio lauko amplitudė jame didėtų didėjant dažniui, tokiu būdu, kompensuodama dispersiją bangolaidyje.

Idealiu atveju galima taip parinkti RJ jautriojo elemento parametrus kad jutiklio jautris visame bangolaidžių dažnių diapazone nepriklausytų nuo dažnio, todėl tokį jutiklį būtų galima vadinti „idealiu jutikliu“. Toliau tekste naudosime šį terminą, kuris apibrėžia rezistorinį jutiklį, kurio jautris nepriklauso nuo dažnio bangolaidžio dažnių diapazone.

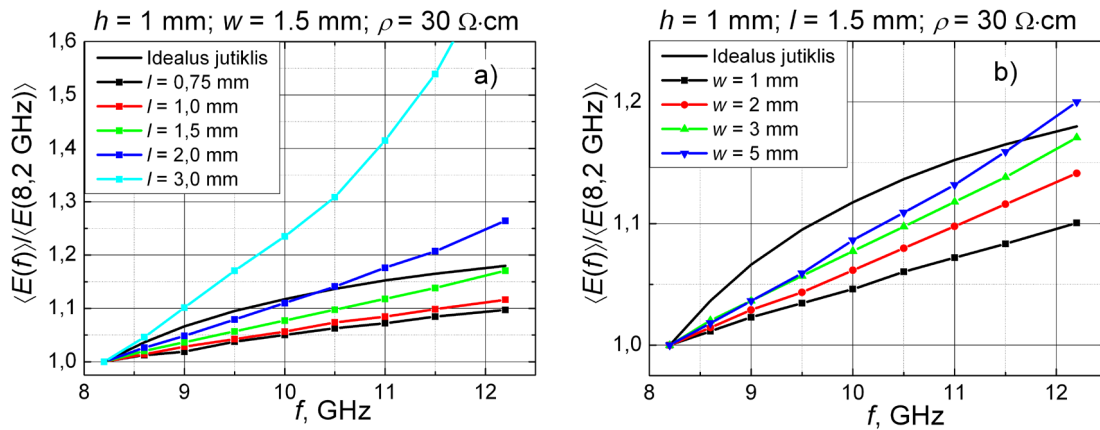
Padaliję (23) išraišką iš jautrio  $\zeta(f_{min})$ , kur  $f_{min}$  apatinis bangolaidžio pralaidos dažnis ir priėmę, kad jutiklio jautris bangolaidžio pralaidos dažnių ruože nepriklauso nuo dažnio gauname išraišką aprašančią elektrinio lauko vidurkio priklausomybę nuo dažnio idealaus jutiklio jautriajame elemente:

$$\frac{\langle E(f) \rangle}{\langle E(f_{min}) \rangle} = \left[ \frac{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}{1 - \left(\frac{f_c}{f_{min}}\right)^2} \right]^{1/4}, \quad (25)$$

čia  $f_c$  pažymėtas kritinis bangos dažnis. Kaip matyt iš gautos išraiškos, santykinis elektrinio lauko pokytis idealiame jutiklyje nepriklauso nuo to į kokį bangolaidį jutiklis bus talpinamas. Kiek  $\langle E(f) \rangle$  turėtų sustiprėti augant dažniui bangolaidžio pralaidos ruože priklausys tik nuo santykių  $f_c/f_{min}$  ir  $f_c/f_{max}$ , kur  $f_{max}$  viršutinis bangolaidžio pralaidos dažnis. Turint omenyje, kad WR90 bangolaidžiui  $f_{min} = 8,2$  GHz,  $f_{max} = 12,4$  GHz, o  $f_c = 6,52$  GHz, gautume, kad  $\langle E(f_{max}) \rangle / \langle E(f_{min}) \rangle = 1,18$ .

Idealus rezistorinio jutiklio pritaikyto WR90 bangolaidžiui elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio pavaizduota 12 pav. ištisine linija. Matyti, kad, norint jog jutiklio jautris nepriklausytų nuo dažnio, elektrinis laukas 12,2 GHz dažnyje turi sustiprėti apytiksliai 1,18 karto lyginant su vidutine elektrinio lauko verte jutiklyje 8,2 GHz dažnyje.

Pasinaudodami jautrio išraiška (23) ir elektromagnetinio modeliavimo metu gautomis elektrinio lauko, rezistorinio jutiklio jautriajame elemente vertėmis, nesunkiai galime apskaičiuoti ir teorinį rezistorinio jutiklio jautrį.

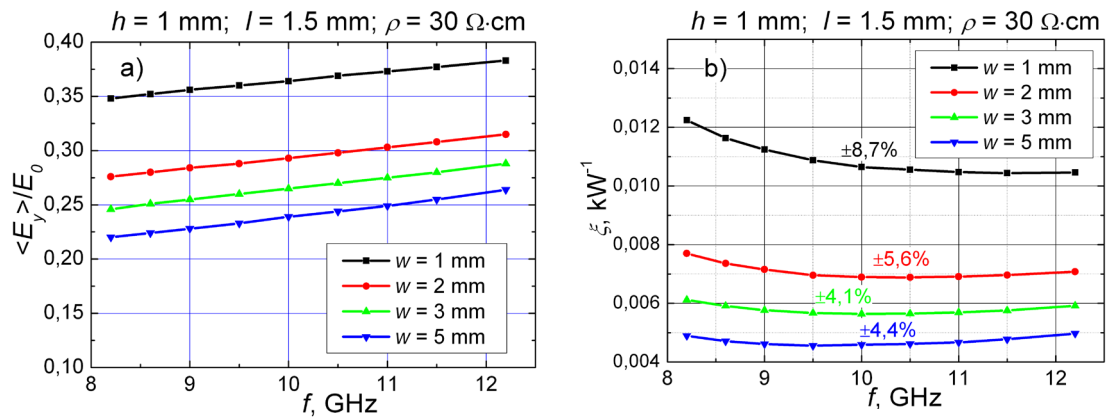


12 pav. Rezistorinio jutiklio pritaikyto WR90 bangolaidžiui, sudaryto iš dviejų JE tarpusavyje sujungtų plona metaline folija, santykinio elektrinio lauko priklausomybė nuo mikrobangų dažnio, kai jutiklio savitoji varža  $\rho = 30 \Omega \cdot \text{cm}$ , o aukštis  $h = 1 \text{ mm}$ : a) plotis  $w = 1,5 \text{ mm}$ , o ilgis kinta nuo 0,75 iki 3 mm; b) ilgis  $l = 1,5 \text{ mm}$ , o plotis kinta nuo 1 iki 5 mm.

Modeliavimą pradėjome su  $\rho = 30 \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos Si bandiniu, kurio aukštis  $h = 1 \text{ mm}$ , o plotis  $w = 1,5 \text{ mm}$ . Pradinį jutiklio aukštį parinkome tokį, kad, iš vienos pusės, gautume mažą elektromagnetinės bangos atspindį nuo jutiklio, o iš kitos jo aukštis būtų gerokai didesnis už kontaktinių sričių ir folijos, naudotos jutikliams sujungti, storį. Kaip parodė vėlesni tyrimai šis pasirinkimas buvo optimalus ir keičiant jutiklio aukštį nepavyko pagerinti jo dažninės charakteristikos.

Modeliavimo metu keitėme JE ilgį (12a pav.). Iš šio paveikslo matyti, kad mažiausiai nuo idealiam jutikliui būdingos elektrinio lauko priklausomybės (juoda linija) nukrypsta jutiklis kurio JE ilgis yra 1,5 mm. Taip pat iš šio paveikslo galime pastebėti, jog didinant jutiklio ilgį stebimas didesnis santykinio elektrinio lauko augimas aukštesnių dažnių srityje, dėl ko atsiranda galimybė koreguoti elektrinio lauko pasiskirstymą norima linkme. Be to matyti, kad padidinus jutiklio ilgį bangos sklidimo kryptimi iki 3 mm elektrinio lauko stipris jame stipriai išauga aukštų dažnių srityje. Tikėtina, kad čia pradeda pasireikšti rezonansiniai reiškiniai.

Nustačius, kad optimalus jutiklio ilgis yra 1,5 mm, modeliavimo metu šis ilgis buvo fiksuojamas, o buvo keičiamas jutiklio plotis 1 – 5 mm ribose (12b pav.). Matyti, kad JE pločio įtaka yra panaši į ilgio įtaką stebimą 12a pav. Didinant  $w$ , stebime santykinį elektrinio lauko sustiprėjimą aukštesnių dažnių



13 pav. Apskaičiuota elektrinio lauko jautriajame elemente (a) ir RJ jautrio (b) priklausomybės nuo dažnio skirtingo pločio JE bangolaidyje WR90

srityje. Iš 12b pav. matyti, kad jutiklio, kurio plotis  $w = 3$  mm elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio geriausiai sutampa su elektrinio lauko pasiskirstymu idealiam jutiklyje.

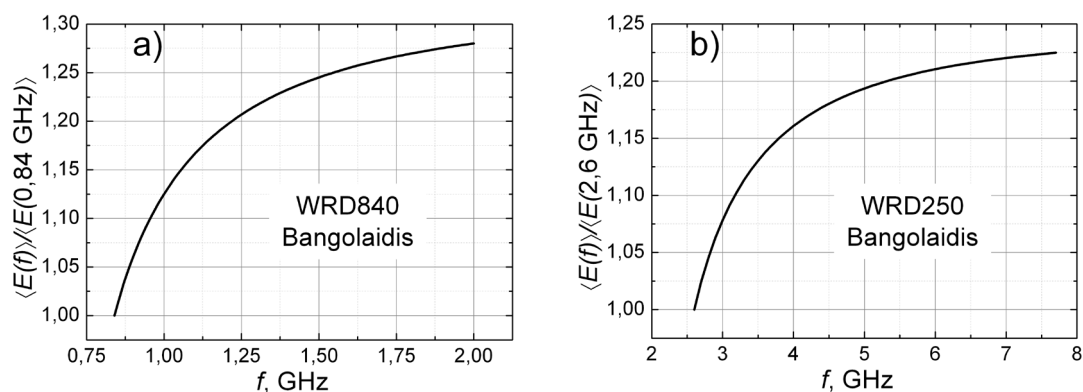
Iš 13a pav. pateiktos vidutinio elektrinio lauko jautriajame elemente priklausomybės nuo mikrobangų dažnio matyti, kad keičiant JE plotį elektrinis laukas jutiklyje mažėja. Kadangi kreivės pokrypis visiems jutiklio pločiams išlieka nepakitęs, o pasikeičia tik absoliutinis lauko dydis, todėl ir yra stebimas normuoto elektrinio lauko didėjimas aukštesnių dažnių srityje. Absoliutinio elektrinio lauko sumažėjimas negali būti paaiškinamas padidėjusiu atspindžiu nuo JE, nes stovinčios bangos koeficientas pakinta nežymiai: nuo 1,03, kai jutiklio plotis  $w = 1$  mm iki 1,07, kai jutiklio plotis  $w = 5$  mm. Taip pat tokiam lauko mažėjimui įtakos negali turėti  $TE_{10}$  modos pasiskirstymas bangolaidyje. Nesunku įsitikinti, kad dėl elektromagnetinės bangos pasiskirstymo bangolaidyje pakeitus jutiklio plotį nuo 1 mm iki 5 mm vidutinis elektrinis laukas jutiklyje galėtų sumažėti apie 2%. Mes manome, kad didžiausią įtaką šiam elektrinio lauko mažėjimui gali turėti jutiklio varžos pokytis. Jei tarti, kad rezistorinio jutiklio JE yra kaip išorinė varža, kuria yra apkrauta bangolaidinė linija, tai tiek jutiklio pločio  $w$ , tiek ilgio  $l$  didinimas lemia šios išorinės varžos mažėjimą. Tai, savo ruožtu, mažina elektrinio lauko amplitudę jutiklyje dėl padidėjusių nuostolių jame.

13b pav. pavaizduotos rezistorinio jutiklio jautrio dažninės charakteristikos keičiant JE plotį. Kaip ir tikėtasi iš 12b pav., mažiausias

jutiklio jautrio pokytis bangolaidžio pralaidos dažnių ruože stebimas su JE, kurio plotis  $w = 3$  mm. Mes taip pat atlikome RJ dažninės charakteristikos tyrimus keičiant jutiklio savitąją varžą. Pasirodė, kad užfiksavus JE matmenis ir keičiant  $\rho$ , santykis  $\langle E(f_{max}) \rangle / \langle E(f_{min}) \rangle$  pasiekia minimalią vertę ties tam tikra savitosios varžos reikšme. Išrinkto jutiklio matmenims  $h \times w \times l = 1 \times 3 \times 1,5$  mm<sup>2</sup> optimali  $\rho$  vertė buvo 30  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Todėl toks jutiklis ir buvo pasirinktas tolimesniems eksperimentiniams tyrimams, nes tiek didinant, tiek ir mažinant  $\rho$ , dažninės charakteristikos netolygumas didėjo.

### 3.2 Rezistoriniai jutikliai pritaikyti H tipo bangolaidžiams

Rezistorinio jutiklio pritaikyto H tipo bangolaidžiui jautris gali būti užrašomas (23) formule (44 psl.). Tačiau šiuo atveju  $P_\infty$  yra apibrėžiamas (19) formule (34 psl.). Kaip jau buvo minėta praeitame poskyryje, norint, kad rezistorinio jutiklio jautris nepriklausytų nuo dažnio, reikia taip parinkti jautriojo elemento parametrus, kad elektrinio lauko amplitudė jame didėtų didėjant dažniui, tokiu būdu kompensuodama dispersiją bangolaidyje. Tokių idealių jutiklių pritaikytų WRD840 ir WRD250 bangolaidžiams santykinio vidutinio elektrinio lauko juose priklausomybės nuo dažnio apskaičiuotos pagal (25) išraišką (45 psl.) parodytos 14 pav. Apskaičiuojant šias priklausomybes, mes pasinaudojome minėtų bangolaidžių žemiausio bei aukščiausio pralaidos dažnių bei kritinio dažnio vertėmis pateiktomis 2 lentelėje.



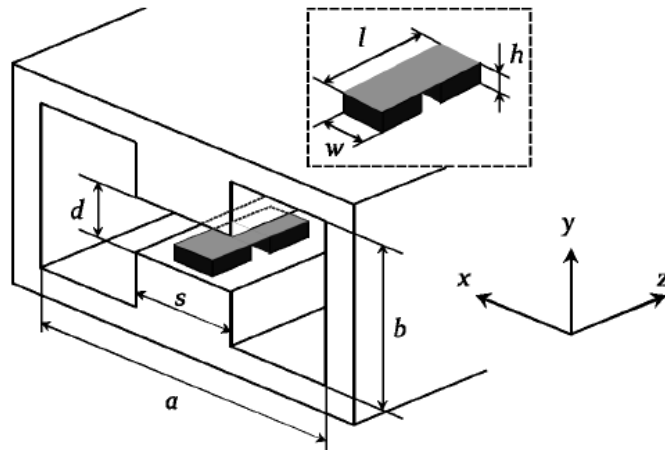
14 pav. Santykinio vidutinio elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio idealiajame jutiklyje, kurio jautris nepriklauso nuo dažnio a) kai jautrusis elementas tvirtinamas WRD840 bangolaidyje, b) kai jautrusis elementas tvirtinamas WRD250 bangolaidyje.



Kaip matyti iš 14a pav., WRD840 jutikliui elektrinis laukas dažnių ruože nuo 0,84 GHz iki 2,0 GHz turėtų padidėti 1,28 karto (14a pav.), o WRD250 jutikliui dažnių ruože nuo 2,6 GHz iki 7,8 GHz elektrinis laukas turėtų padidėti 1,22 karto (14b pav.). Be to, matyti, kad šis didėjimas nėra tolygus. Abiem jutikliams didžiausias didėjimas turėtų būti dažnių ruožo pradžioje – nuo 0,84 GHz iki 1,5 GHz WRD840 jutikliui ir nuo 2,6 GHz iki 5,0 GHz WRD250 jutikliui.

Kaip matyti iš 2 lentelės, WRD bangolaidžių charakteringi matmenys išreikšti milimetrais turi dešimtąsias dalis milimetro. Taip atsitiko todėl, kad H tipo bangolaidžių standartai buvo sukurti JAV ir Anglijoje, kur naudojama ne metrinė, o colinė matavimo sistema. Todėl, norint tiksliai modeliuoti tokio bangolaidžio langą, tektų paimti pakankamai mažą žingsnį. Tam, kad galėtume modeliuoti kiek didesniais žingsniais, mes panaudojome kiek grubesnę bangolaidžio modelį, suapvalindami jo matmenis iki sveikų skaičių milimetrais. WRD250 bangolaidžiui parinkome tokius matmenis:  $a = 42$  mm,  $b = 18$  mm,  $s = 11$  mm,  $d = 4$  mm, o WRD840 bangolaidžiui buvo parinkti tokie matmenys:  $a = 156$  mm,  $b = 72$  mm,  $s = 30$  mm,  $d = 40$  mm. Manome, kad tokio modelio tikslumas bus pakankamas išsiaiškinti elektrinio lauko priklausomybių nuo JE elektrofizikinių parametrų dėsningumus, atliekant modeliavimą su mažesnėmis kompiuterinių resursų sąnaudomis. Taupydami resursus modeliuosime darinį simetrišką plokštumos, kertančios plačiosios sienelės centrą, atžvilgiu. Tokiu atveju pakanka modeliuoti pusę lango.

Jautris nėra vienintelė svarbi RJ charakteristika. Greta to reikėtų, kad JE neįneštų ženklus atspindžio, todėl apsibrėžėme, kad jutiklio SBK būtų mažesnis už 1,5. Kita nemažiau svarbi JE charakteristika – jo varža, nes jutiklis yra skirtas mikrobangų impulsams matuoti. Norint matuoti mikrosekundinius impulsus reikėtų, kad jutiklio varža neviršytų 1 k $\Omega$ . Šie apribojimai, kartu su sąlyga, kad jutiklio dažninė charakteristika būtų kiek įmanoma tolygesnė buvo pagrindiniai atliekamos optimizacijos tikslai.

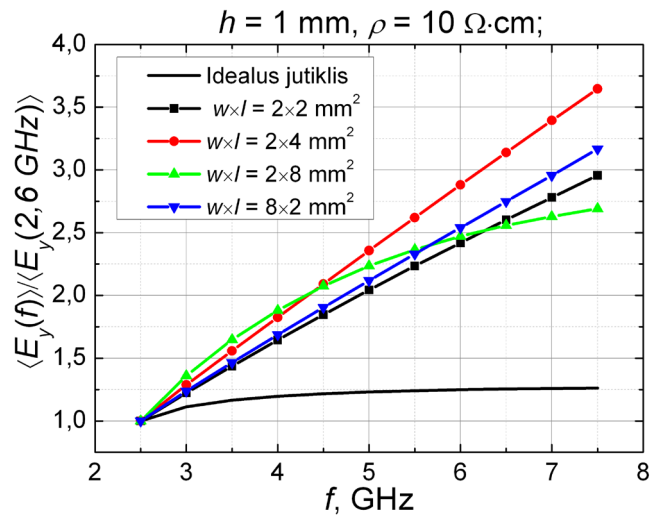


15 pav. Rezistorinis jutiklis, padarytas iš dviejų JE tarpusavyje sujungtų plonu metalo sluoksniu, patalpintas ant H tipo bangolaidžio metalo keteros .

### 3.2.1 Du jautrieji elementai ant bangolaidžio keteros

Rezistorinio jutiklio modeliavimą H tipo bangolaidžiui pradėjome remdamiesi panašiais principais kaip ir ankstesniame skyrelyje aptarto WR90 jutiklio atveju. Modeliavome rezistorinį jutiklį, sudarytą iš dviejų jautriųjų elementų (15 pav.), kurie tarpusavyje yra sujungti plonu metalo sluoksniu uždėtu ant JE viršaus. Kaip ir anksčiau minėtu atveju, vieno iš jautriųjų elementų apatinis kontaktas yra išemintas, o kitas prijungtas prie išorinio maitinimo šaltinio. Modeliavome ištisinę n-Si plokštelę su metaliniu kontaktu viršuje. Modeliuotus jutiklius būtų galima suskirstyti į dvi grupes, atsižvelgiant į jutiklių ilgio  $l$  ir bangos ilgio  $\lambda$  santykį. Pirmoji grupė tai jutikliai, kurių ilgis bangos sklidimo kryptimi yra mažesnis už elektromagnetinės bangos ilgį Si plokštelėje, o antroji grupė jutiklių – kai jų ilgis  $l$  yra vienos eilės su elektromagnetinės bangos ilgiu.

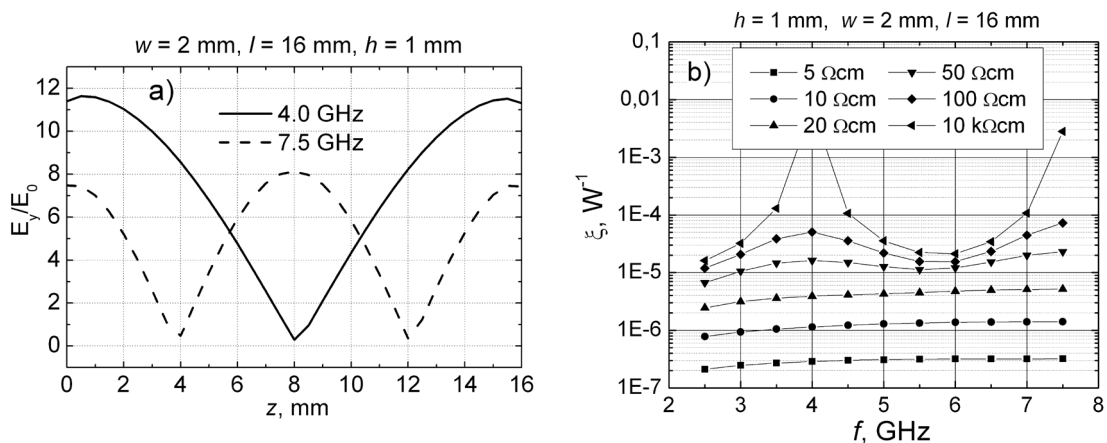
Mažųjų jutiklių grupė buvo ištyrinėta keičiant jutiklių plotį ir ilgį, kai JE savitoji varža buvo  $\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$ , o aukštis  $h = 1 \text{ mm}$ . Vidutinio elektrinio lauko jutiklyje rezultatai kartu su elektrinio lauko pasiskirstymu idealiaame jutiklyje pateikti 17 pav. Iš šio paveikslo galime pastebėti, kad elektrinio lauko vidurkis keičiantis dažniui didėja žymiai greičiau, nei turėtų didėti, norint, kad jutiklio jautris nepriklausytų nuo dažnio. Matyti, kad jutiklio matmenų įtaka elektriniam laukui tokiuose jutikliuose nėra didelė, kas akivaizdžiai matosi



17 pav. Elektrinio lauko mažuose jutikliuose priklausomybė nuo mikrobangų dažnio.

palyginus skaičiavimo rezultatus jutikliams su skersiniais matmenimis  $w \times l = 2 \times 8 \text{ mm}^2$  ir  $w \times l = 8 \times 2 \text{ mm}^2$ . Matyti, kad, nors šie jutikliai yra pasukti 90 laipsnių kampu vienas kito atžvilgiu, tačiau tokio pasukimo įtaka vidutiniam elektriniam laukui jutikliuose yra minimali. Atsižvelgiant į šiuos rezultatus buvo nuspręsta nagrinėti rezistorinius jutiklius su didesnių matmenų JE.

Tyrinėjant didesnių matmenų jutiklius, pasirodė, kad JE ilgiui bangos sklaidimo kryptimi esant kartotiniam  $\lambda_d/2$ , kur  $\lambda_d$  yra elektromagnetinės bangos ilgis jutiklyje, jame stebimas elektromagnetinių bangų rezonansas. Iš 16a pav. matyti, kad jutikliuose, kurių ilgis  $l = 16 \text{ mm}$ , bangolaidžio pralaidos ruože yra stebimi du rezonansai. Pirmasis pusės bangos ilgio rezonansas stebimas bangolaidžio diapazono pradžioje ( $f = 4 \text{ GHz}$ ,  $\lambda = 74,9 \text{ mm}$ ). Antrasis



16 pav. Elektrinio lauko pasiskirstymas jutiklyje, kai mikrobangų dažnis yra 4,0 GHz ir 7,5 GHz (a), bei rezistorinio jutiklio jautrio dažninė priklausomybė (b).

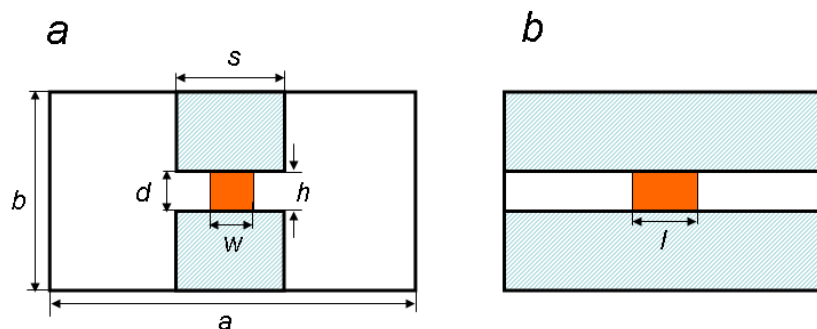
rezonansas stebimas bangolaidžio dažnių juostos pabaigoje ( $f = 7,5$  GHz,  $\lambda = 40$  mm) ir atitinka pilno bangos ilgio rezonansą. Kaip matome, rezonansinis bangos ilgis JE yra gerokai trumpesnis nei bangos ilgis laisvoje erdvėje ar bangolaidyje, tačiau, turint omenyje Si santykinės dielektrinės konstantos  $\varepsilon = 11,9$  dydį, matyti, kad bangos ilgis plokštelėje gerokai didesnis nei  $\lambda/(\varepsilon)^{1/2}$ . Tai būtų galima paaiškinti tuo, jog, esant mažam JE skerspjūvio plotui, bangos sklidimą jutiklyje įtakoja ir banga sklindanti bangolaidžiu.

Iš 16b pav. matyti, jog didinant Si savitąjį laidumą šie rezonansai turi mažesnę įtaką jautrio dažninei priklausomybei. Matyti, kad JE savitajai varžai esant  $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$  rezonansai yra labai aiškiai pastebimi, o sumažinus savitąją varžą iki  $20 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$  jų įtaka tampa nepastebima. Taip pat iš šio paveikslo matome, kad geriausią dažninę charakteristiką turi jutiklis, kurio JE pagamintas iš  $5 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos Si. Tokio jutiklio jautris  $\xi = 2.65 \times 10^{-4} \text{ kW}^{-1} \pm 20.4\%$ . Kadangi, šio bangolaidžio dažnių juosta yra plati, tai pasiekti geresnių rezultatų su tokios konfigūracijos rezistoriniu jutikli vargu ar galima tikėtis. Tačiau, nors ir geresni rezultatai būtų pasiekti, rezistorinio jutiklio jautris yra bent keliomis eilėmis per mažas. Todėl galima teigti, kad naudojant 15 pav. pavaizduotos konfigūracijos rezistorinį jutiklį, mažai tikėtina gauti priimtina ir mažai besikeičiantį jutiklio jautrį bangolaidžio pralaidos ruože.

Šio poskyrio rezultatai buvo publikuoti straipsnyje: P. Ragulis, V. Tamošiūnas, Ž. Kancleris, R. Simniškis, and M. Tamošiūnienė, "Optimisation of resistive sensor for ridge waveguide," in Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference on, 2010, Vol. 2 pp. 714-717.

### **3.2.2 Rezistorinis jutiklis su skersai bangolaidžio keturų įtvertu jautriuoju elementu**

Šiame poskyryje aprašomi rezistorinio jutiklio pritaikyto WRD250 bangolaidžiui modeliavimo rezultatai, kai jutiklio jautrusis elementas yra įtvertas tarp bangolaidžio metalinių keturų, kaip parodyta (18 pav.). Matyti,

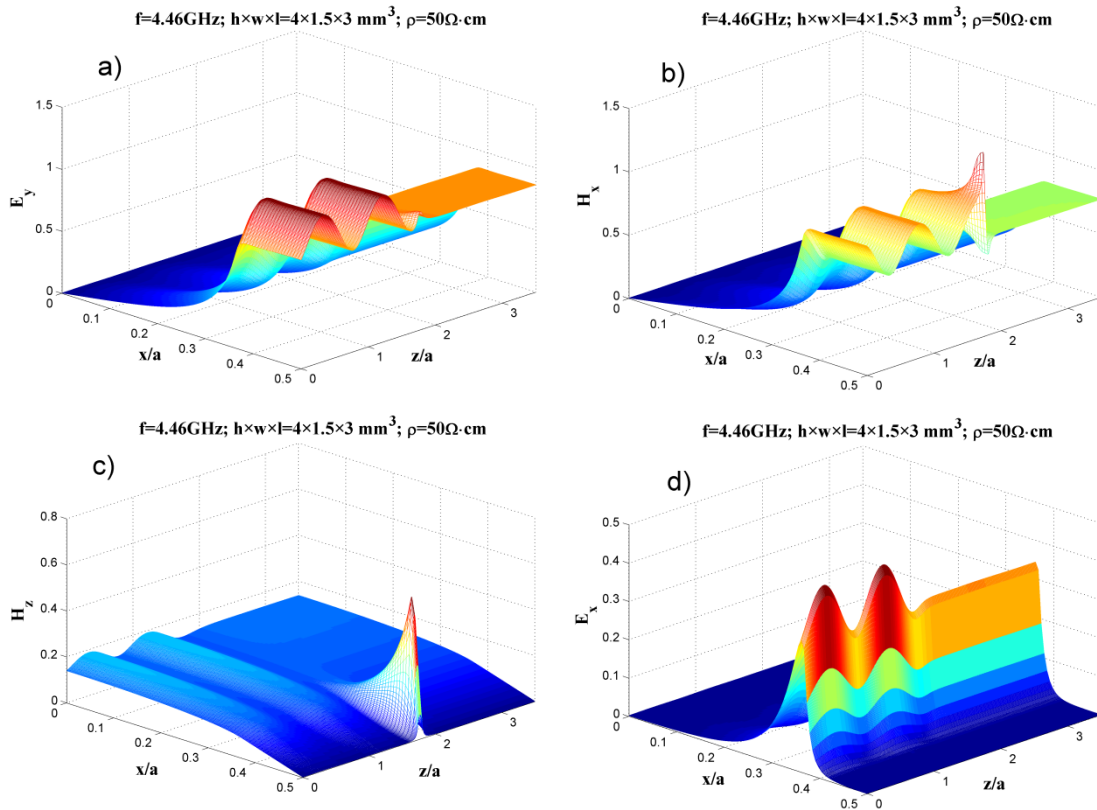


18 pav. Skersai bangolaidžio įtvirtas jutiklis: (a) vaizdas iš priekio, (b) vaizdas iš šono.

kad jutiklis abiem galais remiasi į metalines keteras, praplečiančias H bangolaidžio dažnių ruožą. Todėl praktiškai realizuojant tokio tipo jutiklį, reikia vieną iš kontaktų, naudojamą jutikliui maitinti ir naudingam signalui matuoti, izoliuoti nuo bangolaidžio korpuso. Jutiklio aukštis  $h$  sutampa su tarpu tarp bangolaidžio keterų  $d$ , jo plotis yra  $w$ , o ilgis bangos sklidimo kryptimi  $l$ .

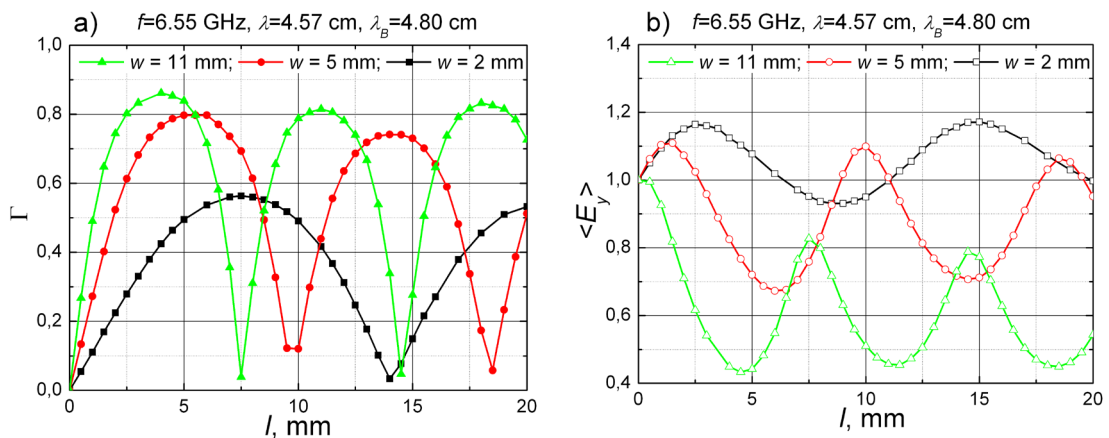
Apskaičiuotas elektrinių ir magnetinių laukų dedamųjų pasiskirstymas H tipo bangolaidžio sekcijoje su įdėtu jautriu elementu iš n-Si, plokštumoje, nutolusioje per 1 mm nuo metalinės keteros į kurią remiasi JE, yra pavaizduotas 19 pav. Jutiklio matmenys  $h \times w \times l = 4 \times 1,5 \times 3 \text{ mm}^3$ , savitasis laidumas  $50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ . Stacionarinė banga sužadinama ties  $z = 0$ , kitame bangolaidžio gale tenkinamos neatspindinčios kraštinės sąlygos. Matyti, kad tarp keterų  $x > 0,37$  pagrinde sklinda  $E_y$  ir  $H_x$  dedamosios.  $H_z$  dedamoji bangolaidžio centre yra lygi nuliui, o  $E_x$ , lygiai kaip ir neparodytoji  $H_y$  tarp keterų nesklinda.  $E_x$  dedamosios smailė stebima ties keteros kraštu (analogiška smailė stebima ir dedamajai  $H_y$ ) atsiranda dėl dviejų sričių nesutapimo. Tarp strypų sklinda vienintelė moda, kai tuo tarpu kraštuose bangos sklidimas yra daugiamodis [56]. Pagal [56] jis neturėtų turėti didesnės įtakos sklindančiai bangai. Dedamoji  $E_z$  nagrinėtu atveju neatsiranda, nes JE yra homogeniškas  $y$  kryptimi.

Darinys  $z$  ašyje prasideda ties 1,83 ir baigiasi ties 1,9. Kaip matyti iš 19 pav. JE stipriausiai perturbuoja  $H_z$  dedamąją. Matyti, kad prieš darinį susidaro dalinai stovinti banga iš kurios galima nustatyti atspindžio koeficientą. Šiuo konkrečiu atveju SBK yra 1,48.



19 pav. Apskaičiuotas elektrinių ir magnetinių laukų dedamųjų pasiskirstymas H tipo bangolaidyje su skersai bangolaidžio įtvirtu JE, plokštumoje per 1 mm nutolusioje nuo kurios į kurią remiasi jutiklis,  $f = 4,46$  GHz. JE parametrai:  $h \times w \times l = 4 \times 1,5 \times 3$  mm<sup>3</sup>,  $\rho = 50$  Ω cm,  $\varepsilon = 11,9$ . (a) –  $E_y$  dedamoji, (b) –  $H_x$ , (c) –  $H_z$ , (d) –  $E_x$ .

Tyrimus pradėjome nuo dielektrinės plokštelės iš n-Si, kurios  $\varepsilon = 11,9$ . Skaičiavimo rezultatai, kai  $f = 4,46$  GHz yra pateikti 20 pav. Matyti, kad, didėjant dielektrinės plokštelės ilgiui bangos sklidimo kryptimi, apskaičiuotas atspindžio koeficientas (20a pav.) yra Fabry-Perot rezonansui charakteringa osciliuojanti  $l$  funkcija. Stiprus atspindžio nuo JE sumažėjimas yra stebimas



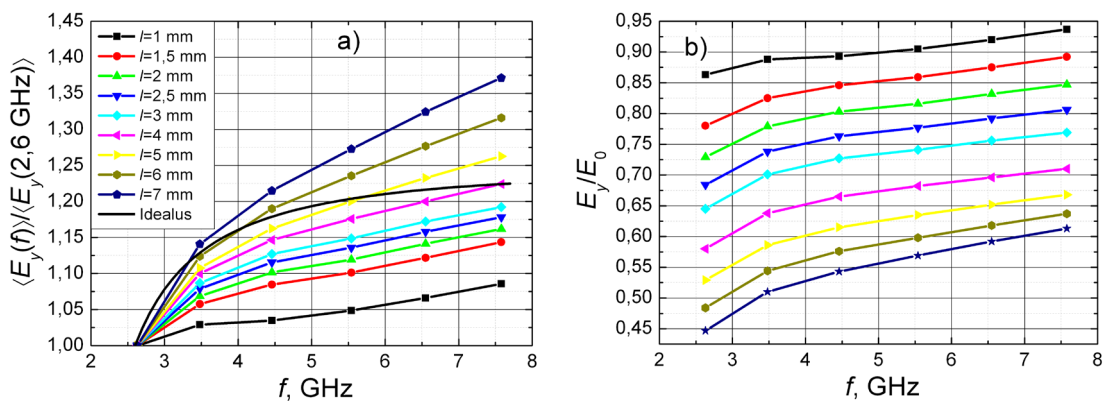
20 pav. Apskaičiuota atspindžio koeficiento (elektriniam laukui) (a) ir vidutinio elektrinio lauko JE (b) priklausomybė nuo ilgio  $l$ , esant skirtingiems JE pločiams  $w$ ,  $f = 6,55$  GHz. Jautriojo elemento parametrai:  $h = 4$  mm,  $\rho = \infty$  Ω cm,  $\varepsilon = 11,9$ .

tuomet, kai darinio ilgis lygus sveikam skaičiui  $\lambda_d/2$ , kur  $\lambda_d$  yra bangos ilgis darinyje. Reikia tikrai turėti omenyje, kad nagrinėjamu atveju elektromagnetinė banga sklinda ne tik puslaidininkiu, bet ir bangolaidžiu, todėl, kaip matyti iš 20 pav., rezonanso padėtis priklauso ir nuo plokštelės pločio  $w$ .

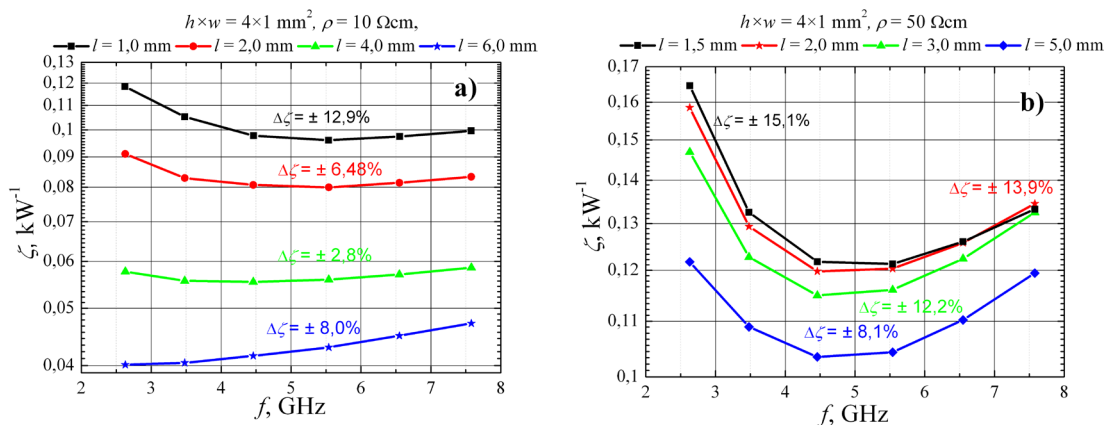
Analizuojant vidutinio elektrinio lauko jautriausioje rezistorinio jutiklio elemente priklausomybę nuo  $l$  (žr. 20b pav.) matyti, kad elektrinio lauko maksimumas maždaug atitinka Fabry-Perot rezonanso padėtį, o minimumas sutampa su atspindžio maksimumu. Sudėtinga būtų jutiklio kūrimui panaudoti Fabry-Perot rezonansą, nes rezonansas yra pakankamai siauras ir pasiekti mažą atspindžio koeficientą visame bangolaidžio WRD250 dažnių ruože būtų neįmanoma. Norėtume atkreipti dėmesį į lauko sustiprėjimą JE, stebimą prie nedidelių  $l$ , kai  $w = 2$  mm. Matyti, kad didėjant JE pločiui  $w$ , šis efektas mažėja, o kai  $w = 11$  mm jis iš vis išnyksta – elektrinio lauko vidurkis JE nebedidėja.

Norėdami išsiaiškinti, kaip JE ilgis įtakoja vidutinio elektrinio lauko jutiklyje pobūdį, mes atlikome tyrimus su  $\rho = 10 \Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos jutikliais. Panaudoti dar didesnio savitojo laidumo bandinius vargu ar būtų įmanoma, norint matuoti kelių mikrosekundžių trukmės mikrobangų impulsus, nes pradėtų reikštis jutiklio kaitimas impulso metu [46].

Tyrimams parinkome  $w = 1$  mm pločio ir skirtingo ilgio  $l$  JE. Skaičiavimo rezultatai yra pateikti 21 pav. Kaip matyti iš 21a pav., trumpo jutiklio atveju



21 pav. Vidutinio normuoto (a) ir vidutinio (b) elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio skirtingo ilgio JE:  $h \times w = 4 \times 1 \text{ mm}^2$ ,  $\rho = 10 \Omega \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 11,9$ . Simboliais pavaizduoti skaičiavimo rezultatai, ištisinė linija – jutiklis, kurio jautris nepriklausytų nuo dažnio. Jutiklių ilgus nurodytas paveiksle.



22 pav. Apskaičiuota RJ jautrio priklausomybė nuo dažnio skirtingo ilgio JE, kai JE skersiniai matmenys  $h \times w = 4 \times 1 \text{ mm}^2$ ,  $\varepsilon = 11,9$ ,  $\rho = 10 \Omega\text{-cm}$  (a),  $\rho = 50 \Omega\text{-cm}$  (b).

( $l = 1 \text{ mm}$ ), vidutinio elektrinio lauko sustiprėjimas bangolaidžio dažnių ruože yra gerokai mažesnis nei tas, kurio reikėtų dažninei charakteristikai išlyginti, tačiau, didėjant jutiklio ilgiui apskaičiuota vidutinio elektrinio lauko priklausomybė artėja prie elektrinio lauko priklausomybės idealiame jutiklyje. Iš 21b pav. matyti, kad keičiant jutiklio ilgį elektrinis laukas JE mažėja, tačiau kreivės pokrypis išlieka toks pats. Dėl to yra stebimas santykinio elektrinio lauko didėjimas aukštų dažnių srityje 21a pav. Panašios tendencijos buvo aprašytos 3.1 skyriuje kuomet buvo nagrinėja santykinio elektrinio lauko JE priklausomybė nuo jutiklio pločio.

3 lentelė. Rezistorinio jutiklio padaryto iš  $h \times w = 4 \times 1 \text{ mm}^2$  n-Si, maksimalus jautrio pokytis ir stovinčios bangos koeficientas esant skirtingiems jutiklių ilgiams ir savitosioms varžoms. Skliausteliuose įrašytos reikšmės gautos modeliuojant jutiklį, kurio aukštis  $h = 3,8 \text{ mm}$ .

$l, \text{ mm}$	$\rho = 10 \Omega\text{-cm}$		$\rho = 20 \Omega\text{-cm}$		$\rho = 50 \Omega\text{-cm}$		$\rho = 100 \Omega\text{-cm}$	
	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	SBK	$\Delta\zeta/\zeta$	SBK	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	SBK	$\Delta\zeta/\zeta$	SBK
1	12,9 (12,3)	1,36	15,1	1,19	12,1	1,14	12,3	1,14
1.5	8,1	1,59	12,9	1,28	15,1	1,21	11,2	1,21
2	6,48	1,79	10,25	1,42	13,9 (12,3)	1,29	10,5	1,29
2.5	5,01	1,98	7,5	1,522	12,9	1,38	14,4	1,37
3	3,89	2,17	6,6	1,62	12,2	1,46	13,9	1,45
4	2,79	2,49	5,29	1,82	11,1	1,62	13,0	1,62
5	4,99	2,76	5,5	2,02	8,12	1,75	12,4	1,79
6	8,02	3,08	6,56	2,22	7,76	1,85	12,1	1,91
7	12,1	3,39	8,45	2,35	7,4	1,9	11,8	1,94



Tai patvirtina ir jautrio tokiam JE skaičiavimai pateikti 3 lentelėje ir 22a pav., kuriuos apskaičiavome pasinaudodami (23) išraiška (44 psl.). Matyti, kad didėjant  $l$ , RJ jautris mažėja. Kai  $l = 4$  mm, jautrio pokytis tirtame dažnių ruože darosi mažiausias, jis neviršija  $\pm 2,8\%$ . Turint omenyje platų bangolaidžio WRD250 dažnių pralaidumo ruožą, tai būtų labai puikus rezultatas.

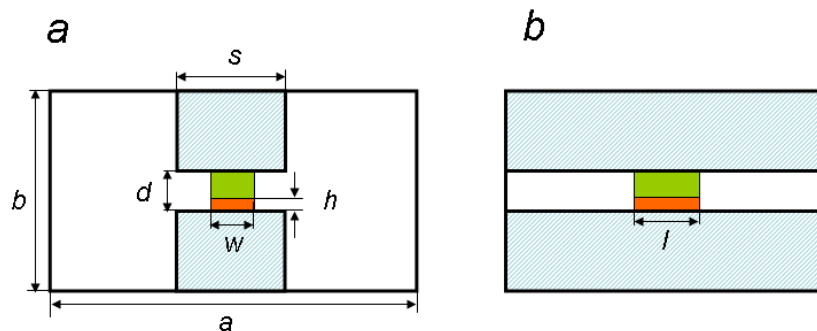
Deja, tenka konstatuoti, kad toks jutiklis vargu ar gali būti panaudotas dėl labai didelio atspindžio. Kaip matyti iš 3 lentelės tokio jutiklio SBK yra apie 2,5 ir tai visiškai nepriimtina metrologiniu požiūriu. Iš tirtųjų darinių, kurių savitoji varža  $\rho = 10 \Omega\cdot\text{cm}$ , būtų panaudoti JE, kurio skersiniai matmenys  $w \times l = 1 \times 1 \text{ mm}^2$ . Jo jautrio pokytis yra  $\pm 12,9\%$ ,  $\text{SBK} < 1,4$ , o varža  $400 \Omega$ .

Mes taip pat tyrinėjome JE pagamintus iš didesnės savitosios varžos (3 lentelė). Įvertinant dažninės charakteristikos netolygumą, atspindžio koeficientą bei JE varžą geriausi rezultatai gauti su  $50 \Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos dariniais, kurių matmenys  $w \times l = 1 \times 3 \text{ mm}^2$ . Tokių jutiklių jautrio pokytis yra  $\pm 13,9\%$ ,  $\text{SBK} < 1,5$ , o varža  $667 \Omega$ . Kaip matyti iš 22b pav., kur parodytos apskaičiuotos jautrio priklausomybės nuo dažnio skirtingo ilgio JE iš  $50 \Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos n-Si, kai  $l = 5$  mm, gaunasi dar mažesnis dažninės charakteristikos netolygumas, tačiau tokio jutiklio SBK per didelis (žr. 3 lentelę).

Šio poskyrio rezultatai buvo publikuoti straipsnyje: Ž. Kancleris, and P. Ragulis. "Interaction of semiconductor sample with TE10 mode in double ridged waveguide." Lithuanian Journal of Physics 52.1 pp. 1-9, (2012).

### **3.2.3 Rezistorinis jutiklis su koncentratoriumi pritaikytas WRD250 bangolaidžiui**

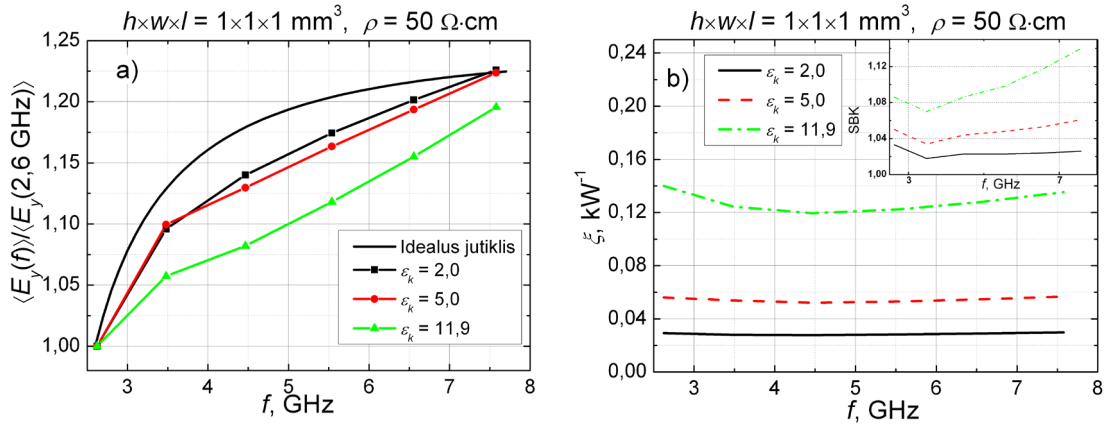
Matydami, jog tolimesnius rezistorinio jutiklio, kurio JE įtvertas skersai H tipo bangolaidžio keterų, tobulinimus stabdo didelis atspindžio koeficiento augimas, buvo nuspręsta darbus tęsti tyrinėjant rezistorinį jutiklį su koncentratoriumi. Tokio jutiklio scheminis vaizdas parodytas 23 pav. Matyti,



23 pav. Jutiklis su koncentratoriumi: (a) vaizdas iš priekio, (b) vaizdas iš šono.

kad tokio jutiklio JE užima tik dalį lango, kitą dalį užpildo dielektrinis koncentratorius. Kaip ir WR90 jutiklio atveju, toks jutiklis yra sudarytas iš dviejų nuolatinės srovės atžvilgiu nuosekliai sujungtų JE. Šie JE vienas nuo kito atskirti plonu dielektriko sluoksniu, kuris skaičiuojant vidutinę elektrinę lauką nėra įskaitomas. Kaip jau buvo parodyta ankstesniame poskyryje patalpinus du nuosekliai sujungtus jutiklius ant metalo keteros vidutinis elektrinis laukas juose yra per silpnas, o jautris per mažas. Todėl, norėdami sustiprinti elektrinę lauką virš jutiklio, yra tvirtinamas dielektrinis koncentratorius, kuris iš vienos pusės, sustiprina lauką JE, tačiau, iš kitos – padidina ir atspindį nuo jo. Norint sustiprinti elektrinę lauką JE, o tuo pačiu ir padidinti jutiklio jautrį, reikėtų naudoti didesnės dielektrinės skvarbos koncentratorių, tačiau tai apribotų skersinius jutiklio matmenis.

Tyrimus pradėjome nuo jutiklio, kurio aukštis  $h = 1$  mm. Skaičiavimus atlikome trijų skirtingų santykinų dielektrinių skvarbų koncentratoriams:  $\varepsilon_k = 2$  (tokių koncentratorių galima pagaminti iš teflono),  $\varepsilon_k = 5$  (stiklo audinio plastinis kompozitas (getinaksas)),  $\varepsilon_k = 11.9$  (silicis). Apskaičiuotos santykinio elektrinio lauko ir jutiklio jautrio priklausomybės nuo dažnio jutikliui skirtingiems  $\varepsilon_k$  yra parodytos 24 pav. Skaičiavimai atlikti JE, kurio matmenys  $h \times w \times l = 1 \times 1 \times 1$  mm<sup>3</sup>. Kaip matyti iš 24a pav. koncentratoriaus dielektrinės skvarbos pokytis žymios įtakos santykiniam elektriniam laukui jutiklyje neturi, bet stebimas nedidelis elektrinio lauko sumažėjimas aukštesnių dažnių srityje. Tačiau iš 24b pav. matyti, kad didėjant koncentratoriaus dielektrinei skvarbai, jutiklio jautris didėja, nes didėja absoliutinė elektrinio lauko vertė jutiklyje. Didinant  $\varepsilon_k$  nuo 2 iki 5 jautris didėja apie du kartus. Panašiai jis didėja lyginant



24 pav. Santykinio elektrinio lauko (a) ir RJ jautrio (b) priklausomybės nuo mikrobangų dažnio, apskaičiuotos RJ, su JE  $h \times w \times l = 1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ ,  $\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ , esant skirtingoms koncentratoriaus dielektrinėms skvarboms. Išnašoje pavaizduotas stovinčios bangos koeficientas

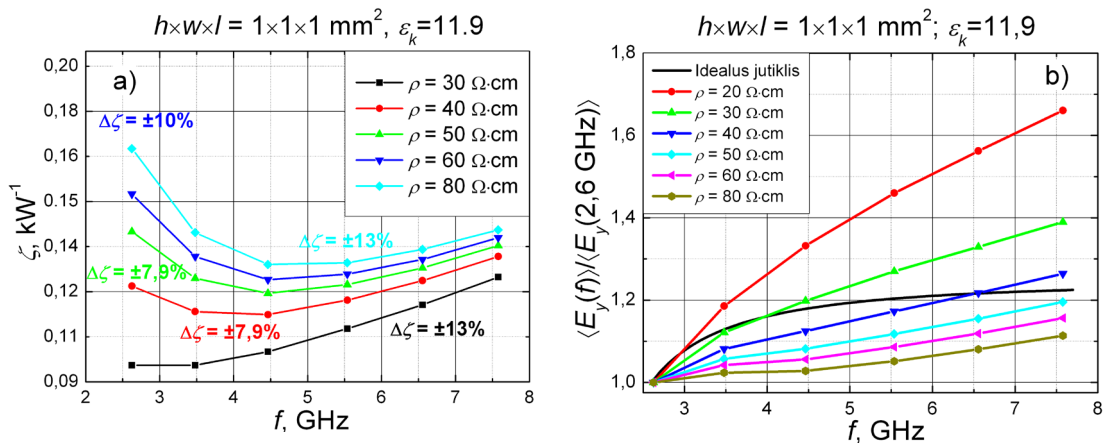
jautrį, kai  $\epsilon_k = 11.9$  su  $\epsilon_k = 5$ . Taigi matome, kad keisdami koncentratoriaus dielektrinę skvarbą, galime sustiprinti elektrinį lauką jutiklyje, tuo pačiu padidinti RJ jautrį.

RJ jautris taip pat didėja didinant JE savitąją varžą, tačiau keičiasi ir jautrio kitimo pobūdis. Keičiant jutiklio  $\rho$ , galima pasiekti minimalų dažninės charakteristikos netolygumą bangolaidžio dažnių ruože 25b pav. Norint suprasti, kodėl stipriai keičiasi jutiklio jautris žemų dažnių srityje (25a pav.) reikia plačiau panagrinėti laidumo (26) ir slinkties (27) srovės kintamame elektriniame lauke  $E = E_0 \sin \omega t$ :

$$j_L = \frac{E_0 \sin \omega t}{\rho} \quad (26)$$

$$j_{SL} = E_0 \epsilon \epsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (27)$$

Sulyginę laidumo ir slinkties srovių amplitudes nesunkiai galime suskaičiuoti dažnį, kuriame šios dvi srovės susilygina ir taip įvertinti laidumo ir slinkties srovių įtaką skirtingos savitosios varžos jutikliams ( $30 - 80 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ). Matyti, kad aukštadažninėje srityje (7,5 GHz) JE dominuoja slinkties srovės, kai tuo tarpu žemadažninėje srityje (2,6 GHz) riba, kai slinkties ir laidumo srovės susilygina, yra apie  $60 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ . Iš 25a pav. galima matyti, kad, didinat jutiklio savitąją varžą, žemadažninėje srityje pradeda vis labiau pasireikšti slinkties srovė, todėl elektrinis laukas jutiklyje, o tuo pačiu ir jo jautris pradeda didėti. Dėl tokių dažninės charakteristikos pokyčių maždaug ties  $\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$



25 pav. Apskaičiuota jutiklio jautrio (a) ir santykinio elektrinio lauko (b) priklausomybės nuo dažnio RJ, su JE  $h \times w \times l = 1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , kai  $\epsilon_k = 11,9$  prie skirtingų JE savitųjų varžų.

stebimas mažiausias dažninės charakteristikos netolygumas. Savaime suprantama, kad slinkties ir laidumo srovių įtaka nėra vienintelis faktorius įtakojantis dažninę RJ charakteristiką. Išnašoje 24b pav. parodyta jutiklių SBK priklausomybė nuo dažnio. Matyti, kad atspindį nuo RJ iš esmės sąlygoja koncentrorius, nes didėjant jo  $\epsilon_k$ , didėja atspindys nuo RJ, tuo tarpu kai keičiama jutiklio savitoji varža SBK kitimas nėra didelis. Dėl mažų skersinių jutiklio matmenų, netgi didžiausio  $\epsilon_k$  jutiklio atspindys yra pakankamai mažas.

Turėdami omenyje šias tendencijas atlikome skaičiavimus ir prie didesnių JE skersinių matmenų, kai jutiklio aukštis kito nuo  $h = 0,5 \text{ mm}$  iki  $h = 1 \text{ mm}$ . Skaičiavimus atlikome tol, kol  $SBK < 1,5$ . Apskaičiuotų mažiausių dažninės charakteristikos netolygumų rezultatai pateikti 4 lentelėje. Pirmame lentelės stulpelyje nurodyti skersiniai JE matmenys. Kiekvienai skirtingai koncentroriaus dielektrinei skvarbai paskirta po du stulpelius. Pirmajame įrašytas mažiausias apskaičiuotas dažninės charakteristikos netolygumas procentais, o antrajame – jam atitinkanti jutiklio savitoji varža. Tame pačiame stulpelyje skliausteliuose įrašyta suminė tokio jutiklio varža  $k\Omega$ . Skaičiuojant jutiklio varžą yra atsižvelgiama, kad rezistorinis jutiklis yra padarytas iš dviejų tarpusavyje nuosekliai sujungtų jautriųjų elementų, kurių plotis yra lygus  $w/2$ . Kaip matyti iš lentelės, mažesnis JE dažninės charakteristikos netolygumas pasiekiamas, kai koncentroriaus dielektrinė skvarba  $\epsilon_k$  yra mažesnė.

Apžvelgus suminę JE varžą, matyti, kad kai jutiklio aukštis  $h = 1$  mm, tik jutikliams su mažesnės dielektrinės skvarbos koncentratoriais varža neviršija 1 k $\Omega$ . Tačiau iš 24b matome, kad tokių jutiklių jautris yra keletą kartų mažesnis lyginant su didelės dielektrinės skvarbos koncentratoriais. Todėl panašius skaičiavimus atlikome su jutikliais, kurių aukštis  $h = 0,5$  mm, tokiu būdu tikėdamiesi sumažinti ir jutiklio varžą, tačiau iš gautų rezultatų matyti (4

4 lentelė. JE savitoji varža, kuriai esant stebimas mažiausias dažninės charakteristikos netolygumas skirtingo skerspjuvio 1 mm aukščio jutikliams su skirtingos dielektrinės skvarbos koncentratoriais. Skliausteliuose nurodyta suminė jutiklių varža k $\Omega$ .

$h = 0,5$ mm						
$w \times l, \text{mm}^2$	$\epsilon_k = 2$		$\epsilon_k = 5$		$\epsilon_k = 11,9$	
	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$
1×1	±4.4	60 (1.2)	±4.5	60 (1.2)	±5.9	70 (1.4)
1×1.5	±5.4	60(800)	±4.6	70(933)	±7.1	90(1.2)
1×2	±4.5	80(800)	±5.2	80(800)	±8.2	130(1.3)
1×3	±7.5	110(733)	±6.5	90(600)	±9.5	170(1.13)
2×1	±3.7	70(700)	±5.1	70(700)	±9.4	80(800)
2×2	±5.8	90(450)	±6.7	100(500)	±12.3	170(SBK>1.5)
2×3	±9.9	260(866)	±8.2	160(533)		
3×1	±4.1	70(466)	±5.4	80(533)	±9.7	140(933)
3×2	±6.3	100(333)	±7.3	130(433)		
$h = 1,0$ mm						
$w \times l, \text{mm}^2$	$\epsilon_k = 2$		$\epsilon_k = 5$		$\epsilon_k = 11,9$	
	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$
1×1	±3,5	50 (2,0)	±4,3	50 (2,0)	±7, 2	50 (2,0)
1×1.5	±4,5	60 (1,6)	±6,4	50 (1,3)	±7,6	60 (1,6)
1×2	±5,0	60 (1,2)	±7,1	60 (1,2)	±7,9	100 (2,0)
1×3	±6,1	80 (1,1)	±8,0	60 (0,8)	±9,3	150 (2,0)
2×1	±4,0	60 (1,2)	±7,0	50 (1,0)	±7,7	100 (2,0)
2×2	±5,6	80 (0,8)	±6,9	100 (1,0)	±11,7	150 (1,5)
2×3	±9,8	80 (0,5)	±8,7	60 (1,0)		
3×1	±4,8	60 (0,8)	±6,7	60 (0,8)	±9,2	160 (2,1)
3×2	±7,4	70 (0,5)	±8	125 (0,8)		

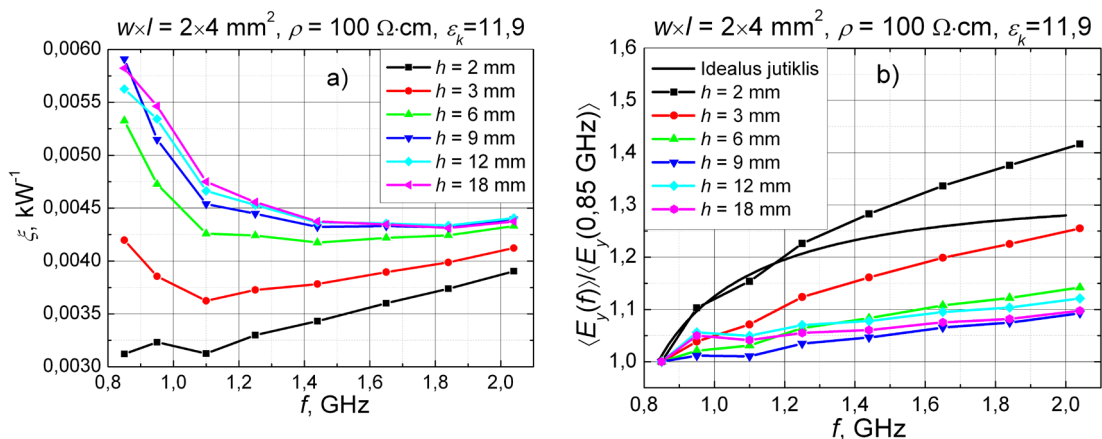
lentelė), kad dvigubai žemesnių jutiklių mažiausias dažninės charakteristikos netolygumas gaunasi panašus. Tačiau jis šiek tiek stumiasi į didesnių  $\rho$  pusę, todėl gauti dvigubai mažesnę jutiklio varžą ne visada pasiseka.

Apžvelgus gautus rezultatus buvo nuspręsta, jog tolimesniems praktiniams tyrimams tinkamiausias yra jutiklis kurio matmenys  $h \times w \times l = 0,5 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ , JE savitoji varža  $\rho = 80 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ , o koncentratoriaus dielektrinė skvarba  $\varepsilon_k = 11,9$ . Tokio jutiklio varža  $R = 0,8 \text{ k}\Omega$ , o jautrio pokytis visame bangolaidžio dažnių diapazone  $\Delta\zeta/\zeta = \pm 9,4 \%$ .

### **3.2.4 Rezistorinis jutiklis pritaikytas WRD840 bangolaidžiui su koncentratoriumi**

Kaip jau anksčiau buvo minėta elektromagnetinio atsparumo tyrimams reikalingi jutikliai dirbantys 1-10 GHz dažnių ruože. Todėl atlikę WRD250 rezistorinio jutiklio optimizavimo skaičiavimus, pradėjome jutiklio pritaikyto WRD840 bangolaidžiui tyrimus. Tokio jutiklio veikimo dažnių ruožas yra nuo 0,84 GHz iki 2,0 GHz. Iš 2 lentelės matome, kad šio bangolaidžio  $f_{min}/f_{max} = 2,4$ , kai tuo tarpu WRD250 bangolaidžiui šis santykis siekia 3,0. Todėl, dėl mažesnio pralaidos dažnių ruožo galime tikėtis, kad jutiklio optimizacijos uždavinys bus lengvesnis.

Jutiklio optimizaciją pradėjome nuo optimalaus jutiklio aukščio paieškos. Kadangi šiame bangolaidyje atstumas tarp metalinių keterų siekia beveik 40 mm, todėl JE aukštį galima keisti plačiose ribose. Pradiniams modeliavimams buvo pasirinktas jutiklis iš  $\rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos silicio, kurio skersiniai matmenys  $w \times l = 2 \times 4 \text{ mm}^2$ . Iš modeliavimo rezultatų pateiktų 26a pav. matyti, kad didinant jutiklio aukštį iki 6 mm jautris didėja visame dažnių diapazone. Toliau didinant JE aukštį jautris pradeda didėti tik žemų dažnių srityje 0,8 GHz – 1 GHz. Panaši tendencija matyti ir iš 26b pav., kur atidėta santykinio elektrinio lauko jutiklyje priklausomybė nuo dažnio. Tačiau paskaičiavus šių jutiklių varžas matyti, kad praktiškai visų jutiklių varžos viršijo 1 k $\Omega$  ribą, tik jutiklio kurio  $h = 2 \text{ mm}$  varža buvo  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Todėl,



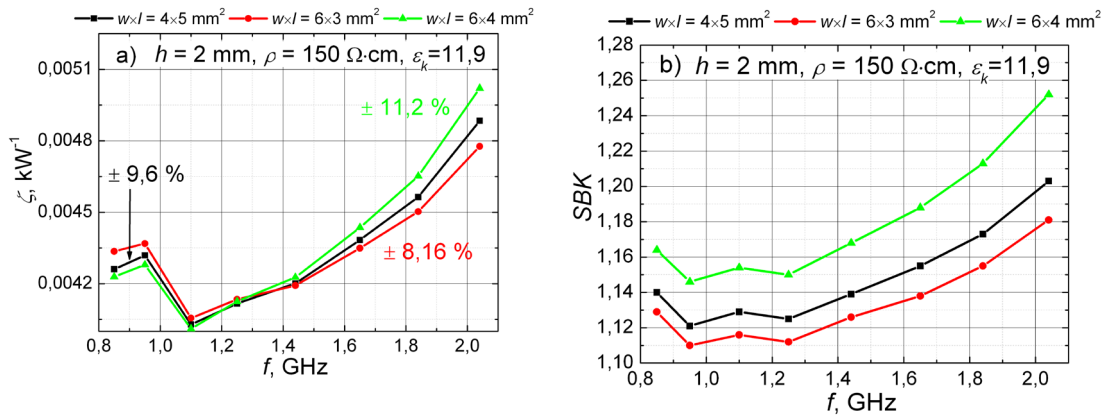
26 pav. Rezistorinio jutiklio patalpinto WRD840 jautrio (a) ir santykinio elektrinio lauko (b) priklausomybės nuo mikrobangų dažnio esant skirtingiems jutiklio aukščiams  $h$ .

atsižvelgdami į praeitame skyriuje pastebėtą tendenciją, jog mažinant JE savitąją varžą santykinis varžos pokytis didelių dažnių srityje kyla, buvo nuspręsta tolimesnius tyrimus atlikti su jutikliu, kurio aukštis  $h = 3$  mm.

Iš rezultatų pateiktų 5 lentelėje matyti, kad kaip ir jutiklio, pritaikyto WRD250 bangolaidžiui atveju, optimizuojant WRD840 jutiklį jautrio pokytį riboja išaugusi suminė JE varža, kuri dažnai viršija 1 kΩ. Lentelėje pateiktas santykinis jautrio pokytis bangolaidžio dažnių pralaidos ruože, rezultatai pateikti dešiniau paryškintos linijos atitinka jutiklius, kurių varža  $R > 1$  kΩ. Iš čia matyti, kad, kai jutiklio plotis yra  $w = 4$  mm, tik keleto matmenų jutiklių jautrio pokytis būtų mažesnis nei 10 %, o varža neviršytų 1 kΩ. Atlikus tokius pat skaičiavimus su jutikliais, kurių plotis yra 2 mm, 6 mm ir 8 mm (27 pav.) buvo nustatyta, kad geriausi rezultatai stebimi jutikliams kurių savitoji varža  $\rho = 150 \Omega \cdot \text{cm}$ .

5 lentelė. WRD840 bangolaidžiui pritaikyto jutiklio santykiniai jautrio pokyčiai, kai JE aukštis  $h = 3$  mm, o koncentratoriaus dielektrinė skvarba  $\epsilon_k = 11,9$ .

$w = 4$ mm						
$l, \text{ mm}$	50 $\Omega \cdot \text{cm}$	90 $\Omega \cdot \text{cm}$	100 $\Omega \cdot \text{cm}$	120 $\Omega \cdot \text{cm}$	150 $\Omega \cdot \text{cm}$	200 $\Omega \cdot \text{cm}$
	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$	$\Delta\zeta/\zeta, \%$
2	32,5	8,93	6,79	4,26	7,05	10,0
3	38,1	16,11	12,2	8,31	4,82	8,03
4	42,1	18,7	14,9	10,4	6,66	6,62
5	44,9	23,6	19,6	13,6	9,6	5,82
6	46,9	26,19	22,3	15,8	11,4	7,5



27 pav. Rezistorinių jutiklių įmontuotų į WRD840 bangolaidį ir pagaminti iš  $\rho = 150 \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos silicio jutiklių jautrio (a) ir stovinčios bangos koeficiento (b) priklausomybės nuo dažnio.

Rezistorinių jutiklių, pagamintų iš  $150 \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos silicio jautrio ir stovinčios bangos koeficiento priklausomybės nuo dažnio pateiktos 27 pav. Iš 27a pav. matyti, kad mažiausią jautrio pokytį demonstruoja jutiklis, kurio skersiniai matmenys  $w \times l = 6 \times 3 \text{ mm}^2$ . Apskaičiuotos jutiklių atspindžio koeficiento priklausomybės nuo dažnio yra parodytos 27b pav. Matyti, kad atspindys nuo minėto jutiklio yra pakankamai mažas, o stovinčios bangos koeficientas yra gerokai mažesnis už 1,5. Todėl šis jutiklis būtų tinkamiausias tolimesniems eksperimentiniams tyrimams.

### 3.2.5 Rezistorinis jutiklis sujungtas su ruporine antena

Rezistorinį jutiklį naudojant elektromagnetinio atsparumo tyrimams dažniausiai tenka matuoti atviroje erdvėje sklindančio mikrobangų impulso galios tankį arba elektrinio lauko stiprį. Tokiu atveju, rezistorinis jutiklis yra jungiamas prie ruporinės antenos. Kadangi antenų stiprinimas priklauso nuo dažnio, todėl galima taip parinkti jutiklio parametrus, kad jutiklio, sujungto su ruporine antena (prietaiso skirtu matuoti elektrinio lauko stiprį atviroje erdvėje) jautris nepriklausytų nuo dažnio. Tokios sistemos jautrį galime apibrėžti kaip rezistorinio jutiklio jautrio sandaugą su antenos efektyviu plotu:

$$\chi = \zeta \cdot S_{eff}, \quad (28)$$



čia  $S_{eff}$  – antenos efektyvusis plotas. Jeigu į antenos apertūrą krenta mikrobangų spinduliuotė, kurios galios tankis  $W$ , tai galia patenkanti į anteną, o tuo pačiu ir į prie jos prijungtą jutiklį bus:

$$P = S_{eff} \cdot W. \quad (29)$$

Iš kitos pusės efektyvų antenos plotį galime išreikšti per jos stiprinimo koeficientą  $G$  [73]:

$$S_{eff} = \frac{G\lambda^2}{4\pi}. \quad (30)$$

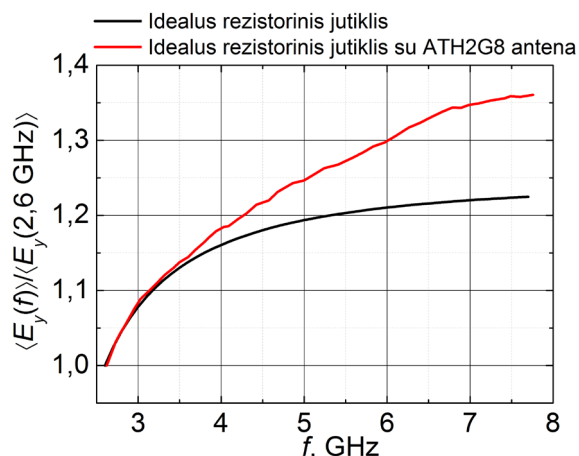
Įstatę antenos efektyvaus ploto išraišką (30) ir rezistorinio jutiklio H tipo bangolaidyje jautrį (23) (44 psl.) į (28) galime užrašyti sistemos sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos jautrio priklausomybę nuo dažnio:

$$\chi(f) = \frac{3\beta E_0^2}{2P_\infty} \times \frac{1}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \times \frac{\langle E(f) \rangle^2}{E_0^2} \times G(f) \cdot \lambda(f)^2. \quad (31)$$

Pasinaudodami ankstesniuose poskyriuose aprašytu principu, nesunkiai galime surasti santykinio elektrinio lauko priklausomybę nuo dažnio idealioje sistemoje, kurios jautris nepriklauso nuo dažnio, skirtoje elektrinio lauko atviroje erdvėje matavimams ir susidedančios iš ruporinės antenos ir prie jos prijungto rezistorinio jutiklio:

$$\frac{\langle E(f) \rangle}{\langle E(f_{min}) \rangle} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_{min}}\right)^2}} \times \frac{G(f_{min})}{G(f)} \times \frac{f}{f(f_{min})}. \quad (32)$$

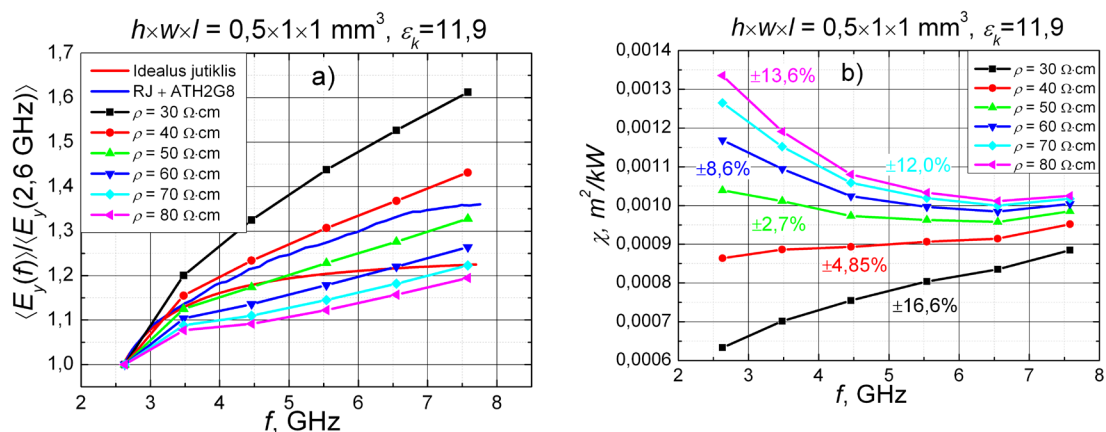
Pasinaudodami internete pateikto firmos „Amplifier research“ kalibruotos ruporinės antenos ATH2G8 stiprinimo koeficiento priklausomybę nuo dažnio mes apskaičiavome kaip turėtų keistis vidutinis elektrinis laukas jutiklyje, kad sistemos, sudaryto iš tokios antenos ir rezistorinio jutiklio, jautris nepriklaustų nuo dažnio. Tokio skaičiavimo pagal (32) formulę rezultatas, kartu su idealaus rezistorinio jutiklio WRD250 bangolaidyje anksčiau apskaičiuota kreive yra parodytos 29 paveiksle. Palyginus šias dvi kreives matyti, jog norint, kad sistemos jautris nepriklaustų nuo dažnio, elektrinis laukas jutiklio JE



29 pav. Santykinio elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio idealiaame rezistoriniame jutiklyje ir elektrinio lauko stiprio matuoklyje sujungtame su firmos „Amplifier Research“ ATH2G8 antena.

aukštuose dažniuose turėtų būti 1,36 karto didesnis nei žemuose dažniuose. Taigi jis turėtų sustiprėti daugiau nei optimizuotame RJ pritaikytam matuoti mikrobangų impulsus sklindančius WRD250 bangolaidžiu. Iš kitos pusės matyti, kad elektrinio lauko stiprėjimas JE pritaikytame atlikti matavimus su ruporine antena ATH2G8 yra gerokai tolygesnis, todėl manome, kad yra plačios galimybės rezistorinių jutiklių charakteristikų derinimui su antenų charakteristikomis.

Kadangi idealiai sistemai, sudarytai iš RJ ir ruporinės antenos, reikalingas didesnis elektrinio lauko didėjimas JE visame dažniu ruože lyginant su bangolaidiniu jutikliu, galime daryti išvadas, kad norint gauti nuo dažnio nepriklausančią sistemą turėtume mažinti jutiklio savitąją varžą arba didinti skersinius jutiklio matmenis (plotį  $w$  ar ilgį  $l$ ). Todėl galime tikėtis gauti



28 pav. Santykinio elektrinio lauko (a) ir sistemos, sudarytos iš RJ ir ruporinės antenos, jautrio (b) priklausomybė nuo dažnio RJ sujungtas su „Amplifier research“ antena ATH2G8.

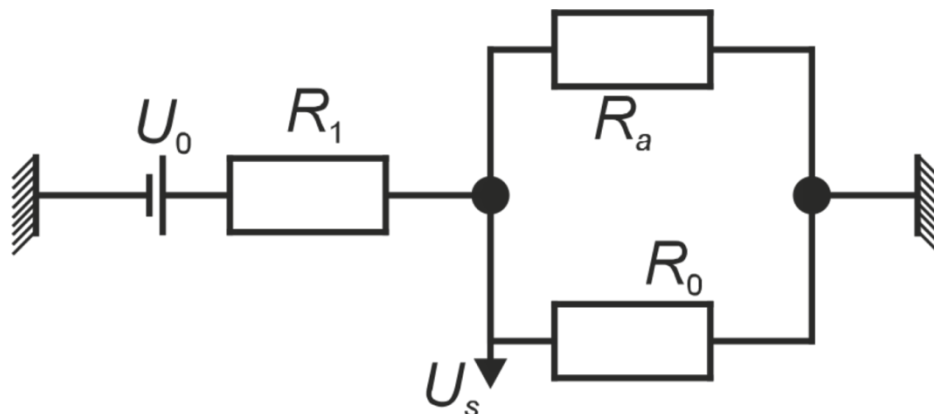
rezistorinį jutiklį su mažesne varža, tačiau su šiek tiek didesniu stovinčios bangos koeficientu. Matyti, kad dėl padidėjusio stovinčio bangos koeficiento tokiam jutikliui negalėsime panaudoti JE įtvorto skersai bangolaidžio. Tačiau, tokiuose matuokliuose sėkmingai galėtų būti panaudojami jutikliai su koncentratoriumi, aprašyti poskyryje 3.2.3.

Atlikę papildomus modeliavimus jutikliams su koncentratoriumi gavome neblogus rezultatus. 28a pav. parodyta rezistorinio jutiklio, kurio matmenys  $h \times w \times l = 0,5 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , santykinio elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio skirtingos savitosios varžos jutikliams. Matome, kad jei bangolaidiniam jutikliui artimiausia idealiam jutikliui elektrinio lauko priklausomybė nuo dažnio gaunasi tuomet, kai jutiklio savitoji varža  $\rho = 70 \Omega \cdot \text{cm}$ . Sistemai su antena ATH2G8 geriausiai tiktų jutiklis, kurio savitoji varža būtų  $\rho = 50 \Omega \cdot \text{cm}$ . Todėl jutiklio varža sumažėtų nuo 1,4 k $\Omega$  (geriausias bangolaidinis jutiklis) iki 1,0 k $\Omega$ , kai rezistorinis jutiklis sujungtas su rupuorine antena. 28b pav. parodyta tokios sistemos jautrio priklausomybė nuo dažnio. Iš čia matyti, kad kai RJ padarytas iš  $\rho = 50 \Omega \cdot \text{cm}$  JE jautrio pokytis WRD250 bangolaidžio dažnių ruože yra tik  $\pm 2,7\%$ . Kai tuo tarpu rezistorinio jutiklio nesujungto su rupuorine antena mažiausias jautrio pokytis yra  $\pm 5,9\%$ , kai JE savitoji varža yra  $\rho = 70 \Omega \cdot \text{cm}$ . Iš čia matyti, kad sujungiant RJ su rupuorine antena įmanoma pagerinti ir jutiklio varžą, ir sumažinti jautrio priklausomybę nuo dažnio. Todėl šie preliminarūs tyrimai demonstruoja puikias galimybes derinti rezistorinius jutiklius ir su rupuorinėmis antenomis ir tokiu būdu konstruoti sistemas su plokščia dažnine charakteristika skirtas mikrobangų impulsams matuoti atviroje erdvėje.

## 4 Eksperimento metodikos

Šiame skyriuje aprašomos metodikos, kurios buvo naudotos rezistorinio jutiklio charakteristikoms matuoti, bei metodika, kuri buvo taikoma elektroninės aparatūros atsparumo DGM spinduliuotei tyrimuose, panaudojant rezistorinius jutiklius. Pirmajame poskyryje aprašoma rezistorinio jutiklio jautrio dažninės charakteristikos matavimo metodika naudojant mažos galios mikrobangų signalų generatorių. Paskesniame poskyryje pateikta metodika skirta jutiklio išėjimo signalo priklausomybei nuo mikrobangų impulsų galios nustatyti. Trečiajame poskyryje aprašoma rezistorinio jutiklio pritaikyto WR90 bangolaidžiui jautrio priklausomybės nuo dažnio matavimo metodika. Ketvirtajame poskyryje aprašoma sistemos sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos jautrio matavimo metodika. Skyriaus gale aprašyta rezistorinių jutiklių gamybos technologija.

Norint išmatuoti jutiklio jautrį mikrobangų elektriniame lauke, jis yra įjungiamas į nuolatinės srovės grandinę. 30 pav. yra pavaizduota ekvivalentinė jutiklio jungimo schema, kurioje be jutiklio varžos nesant mikrobangų impulsui  $R_0$  yra pavaizduota matavimo prietaiso vidaus varža  $R_a$  ir srovės šaltinio vidaus varža  $R_1$ . Pažymėjus jutiklio varžos pokytį paveikus mikrobangų impulsui  $\Delta R$ , o įtampą krentančią ant jutiklio –  $U_0$ , išėjimo signalą galime užrašyti:



30 pav. Ekvivalentinė rezistorinio jutiklio atsako į mikrobangų impulsą matavimo schema, jutiklio maitinimui panaudojant pastovios įtampos daliklį. Schemoje  $R_1$  – srovės generatoriaus vidaus varža,  $R_a$  – matavimo prietaiso įėjimo varža,  $R_0$  – jutiklio varža.

$$U_s = \frac{U_0 \frac{\Delta R}{R_0}}{1 + \left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_a}\right) \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right)} \quad (33)$$

o santykinę varžos pokytį:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{U_s}{U_0} \frac{1 + \frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_a}}{1 - \frac{U_s}{U_0} \left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_a}\right)} \quad (34)$$

Įstatę gautąją išraišką į (17) (30 psl.), gautume formulę jutiklio jautriui apskaičiuoti iš eksperimentiškai nustatomų dydžių:

$$\zeta = \frac{U_s}{U_0 P} \frac{1 + \frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_a}}{1 - \frac{U_s}{U_0} \left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_a}\right)} \quad (35)$$

Eksperimento sąlygos dažniausiai yra parenkamos taip, kad tiek srovės šaltinio vidaus varža, tiek ir matavimo prietaiso įėjimo varža yra daug didesnės už jutiklio varžą  $R_1 \gg R_0$ ,  $R_a \gg R_0$  tuomet (35) išraiška supaprastėja:

$$\zeta = \frac{U_s}{U_0 P} \quad (36)$$

Gautąją išraišką naudosime jutiklio jautriui apskaičiuoti, kai matuosime rezistorinio jutiklio išėjimo signalą, jutiklį veikiant didelės galios mikrobangų impulsais.

#### 4.1 Rezistorinio jutiklio dažninės charakteristikos matavimas

Norint išmatuoti rezistorinio jutiklio jautrio dažninę priklausomybę, tenka naudoti mažo galingumo mikrobangų signalų generatorių. Todėl, norint padidinti matavimų jautrumą naudojama pasikartojančių impulsų seka, o signalui matuoti – sinchroninis stiprintuvas. Panaudojant tokią metodiką nesunkiai pavyksta išmatuoti signalą, kurio amplitudės yra kelių  $\mu\text{V}$  eilės.

Šiuose eksperimentuose buvo tenkinamos sąlygos  $R_1 \gg R_0$  ir  $R_a \gg R_0$ , todėl iš (33) formulės gauname, jog matuojamas signalas yra proporcingas santykiniam varžos pokyčiui:

$$U_s = U_0 \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (37)$$

Atliekant eksperimentus su pasikartojančių impulsų seka, kurių trukmė  $\tau$ , o pasikartojimo periodas  $T$ , išėjimo signalą reikia padauginti iš funkcijos  $f(t)$ :

$$U_s = U_0 \frac{\Delta R}{R_0} f(t). \quad (38)$$

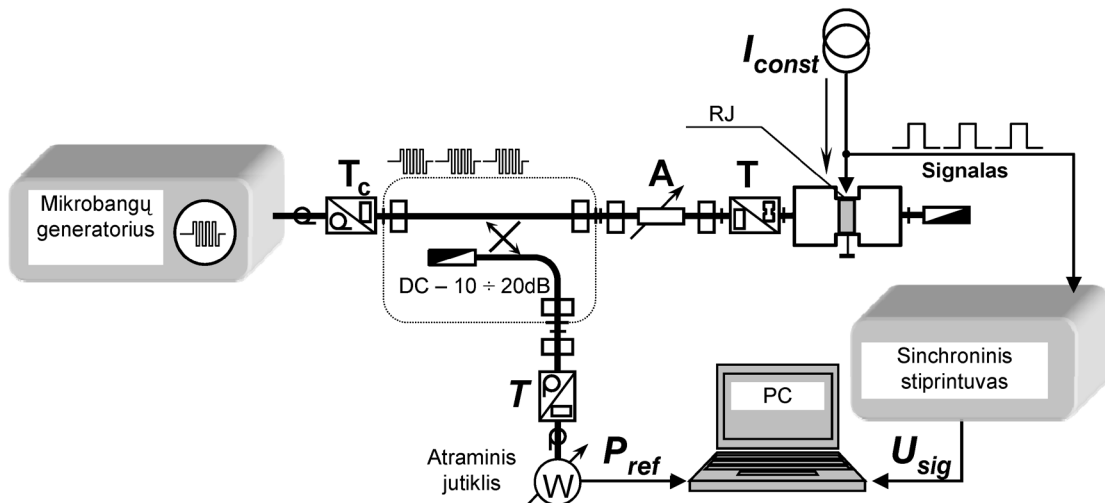
Šios funkcijos reikšmė yra 1, kai jutiklis yra paveikiamas mikrobangų impulsu, ir 0, kai impulso nėra. Tokią periodinę funkciją galėtume skelsti Furjė eilute, o skleidinys pasikartojančių impulsų sekai turėtų tokį pavidalą:

$$f(t) = \frac{\tau}{T} \left[ 1 + 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right)}{\frac{k\pi\tau}{T}} \cos\left(\frac{k2\pi t}{T}\right) \right]. \quad (39)$$

Nesunku matyti, kad didžiausias signalas būtų gaunamas tuomet, kai į jutiklį bus paduotas meandru moduluotas mikrobangų impulsas:  $T = 2 \cdot \tau$ . Signalų priklausomybė nuo laiko  $1/T$  dažnyje:

$$U_s(t) = \frac{2}{\pi} U_0 \frac{\Delta R}{R_0} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = U_m \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (40)$$

kur  $U_m$  yra amplitudinė matuojamo signalo vertė. Kadangi sinchroninis stiprintuvas matuoja efektyvią signalo vertę, tai:



31 pav. Jutiklio jautrio tyrimo blokinė schema naudojant meandru moduluotą mažos galios mikrobangų generatorių: RJ yra pažymėtas tiriamasis jutiklis, DC – kryptinis šakotuvas, A – keičiamo slopinimo precizinis atenuatorius,  $T_c$  – perėjimas iš koaksialiosios linijos į stačiakampį bangolaidį, T – perėjimas iš stačiakampio į H bangolaidį, W – atraminis vidutinę galią matuojantis „Rhode & Schwarz“ jutiklis. Tiriamojo jutiklio signalas matuojamas su sinchroniniu stiprintuvu, išėjimo signalo ir mikrobangų galios matavimo rezultatai apdorojami kompiuteryje.

$$U_m^{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_0 \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (41)$$

Iš (41) išreikšę  $\Delta R/R_0$  ir statydami ją į (17) (30 psl.) gausime išraišką aprašančią rezistorinio jutiklio jautrį, kai signalas yra matuojamas su sinchroniniu stiprintuvu:

$$\zeta = \frac{\pi U_m^{eff}}{\sqrt{2} U_0 P}. \quad (42)$$

Eksperimentinė schema skirta rezistorinio jutiklio jautrio dažninės charakteristikos matavimui su sinchroniniu stiprintuvu pavaizduota 31 pav. Analoginis signalų generatorius Agilent E8257D naudojamas mikrobangų generacijai. Jo maksimali išėjimo galia yra 25 dBm (320 mW), todėl jutiklio jautrio matavimui naudojamas Stanford Research Systems sinchroninis stiprintuvas SR830 DSP. Signalų generatoriaus generuojami impulsai buvo moduluojami  $f = 10$  kHz pasikartojimo dažnio meandro impulsais ir skleidžiami į koaksialinę liniją. Iš koaksialinės linijos per koaksialinį-bangolaidinį perėjimą impulsai patekdavo į stačiakampį bangolaidį. Galia, sklindanti bangolaidžiu, yra matuojama vidutinės galios Rhode & Schwarz mikrobangų jutikliu, kuris prie pagrindinio trakto buvo prijungtas naudojant bangolaidinį šakotuvą. Už bangolaidinio šakotuvo yra statomas perėjimas iš stačiakampio į H tipo bangolaidį ir tiriamasis rezistorinis jutiklis. Prie jutiklio yra prijungiamas srovės generatorius, kurio srovė nustatoma tokia, jog ant jutiklio būtų  $U_0 = 10$  V įtampos kritimas. Su sinchroniniu stiprintuvu išmatavę jutiklio signalą ir suskaičiavę mikrobangų, sklindančių pagrindiniame trakte, impulsinę galią, rezistorinio jutiklio jautrį apskaičiuosime pasinaudodami (42) formule.

Baigiant šį poskyrį reikėtų įvertinti paklaidas atsirandančias matuojant rezistorinių jutiklių dažninę charakteristiką. Didžiausią įtaką jautrio matavimo tikslumui įneša galios nustatymas pagrindiniame trakte, nes šiuo atveju reikia atsižvelgti ne tik į galios matuoklio, naudojamo bangolaidžio atšakoje, paklaidas bet ir į šakotuvo charakteristikos matavimų paklaidas. Yra žinoma, kad apie  $\pm 0,1$  dB paklaidą į bangolaidinius matavimus įneša kiekvienas

bangolaidžio jungties perjungimas. Iš ilgametės praktikos esame nustatę, kad su mūsų naudojamais šakotuvais ir galios matuokliais, galingumą pagrindinėje atšakoje mes galime išmatuoti su  $\pm 3\%$  paklaida. Pasinaudojant, santykinės netiesioginių matavimų neapibrėžties skaičiavimo išraiška [74], jautrio neapibrėžtį, matuojant jautrį su sinchroniniu stiprintuvu, galime užrašyti:

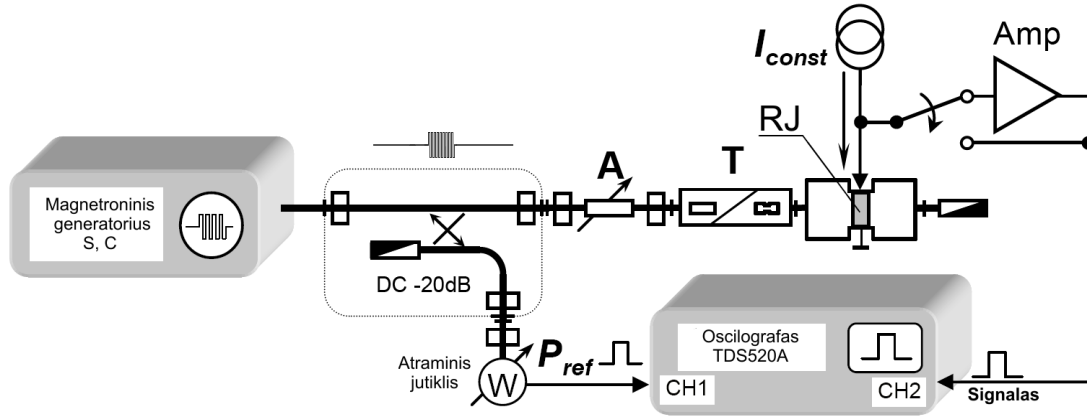
$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_m^{eff}}{U_m^{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2}, \quad (43)$$

čia  $U_0 = 10\text{ V}$ ,  $\Delta U_0 = 80\text{ mV}$ ,  $U_m^{eff} = 150 - 20\ \mu\text{V}$ ,  $\Delta U_m^{eff} = 1 - 0.1\ \mu\text{V}$ ,  $P = 200 - 55\text{ mW}$ ,  $\Delta P = 6 - 1.5\text{ mW}$ .

## 4.2 Rezistorinio jutiklio varžos pokyčio nustatymas naudojant didelės galios mikrobangų impulsus

Rezistorinio jutiklio, patalpinto H tipo bangolaidyje, jautrį taip pat galima matuoti jutiklį veikiant DGM impulsais. Tokio matavimo schema pavaizduota 32 pav. Šiuo atveju mikrobangų generavimui yra naudojamas magnetroninis generatorius. Kadangi magnetronas generuoja tik vieno dažnio mikrobangų impulsus, todėl norint išmatuoti jautrį keliuose dažniuose reikia pakeisti magnetroną, o taip pat ir pačią perdavimo liniją. Sukurtųjų jutiklių išėjimo signalo priklausomybei nuo mikrobangų impulsų galios matuoti mes panaudojome DGM impulsų magnetroninius generatorius veikiančius S (2.75 GHz) ir C (5.7 GHz) dažnių ruožuose. Mikrobangų impulsų trukmė buvo 4  $\mu\text{s}$ , o pasikartojimo dažnis – 25 Hz. Matavimo schema yra labai panaši į prieš tai aptartą schemą (31 pav.). Tačiau šiuo atveju mikrobangų galią pagrindiniame trakte kontroliuojame su kalibruotu rezistoriniu jutikliu prijungtu prie pagrindinio trakto per šakotuvą. Jutiklis yra maitinamas srovės šaltinio, o įtampos kritimas ant jutiklio  $U_0 = 10\text{ V}$ . Jutiklio ir atraminiai signalai matuojami dviejų kanalų oscilografu Tektronix TDS520A. Esant mažam jutiklio signalui, buvo naudojamas papildomas impulsinis stiprintuvas, kurio stiprinimas  $K = 10$ . Preciziniu atenuatoriumi keičiant patenkančio į jutiklį mikrobangų impulso galią buvo išmatuojama išėjimo signalo





32 pav. Jutiklio išėjimo signalo matavimo blokinė schema, naudojant didelės galios mikrobangų impulsų generatorius, S ir C dažnių ruožuose: RJ yra pažymėtas tiriamasis jutiklis, DC – kryptinis šakotuvas, A – keičiamo slopinimo precizinis atenuatorius, T – perėjimas iš stačiakampio į H bangolaidį, Amp – impulsinių signalų stiprintuvas, W – atraminis rezistorinis jutiklis.

priklausomybė nuo  $P$ . Stačiakampių bangolaidžių naudojamų eksperimentuose dydžiai buvo  $72 \times 34 \text{ mm}^2$  S dažnių ruožui (WR159) ir  $40 \times 20 \text{ mm}^2$  C ruožui (WR187).

Atliekant tokius matavimus, kaip taisyklė buvo tenkinamos sąlygos  $R_1 \gg R_0$  ir  $R_a \gg R_0$ , todėl išmatavus  $U_s$  priklausomybę nuo mikrobangų impulsų galios nesunkiai galime nustatyti  $\Delta R/R_0(P)$ :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{U_s}{U_0}. \quad (44)$$

Yra žinoma [46], kad plačiame santykinės varžos pokyčių ruože, matuojamą jutiklių mikrobangų galią galima užrašyti panaudojant antro laipsnio polinomą:

$$P = A \frac{\Delta R}{R} + B \left( \frac{\Delta R}{R} \right)^2, \quad (45)$$

kur koeficientų  $A$  ir  $B$  reikšmės yra nustatomos priderinant (45) prie eksperimentiškai išmatuotos santykinio varžos pokyčio priklausomybės nuo mikrobangų galios. Pirmasis (45) lygties narys aprašo tiesinę priklausomybės dalį, o antrasis nukrypimą nuo jos. Tiesinėje  $\Delta R/R_0(P)$  dalyje santykinis varžos pokytis yra žymiai mažesnis už vienetą ir su antrojo nario įtaka galime nesiskaityti, todėl nustatę koeficiento  $A$  reikšmę, nesunkiai galime surasti ir tiriamo rezistorinio jutiklio jautrį tiesinės nuo  $P$  priklausomybės dalyje:

$$\zeta = \frac{1}{A} = \frac{U_s}{PU_0}. \quad (46)$$

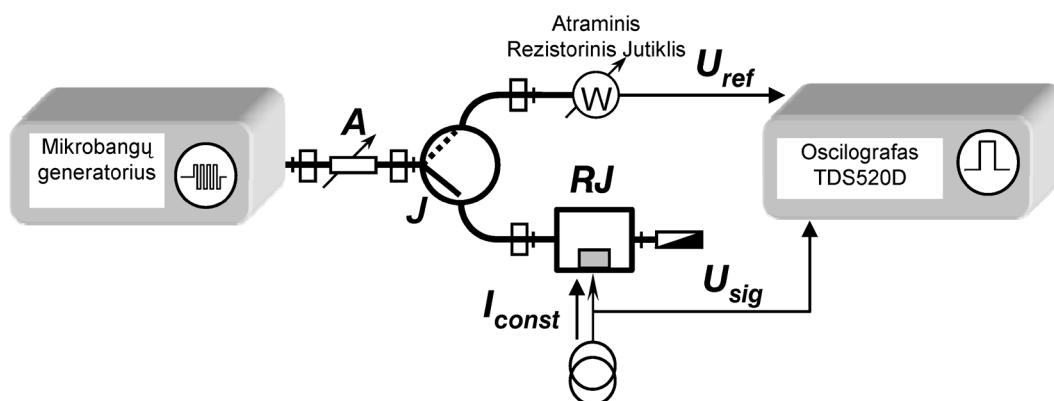
Matuojant rezistorinio jutiklio jautrį, kai jutiklis yra veikiamas didelės galios mikrobangų impulsais santykinė netiesioginių matavimų neapibrėžtis randama panašiai kaip ir praeitame poskyryje:

$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2}, \quad (47)$$

čia  $U_0 = 10 \text{ V}$ ,  $\Delta U_0 = 80 \text{ mV}$ ,  $U_s = 10 - 0,03 \text{ V}$ ,  $\Delta U_s = 100 - 0,1 \text{ mV}$ ,  $P = 1 - 0,002 \text{ kW}$ ,  $\Delta P = 50 - 0,1 \text{ W}$ .

### 4.3 Dažninės charakteristikos matavimas WR90 bangolaidyje

Matuojant rezistorinio jutiklio patalpinto WR90 bangolaidyje jautrio dažnines charakteristikas naudojama matavimo schema pavaizduota 33 pav. Kaip matyti iš šio paveikslėlio, jautrio matavimai stačiakampyje bangolaidyje šiek tiek skiriasi nuo 4.1 ir 4.2 poskyriuose aprašytų matavimo schemų. Mikrobangų impulsų generacijai buvo naudojamas HP 8673C signalų generatorius, kurio generuojami  $\tau = 5 \mu\text{s}$  trukmės ir  $f = 12,5 \text{ Hz}$  pasikartojimo dažnio impulsai buvo sustiprinami bėgančios bangos stiprintuvu iki  $100 \text{ W}$  galios. Sustiprinti mikrobangų impulsai patekdavo į bangolaidinę liniją, kurioje stovėjo bangolaidinis perjungiklis. Prie vienos perjungiklio atšakos prijungtas kalibruotas RJ, o prie kitos tyrinėjamas jutiklis. Keičiant perjungiklio padėtį,

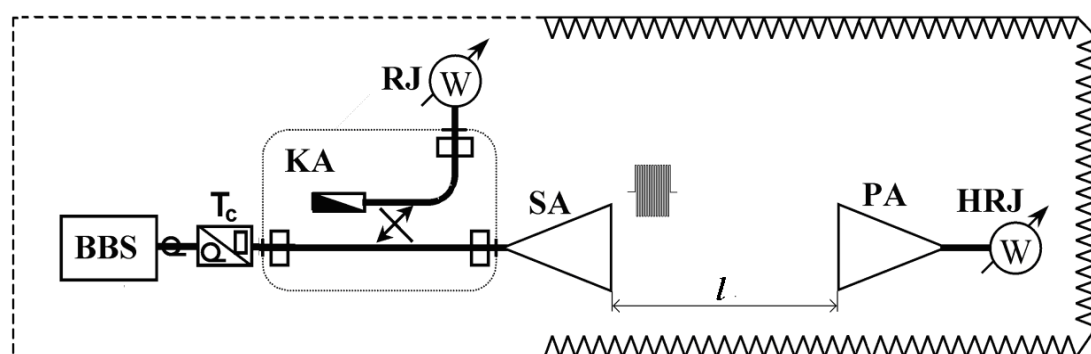


33 pav. Rezistorinio jutiklio įmontuoto WR90 bangolaidyje jautrio tyrimo schema naudojant keičiamo dažnio mikrobangų impulsų generatorių su stiprintuvu X dažnių ruože: RJ yra pažymėtas tiriamasis jutiklis, A – keičiamo slopinimo atenuatorius, J – bangolaidinis perjungėjas, W – atraminis kalibruotas rezistorinis jutiklis.

galima visą mikrobangų galią nukreipti į norimą atšaką ir tokiu būdu, išmatavus galią su kalibruotu RJ, nukreipti ją į tyrinėjamą jutiklį. Atsako signalai iš abiejų jutiklių buvo stebimi oscilografo ekrane. Kaip ir 4.2 poskyryje aprašytu atveju prie jutiklio buvo prijungiamas  $U_0 = 10$  V maitinimo įtampa. Kadangi jautrio matavimai vyko teisinėje RJ charakteristikos dalyje jo jautris buvo skaičiuojamas naudojantis (46) formule, o matavimo neapibrėžtys įvertinamos pagal (47).

#### 4.4 Rezistorinio jutiklio sujungto su ruporine antena jautrio matavimai

Rezistorinio jutiklio sujungto su ruporine antena eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Mikrobangų laboratorijos pusiau beatspindinėje kameroje. Tokių matavimų schema yra pavaizduota 34 pav. Tyrimams naudojome bėgančios bangos mikrobangų impulsų stiprintuvą, generuojantį iki 2 kW galios mikrobangų impulsus. Impulsų trukmė buvo 10  $\mu$ s, pasikartojimo dažnis 100 Hz. Kaip matyti, stiprintuvas prijungtas prie bangolaidinio trakto per perėjimą koaksialinė linija – stačiakampis bangolaidis. Galia, patenkanti į spinduliuojančią anteną, buvo kontroliuojama kalibruotu RJ prijungtu prie pagrindinio trakto per kryptinį šakotuvą. Impulsas, kurį išspinduliuoja antena, patekdavo į priimančią anteną, prie kurios prijungtas tiriamasis RJ. Nuotolis tarp antenų yra pažymėtas  $l$ , signalus iš atraminio ir tiriamojo jutiklių



34 pav. Anteninių matavimų blokinė schema Mikrobangų laboratorijos pusiau beatspindinėje kameroje: BBS yra pažymėtas bėgančios bangos stiprintuvas,  $T_c$  – perėjimas iš koaksialiosios linijos į stačiakampį bangolaidį, KA – kryptinis šakotuvai, RJ – kalibruotas rezistorinis jutiklis matuojantis išspinduliuojamą galią, SA ir PA pažymėtos spinduliuojanti ir priimanti ruporinės antenos ir HRJ – tiriamasis RJ.

registravome oscilografu, kuris buvo už beatspindinės kameros ribų.

Atliekant eksperimentus atviroje erdvėje kai jutiklis yra prijungiamas prie antenos eksperimentiškai matuojamas RJ signalas užrašomas:

$$U_s = U_0 \zeta P = U_0 \zeta S_{eff} W. \quad (48)$$

kur patenkanti į bangolaidį galia yra užrašyta kaip galios tankio atviroje erdvėje ties antenos apertūra  $W$  ir efektinio priimančios antenos ploto  $S_{eff}$  sandauga [73].

Tuomet jautrio išraiška per matuojamus eksperimentiškai dydžius būtų tokia:

$$\chi = \frac{U_s}{U_0 W}. \quad (49)$$

Galios tankis sukuriamas nuotolyje  $l$  nuo spinduliuojančios antenos yra užrašomas taip [73]:

$$W = \frac{G_s P}{4\pi l^2}, \quad (50)$$

kur  $G_s$  yra spinduliuojančios antenos stiprinimas kartais, o  $P$  pažymėta galia, patenkanti į anteną. Statydami (50) į (49), gauname išraišką leidžiančia iš eksperimentiškai matuojamų dydžių nustatyti sistemos sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos jautrį:

$$\chi = \frac{4\pi l^2 U_s}{U_0 G_s P}. \quad (51)$$

Norint atmesti antenos įtaką jautriui ir išmatuoti pačio rezistorinio jutiklio jautrį reikia efektyvaus antenos ploto išraišką (30) (65 psl.) įstatyti į (48):

$$\zeta = \frac{16\pi^2 l^2 U_s}{U_0 \lambda^2 G_s G_p P}. \quad (52)$$

Iš (52) matyti, kad, išmatavus jutiklio signalą bei galią paduodamą į spinduliuojančią anteną, be to žinant abiejų antenų stiprinimo koeficientus ir nuotolį tarp jų, galime nustatyti jutiklio jautrį. Suprantama, kad tokie matavimai yra mažiau tikslūs nei tiesioginiai aprašyti prieš tai einančiuose skyreliuose, tačiau jie leidžia nesunkiai įvertinti matavimų, kuriuose naudojamos ruporinės antenos, tikslumą.

Kalbant apie neapibrėžtis atsirandančias tokiuose matavimuose verta paminėti, jog didelį indėlį į padidėjusį matavimo netikslumą anteniniuose matavimuose įnešą naudojamos ruporinės antenos. Santykinę jautrio neapibrėžtį sistemai, sudarytai iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos, galime užrašyti:

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2}. \quad (53)$$

O rezistorinio jutiklio jautrio matavimo neapibrėžtį matavimuose su ruporinėmis galime užrašyti:

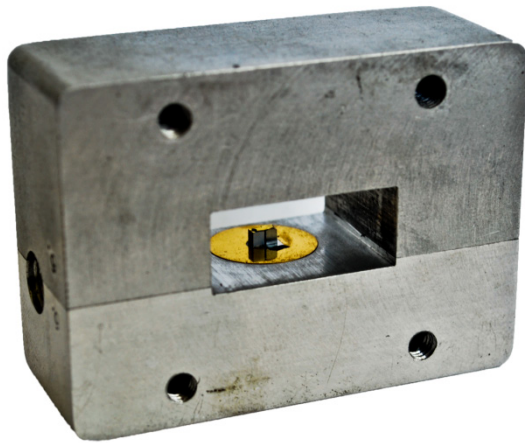
$$\frac{\Delta\zeta}{\zeta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_s}{G_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_p}{G_p}\right)^2}, \quad (54)$$

čia  $U_0 = 10$  V,  $\Delta U_0 = 80$  mV,  $U_s = 0,5 - 0,04$  V,  $\Delta U_s = 5 - 0,1$  mV,  $P = 2 - 0,4$  kW,  $\Delta P = 100 - 20$  W,  $l = 1.2$  m,  $\Delta l = 15$  mm,  $G_s = 45$  dB,  $G_p = 13,5$  dB,  $\Delta G_s = \Delta G_p = 1$  dB.

#### 4.5 Rezistorinių jutiklių gamyba

Iš praeitame skyriuje pateiktų modeliavimo rezultatų buvo išsirinkti trys rezistoriniai jutikliai, kuriuos buvo nuspręsta realizuoti praktiškai. Vienas jutiklis pritaikytas WR90 bangolaidžiui, jo savitoji varža  $\rho = 30$   $\Omega$ ·cm, o matmenys  $h \times w \times l = 1 \times 3 \times 1,5$  mm<sup>3</sup>. Kiti du jutikliai pritaikyti WRD250 bangolaidžiui, jų savitosios varžos  $\rho = 10$   $\Omega$ ·cm ir  $\rho = 50$   $\Omega$ ·cm, o matmenys  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 1$  mm<sup>3</sup> ir  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 2$  mm<sup>3</sup> atitinkamai.

Rezistorinių jutiklių gamyba susidėjo iš dviejų skirtingų etapų. Taip yra todėl, kad gaminant RJ reikia ne tik tinkamai paruošti rezistorinio jutiklio jautrijį elementą, bet ir pagaminti bangolaidinę sekciją, į kurią šis JE bus tvirtinamas. Todėl pirmajame gamybos etape buvo pagamintos kelios bangolaidinės sekcijos WR90 ir WRD250 bangolaidžiams, jos pavaizduotos 35 ir 36 pav.



35 pav. Tiriamojo jutiklio sumontuoto pagamintoje WR90 bangolaidžio sekcijoje vaizdas



36 pav. Tiriamojo jutiklio sumontuoto pagamintoje WRD250 bangolaidžio sekcijoje vaizdas

Antrajame gamybos etape buvo gaminamas RJ jautrus elementas. Iš pradžių iš atitinkamos savitosios varžos monokristalinio n-Si gabalo buvo išpjautos plokštelės, kurių storis po mechaninio apdorojimo (šlifavimas, poliravimas) buvo 3,8 mm ir 1,0 mm atitinkamai WRD250 ir WR90 bangolaidžiams skirtiems jutikliams. Taip išpjautos ir apdorotos plokštelės storis atitinka jutiklių aukštį  $h$ . Tuomet iš abiejų plokštelės pusių buvo atliekama fosforo priemaišų difuzija ir užgaminami metalo kontaktai (Al-V-Cu) tokiu būdu sukuriant ominusius kontaktus iš abiejų plokštelės pusių. Ant taip paruoštų plokštelių buvo elektrochemiškai nusodintas Au sluoksnis, kuris užtikrina gerą prispaudžiamojo kontakto kokybę talpinant JE į bangolaidinę sekciją. Taip suformavus kontaktus iš abiejų plokštelės pusių jos buvo pjaustomos į atitinkamo ilgio ir pločio bandinius.

35 ir 36 pav. parodyti atitinkamose bangolaidžio sekcijose įtvirtinti RJ jautrieji elementai. WR90 jutiklio atveju viršutiniai kontaktai yra sujungti tarpusavyje plona metaline folija, vienas iš apatinių kontaktų yra išemintas, o kitas – izoliuotas. Prie pastarojo kontakto yra prijungiama maitinimo įtampa ir nuimamas naudingas signalas. WRD250 jutiklio atveju apatinis JE kontaktas yra išemintas, o viršutinis izoliuotas ir prijungtas prie SMA jungties, per kurią paduodama jutiklį maitinanti srovė ir registruojamas išėjimo signalas.

## 5 Matavimų rezultatai

Šiame skyriuje aprašomi eksperimentiniai rezistorinių jutiklių pritaikytų WR90 ir WRD250 bangolaidžiams tyrimai. Eksperimentų duomenys yra palyginti su modeliavimo rezultatais. Skyrius susideda iš penkių poskyrių. Pirmajame jų pateikiami įprastiniam stačiakampiui WR90 bangolaidžiui pritaikyto rezistorinio jutiklio tyrimo rezultatai, santykinio varžos pokyčio priklausomybė nuo DGM galios ir jutiklio jautrio priklausomybė nuo dažnio. Antrajame poskyryje pristatomos dviejų skirtingų savitosios varžos RJ pritaikytų H tipo bangolaidžiui WRD250 voltvatinės charakteristikos ir jautrio priklausomybė nuo dažnio. Trečiajame poskyryje aprašomi tyrimų rezultatai tų pačių jutiklių kaip ir antrajame poskyryje, tik šiuo atveju šie jutikliai yra sujungti su rupuorine antena.

### 5.1 WR90 rezistorinis jutiklis

Šiame poskyryje pateikiami eksperimentiniai matavimo rezultatai jutiklio pritaikyto WR90 bangolaidžiui. Kaip jau buvo minėta anksčiau šio bangolaidžio dažnių juosta yra nuo 8,0 GHz iki 12,4 GHz. Atlikus elektromagnetinio lauko modeliavimus, kurie yra pateikti 3.1 skyriuje, buvo pasirinktas rezistorinis jutiklis, kurio JE pagamintas iš  $\rho = 30 \Omega \cdot \text{cm}$  savitosios varžos n-Si, o matmenys  $h \times w \times l = 1 \times 3 \times 1,5 \text{ mm}^3$ . Tokio jutiklio matmenys, savitoji varža, visa jutiklio varža apskaičiuotas SBK bei apskaičiuotas ir eksperimentiškai nustatytas dažninės charakteristikos nelygumas bangolaidžio dažnių diapazone yra pateikti 6 lentelėje.

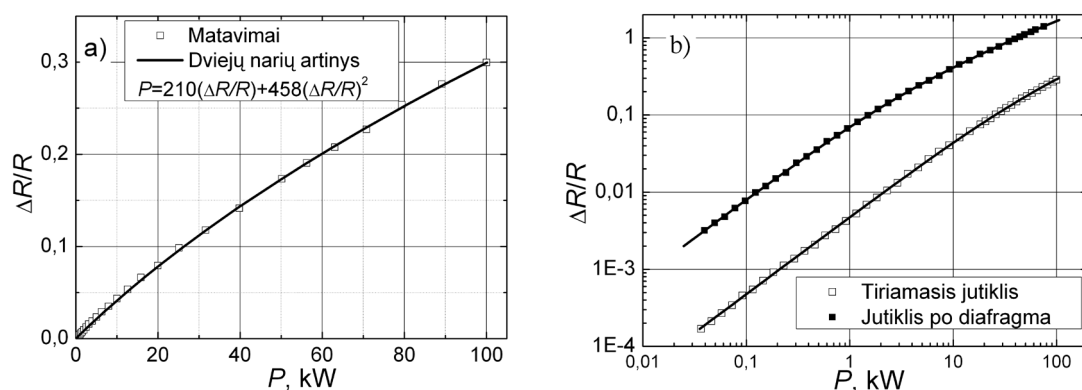
Pradžioje išmatavome jutiklio išėjimo signalo priklausomybę nuo mikrobangų impulsų sklindančių bangolaidžiu, galios. Matavimus atlikome pasinaudodami 4.2 skyriuje aprašyta matavimo metodika. Jutiklis buvo jungiamas prie magnetroninio generatoriaus, kuris generavo 9,4 GHz dažnio

6 lentelė. WR90 rezistorinio jutiklio charakteringi parametrai ir jautris.

$h$ , mm	$w$ , mm	$l$ , mm	$\rho$ , $\Omega \cdot \text{cm}$	$R$ , $\Omega$	SBK	$\Delta\zeta/\zeta_{Teor}$ , %	$\Delta\zeta/\zeta_{Eksp}$ , %
1,0	3,0	1,5	30,0	267	< 1,1	$\pm 4,1$	$\pm 9,1$

didelės galios mikrobangų impulsus, kurių galia siekia iki 100 kW. Iš gautosios išėjimo signalo priklausomybės nuo sklindančios bangolaidžiu galios nustatėme santykinės JE varžos priklausomybę nuo  $P$ , kuri ir yra parodyta 37 pav. Iš paveikslo matome, kad minimali mikrobangų galia, kurią galima išmatuoti su šiuo jutikliu siekia kelias dešimtis vatų. Matavimai didelių galių srityje atlikti iki maksimalios galios, kurią generuoja magnetroninis generatorius (100 kW). 37b pav. palyginimui pateikta analogiška priklausomybė išmatuota RJ, kurio JE yra talpinamas po skersai bangolaidžio ištempta metaline diafragma [50]. Matyt, kad pastarojo jutiklio jautris yra didesnis, tačiau jo charakteristika didelių galių srityje yra stipriai netiesinė, lyginant ją su tiriamojo RJ išmatuota  $\Delta R/R$  priklausomybe nuo  $P$ . Pasinaudodami matavimų rezultatais ir dviejų narių aproksimacija (45), kuri gerai aprašo rezistorinio jutiklio savitosios varžos pokytį mikrobangų elektriniame lauke, nesunkiai randame RJ jautrį  $\zeta$  tiesinėje voltvatinės charakteristikos dalyje, kur su antruoju aproksimacijos nariu galime nesiskaityti. Tiriamojo jutiklio jautris 9,4 GHz dažnyje yra  $0,0048 \text{ kW}^{-1}$ .

Jutiklio jautrio priklausomybei nuo dažnio išmatuoti naudojome metodiką, kuri yra aprašyta 4.3 skyriuje. Kaip mikrobangų impulsų šaltinis buvo naudojama bėgančios bangos lempa, generuojanti kelių šimtų W impulsus WR90 bangolaidžio dažnių ruože. Eksperimentiškai išmatuota jautrio priklausomybė nuo dažnio yra parodyta 38 pav. Paveiksle taip pat parodyta



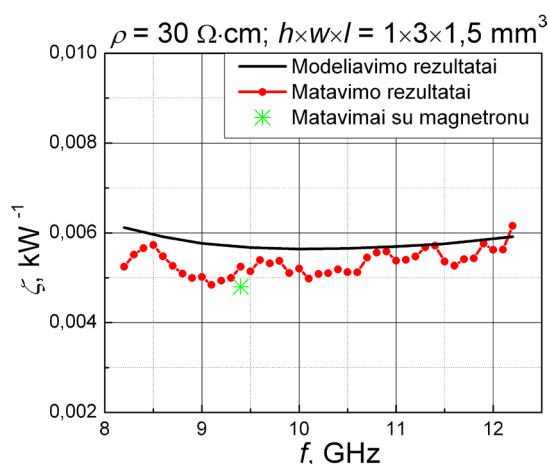
37 pav. Išmatuota santykinės varžos pokyčio priklausomybė nuo galios sklindančios bangolaidžiu prie  $f = 9,4 \text{ GHz}$  tiesinėje (a) ir logaritminėje (b) skalėse. Atviri kvadratėliai rodo eksperimentinius matavimo rezultatus, o ištisinė linija atitinka dviejų narių artinį (45). JE parametrai:  $\rho = 30 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 1 \times 3 \times 1,5 \text{ mm}^3$ . Palyginimui pilnaviduriai kvadratėliai pavaizduoti (b) jutiklio po diafragma matavimo rezultatai [50].



apskaičiuotoji  $\zeta(f)$  priklausomybė ir jautris gautas iš matavimų su magnetronu generuojamais didelės galios mikrobangų impulsais, kuri pavaizduota žvaigždute. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad eksperimentiniai rezultatai neblogai sutampa su teoriniais. Palyginus eksperimentinį ir teorinį RJ jautrio pokyčius visame WR90 bangolaidžio dažnių diapazone (6 lentelė) matyti, kad eksperimentinis jautrio pokytis gavosi  $\pm 9,1\%$ . Jis yra apie du kartus didesnis nei buvo apskaičiuotas iš modeliavimo rezultatų. Ši neatitikimą galima būtų paaiškinti tiek idealizuoto modelio ir praktinės realizacijos neatitikimais, tiek ir eksperimentinėmis matavimo neapibrėžtimis, kurios šiuo konkrečiu atveju apskaičiuotos naudojantis netiesioginių matavimų santykinės neapibrėžties formule (47), kai jutiklio jautris matuojamas jį veikiant didelės galios mikrobangų impulsais siekia  $\pm 5,5\%$ .

Mes taip pat išmatavome atspindžio nuo sukurtųjų jutiklių koeficientą. Pasirodė, kad SBK buvo mažiau už 1,1 ir mažai priklausė nuo dažnio. Kaip matyti iš 6 lentelės šis rezultatas neblogai sutapo su teoriniais skaičiavimais.

Vertinant sukurtuosius jutiklius apskritai, tenka pripažinti, kad jų jautrio vertė yra gerokai mažesnė, lyginat su analogišku jutikliu patalpintu po metaline diafragma [50]. Tačiau tiesiškesnė jutiklio  $\Delta R/R$  priklausomybė nuo  $P$  didelių mikrobangų galių srityje, leidžia tikėtis, kad sukurtasis jutiklis gali būti pritaikomas labai didelių galių mikrobangų impulsams stačiakampiuose bangolaidžiuose registruoti. Reikia pastebėti, kad eksperimentams su labai



38 pav. Rezistorinio jutiklio pritaikyto WR90 bangolaidžiui jautrio priklausomybė nuo mikrobangų dažnio. Linija pažymėti modeliavimo rezultatai, taškais – eksperimentiniai rezultatai, žvaigždute – RJ jautris gautas matuojant su magnetronu 9,4 GHz dažnyje.

didelės galios mikrobangų impulsais stačiakampiuose bangolaidžiuose trukdo ir greitesnis bangolaidžio pramušimas jutiklio aplinkoje, dėl papildomų jutiklio elementų montuojamų bangolaidyje. Galima manyti, kad paprasta jutiklio konstrukcija, lyginant su jutikliu patalpintu po diafragma, leis padidinti atsparumą bangolaidžio pramušimui ir atlikti eksperimentus su didesnės galios mikrobangų impulsais.

Šio poskyrio rezultatai buvo atspausdinti straipsnyje: Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Dagys, V. Tamošiūnas, and P. Ragulis, "Experimental Investigation of High Pulse Power Microwave Resistive Sensor with Flat Frequency Response," ACTA PHYSICA POLONICA A, vol. 115 pp. 1122-1124, 2009.

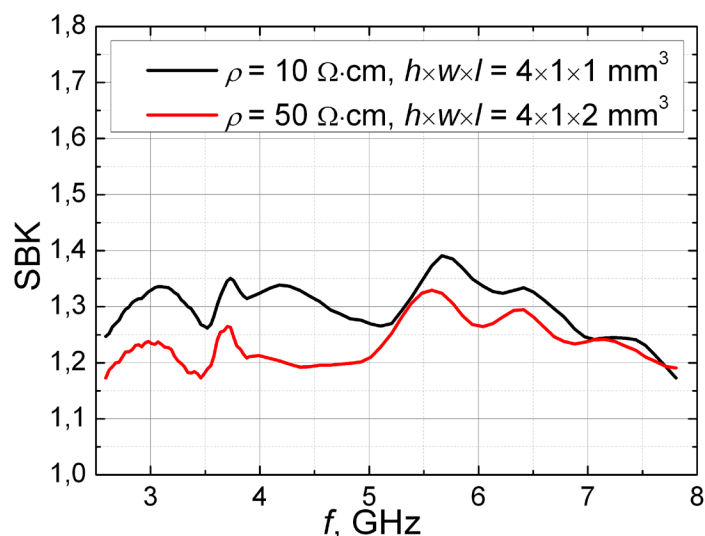
## 5.2 Rezistoriniai jutikliai pritaikyti WRD250 bangolaidžiui

Šiame poskyryje pateikiami eksperimentiniai rezultatai rezistorinių jutiklių, kurių JE įtverti skersai WRD250 bangolaidžio keterų. Kaip jau ir buvo minėta 3.2.2 skyriuje atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinkti jutikliai pagaminti iš  $\rho = 10 \Omega\cdot\text{cm}$  ir  $\rho = 50 \Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos n - Si kristalo. Šių jutiklių matmenys, stovinčios bangos koeficientas, varža ir jautrio pokytis WRD250 bangolaidžio dažnių ruože yra pateikti 7 lentelėje. Norime atkreipti dėmesį į tai, kad jautrio pokytis tiriamiesiems jutikliams buvo perskaičiuotas panaudojus tikslesnį modelį, dėl to skaičiavimo rezultatai pateikti 7 lentelėje šiek tiek skiriasi nuo duomenų apskaičiuotų naudojant grubesnį jutiklio modelį ir pateiktą 3 lentelėje.

Prieš pradėdami eksperimentinius tiriamųjų jutiklių bandymus mikrobangų elektriniame lauke atlikome atspindžio nuo jų matavimus visame bangolaidžio WRD250 dažnių ruože. Matavimų rezultatai pateikti 39 pav.

7 lentelė. Rezistorinio jutiklio pritaikyto WRD250 bangolaidžiui charakteringi jautriojo elemento matmenys.

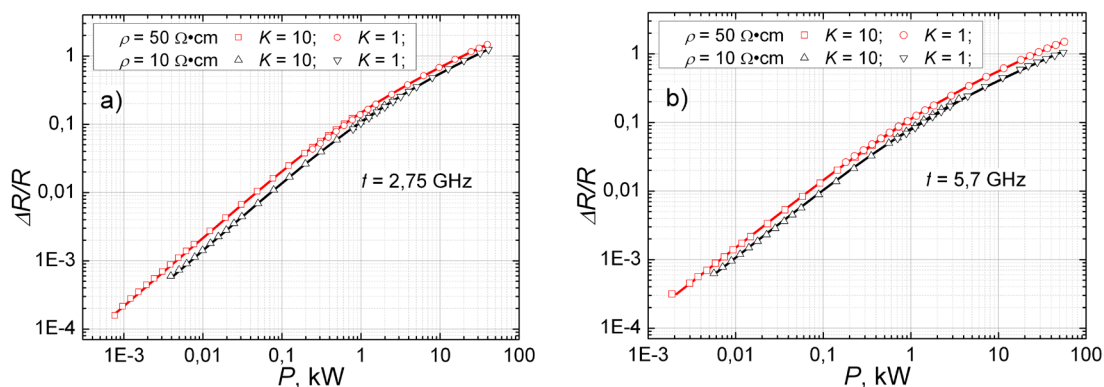
$h$ , mm	$w$ , mm	$l$ , mm	$\rho$ , $\Omega\cdot\text{cm}$	$R$ , $\Omega$	SBK	$\Delta\zeta/\zeta$ , %
3,8	1,0	2,0	50,0	950	< 1,3	$\pm 12,5$
3,8	1,0	1,0	10,0	380	< 1,35	$\pm 12,9$



39 pav. Rezistorinių jutiklių, patalpintų WRD250 bangolaidyje, stovinčios bangos koeficiento priklausomybė nuo dažnio.

Matyti, kad matavimo rezultatai labai neblogai atitinka teorinių modeliavimų rezultatus. Kaip ir buvo tikėtasi, abiejų jutiklių SBK yra mažesni nei 1,5. 10  $\Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos jutiklio maksimalus stovinčios bangos koeficientas yra 1,4, o 50  $\Omega\cdot\text{cm}$  savitosios varžos jutiklio – 1,32.

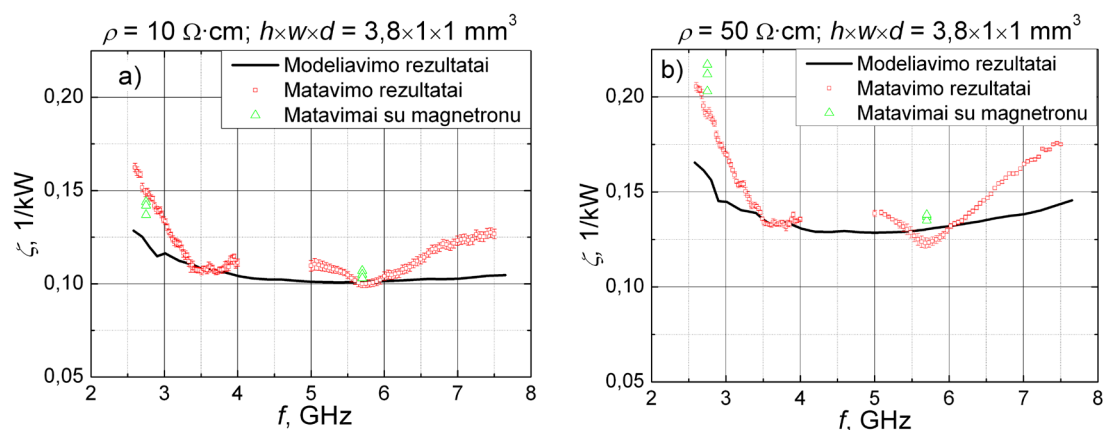
Įsitikinus, jog atspindys nuo jutiklių tenkina reikalavimus buvo išmatuotos jutiklių išėjimo signalo priklausomybės nuo sklindančios mikrobangų galios, o iš pastarųjų nustatytos santykinio varžos pokyčio  $\Delta R/R$  priklausomybės nuo mikrobangų galios  $P$  2,75 GHz ir 5,7 GHz dažniuose. Eksperimentų metodika yra aprašyta 4.2 šio darbo skyriuje. Eksperimentiškai nustatytos  $\Delta R/R$  priklausomybės nuo mikrobangų galios yra parodytos 40 pav. Jutiklių santykinės varžos pokyčio matavimus didelės galios mikrobangų



40 pav. Išmatuota santykinės varžos pokyčio priklausomybė nuo galios sklindančios bangolaidžiu 2.75 GHz (a) ir 5.7 GHz (b) dažniuose. Taškai rodo matavimo rezultatus su papildomu stiprintuvu ( $K = 10$ ), ir be jo ( $K = 1$ ). Ištinė linija rodo dviejų narių artinį (45). JE parametrai:  $\rho = 10 \Omega\cdot\text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3.8 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ ;  $\rho = 50 \Omega\cdot\text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3.8 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$ .

elektriniame lauke atlikome iki tokių galių, kol jutiklio varža pasikeitė apie du kartus. Esant mažiems matuojamiems signalams buvo naudojamas papildomas impulsų stiprintuvas, kurio stiprinimo koeficientas  $K = 10$ . Iš 40 pav. matyti, kad naudojant tokį stiprintuvą galima užregistruoti  $10^{-4}$  eilės santykinę varžos pokytį. Jutiklio matuojamos mikrobangų impulsinės galios ribos yra nuo keleto vatų iki dešimčių kilovatų. Taip pat matyti, kad didesnės savitosios varžos jutiklis yra jautresnis, nei mažesnės savitosios varžos RJ. Ištinės linijos paveiksle rodo dviejų narių aproksimaciją (45) (73 psl.). Iš 40 pav. matyti, kad ji gerai aprašo eksperimentinius rezultatus. Iš aproksimacijos buvo nustatytos koeficientų  $A$  ir  $B$  reikšmės tirtiems jutikliams. Jautrio reikšmės apskaičiuotos iš koeficiento  $A$  yra parodytos 41 pav. tuščiaviduriais trikampaiais. Santykinio varžos pokyčio priklausomybės tyrimai buvo atlikti trims jutikliams iš kiekvienos grupės. Išmatuotos priklausomybės gerai sutapo mažų galių srityje, kiek smarkiau išsiskirdamos esant dideliems  $P$ .

Išmatuota RJ jautrio priklausomybė nuo dažnio, naudojant meandru moduluotą mažos galios mikrobangų signalą yra parodyta 41 pav. Naudotoji metodika yra aprašyta 4.1 disertacijos skyriuje. Eksperimentai buvo atlikti su trimis bandiniais iš kiekvienos JE grupės, kurių parametrai yra pateikti 7 lentelėje. Suvidurkinti matavimo rezultatai kartu su paklaidų ribas nurodančiomis žymėmis yra parodyti paveiksle. Matyti, kad išmatuoto jautrio



41 pav. RJ jautrio priklausomybė nuo dažnio: (a)  $\rho = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , (b)  $\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$ . Taškais parodyti eksperimentų rezultatai suvidurkinti trims jutikliams, ištinė linija rodo skaičiavimų rezultatus. Tuščiaviduriais parodytos jutiklio jautrio vertės apskaičiuotos iš eksperimentinių rezultatų atliktų su didelės galios mikrobangų impulsais 40 pav.

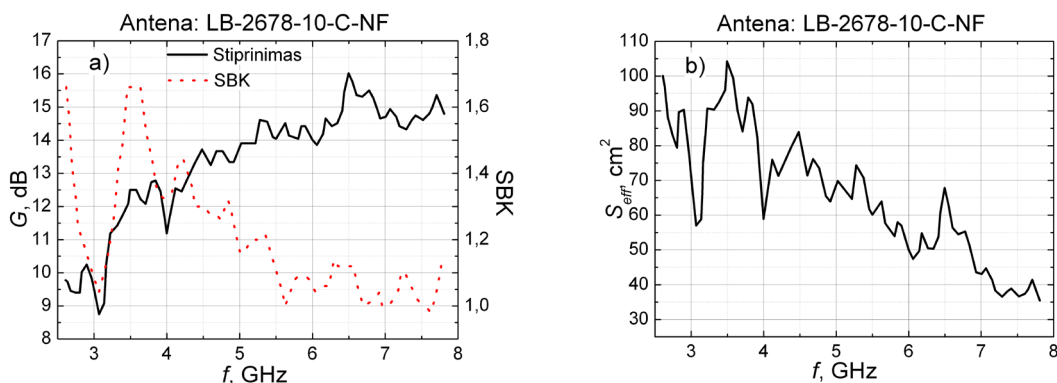
paklaidos nėra labai didelės, o tai leidžia manyti, kad JE buvo pagaminti su pakankamai gerai atsikartojančiomis charakteristikomis. Paveiksluose ištisine linija yra taip pat parodyti mūsų apskaičiuotos jautrio reikšmės. Nors skaičiavimai pateikti 41 pav. buvo atlikti su padidinto tikslumo bangolaidžio modeliu, kuriame bangolaidžio lango būdingieji matmenys buvo įskaitomi iki dešimtųjų milimetro dalių, tik priimtinas sutapimas buvo pasiektas tarp apskaičiuotų ir eksperimentiškai išmatuotų rezultatų. Didžiausias skirtumas tarp išmatuotų ir apskaičiuotų rezultatų yra stebimas žemų ir aukštų dažnių srityse. Matyti, kad jautrio reikšmės, išmatuotos su DGM impulsais, neblogai sutampa su duomenimis, gautais iš eksperimentų su meandru moduliutu mažos galios mikrobangų signalu. Taip pat matyti, kad matavimo rezultatai, matuojant jautrį su DGM impulsais, atskiriems jutikliams yra stipriau išbarstyti žemų dažnių srityje lyginant juos su duomenimis išmatuotais prie 5.7 GHz. Išmatuotas eksperimentiškai dažninės charakteristikos netolygumas yra apie  $\pm 25\%$  t.y. apie du kartus didesnis nei buvo numatytas teoriškai (žr. 7 lentelę). Santykinė matavimo paklaida matuojant rezistorinio jutiklio jautrį, kai jutiklis yra veikiamas didelės galios mikrobangų impulsais, yra apskaičiuojama naudojantis (47) formule. Į šia formulę įstatę mikrobangų galios, matuojamo signalo ir maitinimo įtampos krentančios ant RJ vertes gauname, kad santykinė matavimo neapibrėžtis yra lygi  $\pm 5,5\%$ . Matuojant rezistorinio jutiklio jautrio dažninę charakteristiką su sinchroniniu stiprintuvu santykinę netiesioginių matavimų neapibrėžtį įvertinome pasinaudodami (43) formule, gavome, kad ji yra lygi  $\pm 3,7\%$ . Įvertinus matavimo neapibrėžtis ir turint omenyje tris kartus platesnį dažnių ruožą, kuriame sukurtasis RJ gali atlikti matavimus, gautasis rezultatas pilnai patenkina mūsų lūkesčius.

Šio poskyrio rezultatai buvo atspausdinti straipsnyje: Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, and M. Dagys, “Wide band waveguide sensor for microwave pulse measurement” Lithuanian Journal of Physics 53.2 pp. 99-103, (2013).

### 5.3 WRD250 rezistorinio jutiklio sujungto su ruporine antena matavimai

Prie RJ iš vienos pusės prijungus plačiajuostę ruporinę anteną, o iš kitos suderintą apkrovą gaunama matavimo sistema aprašyta 3.2.5 poskyryje. Tokią sistemą galima naudoti mikrobangų elektrinio lauko stiprio ar galios tankio atviroje erdvėje matavimui. Šiame poskyryje pateikiami eksperimentiniai tokio matuoklio tyrimai, pagal metodiką, kuri aprašyta 4.4 poskyryje. Iš vienos pusės tokie tyrimai leido mums iš nepriklausomų matavimų su ruporinėmis antenomis nustatyti rezistorinio jutiklio jautrį ir įvertinti papildomas paklaidas, atsirandančias dėl sudėtingesnės matavimo metodikos atliekant tokius matavimus. Iš kitos pusės, mes įvertinome ir sistemos, sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos, jautrį.

Šiems matavimams naudojome plačiajuostę ruporinę anteną LB-2678-10-C-NF, kurią įsigijome iš įmonės Kinijoje A-INFOMW. Ši antena yra suderinta su WRD250 bangolaidžiu. Gamintojų pateikta antenos stiprinimo bei stovinčios bangos koeficiento priklausomybė nuo dažnio ir iš antenos stiprinimo pagal (30) formulę (65 psl.) apskaičiuoto antenos efektinio ploto priklausomybė nuo dažnio yra parodytos 42 pav. Matyti, kad antenos stiprinimo kreivė turi daug lokaliųjų ekstremumų, kurie automatiškai persikelia į efektinio ploto kreivę. Reikia pastebėti, kad žemuose dažniuose nemaža signalo dalis atsispindi nuo antenos. Žiūrint į stiprinimo ir stovinčios bangos koeficiento priklausomybes nuo mikrobangų dažnio (42a pav.) matome, kad

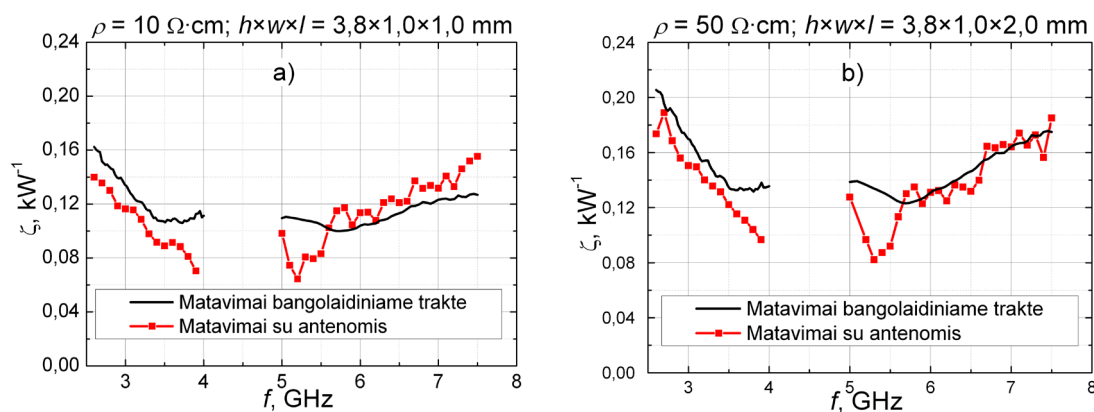


42 pav. H tipo ruporinės antenos LB-2678-10-C-NF a) stiprinimo (ištininė linija) ir stovinčios bangos koeficiento (brūkšninė linija) priklausomybės nuo dažnio; b) antenos efektyvaus ploto priklausomybė nuo dažnio suskaičiuota pagal (30) formulę.

jos neblogai koreliuoja, tai leidžia manyti, kad antenos stiprinimo fliktuacijos yra nulemtos mikrobangų atspindžio nuo antenos. Iš 42b pav. matyti, kad gana siaurame dažnių ruože efektyvus plotas keičiasi beveik du kartus, kas rodytų, kad pati antena nėra tinkamai sukonstruota. Deja mums nepavyko įsigyti kalibruotos ruporinės antenos ATH2G8, kurią naudojome teoriniuose skaičiavimuose aprašytuose 3.2.5 skyriuje, dėl per didelės jos kainos.

Plačiajuostė ruporinė antena LB-2678-10-C-NF sujungta su rezistoriniu jutikliu buvo naudojama mikrobangų priėmimui. Spinduliavimui mes naudojome kalibruotas S ir C dažnių ruožo ruporines antenas, kurios buvo jungiamos prie stačiakampių bangolaidžių. Antenų stiprinimo koeficientai 15 dB ir 20 dB atitinkamai S ir C dažnių ruožams.

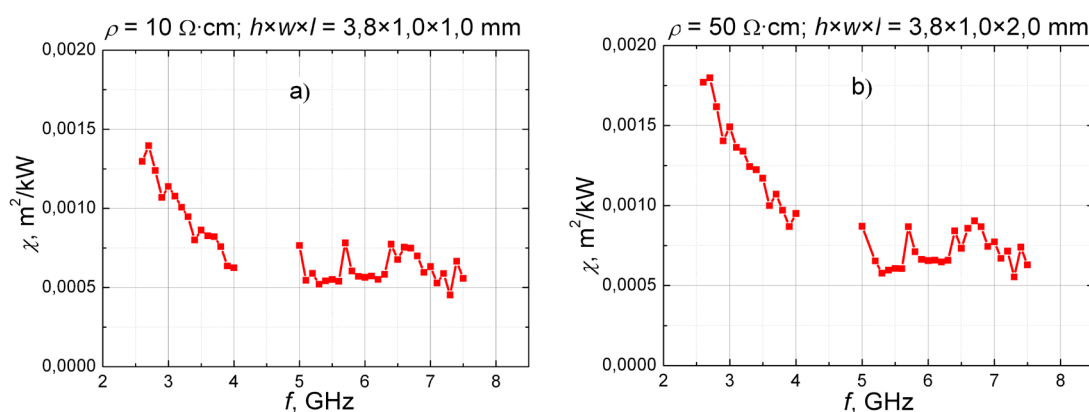
Kaip jau buvo minėta 4.4 skyriuje, eksperimentai su antenomis buvo atliekami pusiau beatspindinėje kameroje, nuotolis tarp spinduliuojančios ir priimančios antenų buvo apie 1,2 metro. Išmatavome jutiklio, prijungto prie plačiajuostės ruporinės antenos, signalo priklausomybę nuo į priimančią anteną patenkančios impulso galios skirtinguose dažniuose. Iš šių eksperimentų rezultatų pasinaudojus (51) ir (52) išraiškomis (76 psl.) nustatėme sistemos, sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos, jautrio  $\chi$  ir jutiklio jautrio  $\zeta$  priklausomybes nuo dažnio. Tokiu būdu nustatyta jutiklio jautrio priklausomybė nuo dažnio yra parodyta 43 pav. Tame pat paveiksle parodyti ir anksčiau išmatuoti jutiklio jautriai atliekant eksperimentus bangolaidžių trakte. Turint omenyje papildomas paklaidas, atsirandančias dėl antenų panaudojimo



43 pav. RJ jautrio priklausomybė nuo dažnio: (a)  $\rho = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , (b)  $\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $h \times w \times l = 3,8 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$ . Taškais parodyti eksperimentų rezultatai išmatuoti su antenomis, ištisinė linija rodo jautrio matavimo rezultatus bangolaidiniame trakte.

eksperimentuose, kurios yra įvertinamos skaičiuojant santykinę matavimo neapibrėžtį pasinaudojant (54) formule (77 psl.), gautas visai neblogas rezultatų sutapimas. Rezistorinio jutiklio jautrio santykinė neapibrėžtis siekia net  $\pm 10,4\%$ , kai jautris yra matuojamas su ruporinėmis antenomis, ir yra du kartus didesnė nei bangolaidinių matavimų. Pagrindinė priežastis sąlygojanti padidėjusį matavimų netikslumą ir skirtumą tarp rezultatų gautų skirtingais metodais, mūsų nuomone, gali būti blogas plačiajuostės ruporinės antenos suderinimas su bangolaidiniu traktu žemų dažnių srityje ir galimai nepakankamai tikslus jos kalibravimas.

Sistemos, sudarytos iš rezistorinio jutiklio ir ruporinės antenos, išmatuota jautrio  $\chi$  priklausomybė nuo dažnio dviejų skirtingų savitųjų varžų jutikliams yra parodyta 44 pav. Santykinė matavimo neapibrėžtis šiuo atveju siekia  $\pm 7,6\%$  ir buvo apskaičiuota naudojantis (53) formule (77 psl.). Matyti, kad jautris stipriai mažėja 2.6-4 GHz ruože ir beveik nepriklauso nuo dažnio 5-7.5 GHz ruože. Iš jautrio išraiškos (49) atsižvelgiant į (48) matyti, kad  $\chi$  priklauso tiek nuo paties jutiklio, tiek ir nuo naudojamos ruporinės antenos charakteristikų. Todėl parenkant jutiklio ir antenos parametrus, galima sukurti sistemą su pageidaujama dažnine charakteristika, kas ir buvo teoriškai pademonstruota 3.2.5 šio darbo poskyryje. Nors mums dėl objektyvių priežasčių kol kas nepavyko realizuoti tokio matuoklio praktiškai, tačiau atlikti eksperimentai yra labai perspektyvūs sistemų, sudarytų iš RJ prijungto prie ruporinės antenos, kūrimo prasme.



44 pav. RJ sujungto su H tipo ruporine antena jautrio priklausomybė nuo dažnio dviem skirtingos savitosis varžos jutikliams: a)  $\rho = 10 \Omega\text{-cm}$ ; b)  $\rho = 50 \Omega\text{-cm}$ .



## **6 Rezistorinių jutikliu taikymai elektromagnetinio atsparumo tyrimuose**

Rezistorinių jutiklių praktinio taikymo galimybėms pademonstruoti buvo pasirinkti elektromagnetinio atsparumo tyrimai. Šiuose tyrimuose RJ buvo naudojami didelės galios mikrobangų impulsų matavimų atviroje erdvėje. Matavimų metu buvo naudoti du rezistoriniai jutikliai, vienas iš jų buvo naudojamas spinduliuojamai galiai nustatyti, o kitas galiai krentančiai į tiriamąjį prietaisą. Kadangi rezistoriniai jutikliai nebijo perkrovų todėl jie yra gerai pritaikyti tokiems eksperimentams.

Šis skyrius yra suskirstytas į keturis poskyrius. Pirmajame poskyriuje aprašomi teoriniai skaičiavimai šiluminio ir parazitinio krūvio elektromagnetinio pažeidžiamumo modeliams. Antrajame – aprašoma eksperimento metodika, kuri buvo naudojama tyrinėjant maršrutizatorių ir šviesolaidinių konverterių atsparumą DGM spinduliuotei. Trečiajame ir ketvirtajame poskyriuose aprašyti maršrutizatorių ir šviesolaidinių konverterių atsparumo DGM spinduliuotei tyrimo rezultatai.

### **6.1 Elektroninių prietaisų gedimo modeliai**

Tiriant didelės galios mikrobangų impulsų poveikį elektroniniams prietaisams, buvo pastebėta, kad kritinis laukas  $E_{th}$ , kuriam esant prietaiso veikimas yra sutrikdomas priklauso nuo mikrobangų impulsų trukmės ir net nuo jų pasikartojimo dažnio. Šiame poskyryje yra aptariami du tokių gedimų modeliai – šiluminis ir parazitinio krūvio.

#### **6.1.1 Šiluminis gedimo modelis**

Šiluminis puslaidininkinių prietaisų gedimo modelis, paveikus juos didelės galios mikrobangų impulsais yra dažnai naudojamas aiškinant gedimą sąlygojančio elektromagnetinio lauko galios tankio priklausomybę nuo impulso trukmės [68]. Ir nors šis modelis plačiausiai taikomas nepataisomiems gedimams charakterizuoti, jį galima panaudoti analizuojant laikinus

elektroninio prietaiso veikimo sutrikimus, kai pašalinus išorinį poveikį, perkaitusios puslaidininkinių prietaisų sritys atvėsta, o funkcionavimas atsistato nedelsiant arba po sistemos perkrovimo. Jeigu galvoti, kad puslaidininkinio lusto ar jo dalies temperatūros pokytis  $\Delta T$  lemia prietaiso gedimą, jį galėtume apskaičiuoti išsprendę energijos balanso lygtį. Jeigu prietaisą paveikti mikrobangų impulsais, kurių trukmė yra  $\tau$ , o pasikartojimo periodas  $T$ , tai minėtoji balanso lygtis įgytų tokį pavidalą

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{P_a}{cd} f(t) - \frac{\Delta T}{\tau_h}, \quad (55)$$

kur  $P_a$  pažymėtas galios tankis absorbuotas tūrio vienetu,  $c$  yra šiluminė talpa,  $d$  pažymėtas puslaidininkio, iš kurio yra pagamintas lustas, tankis,  $\tau_h$  yra charakteringa šiluminės relaksacijos trukmė, o  $f(t)=1$ , kai  $0 < t < \tau$  ir  $f(t)=0$ , kai  $\tau < t < T$ . Panaudojus periodinio sužadavimo sąlygą, galima nesunkiai gauti (55) lygties analizinius sprendinius aprašančius temperatūros kitimą impulso metu nuo 0 iki  $\tau$ .

$$\Delta T(t) = A \left[ 1 + \left( \frac{e^{\frac{\tau}{\tau_h}} - e^{\frac{T}{\tau_h}}}{e^{\frac{T}{\tau_h}} - 1} \right) e^{-\frac{t}{\tau_h}} \right], \quad (56)$$

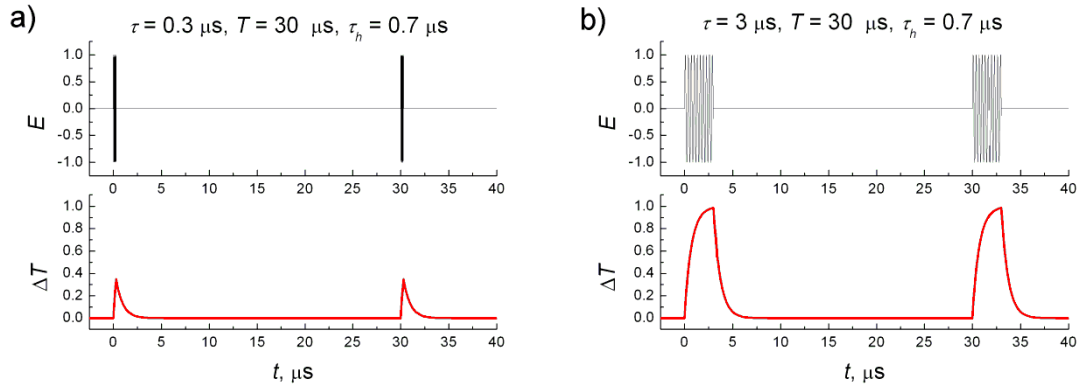
ir tarpe tarp impulsų nuo  $\tau$  iki  $T$ :

$$\Delta T(t) = A \left( e^{\frac{\tau}{\tau_h}} + \frac{e^{\frac{\tau}{\tau_h}} - e^{\frac{T}{\tau_h}}}{e^{\frac{T}{\tau_h}} - 1} \right) e^{-\frac{t}{\tau_h}}, \quad (57)$$

kur koeficientas  $A$ :

$$A = \frac{E^2 \tau_h}{2Z_0 cd l}. \quad (58)$$

Čia  $E$  yra amplitudinė elektrinio lauko reikšmė, o  $l$  pažymėtas gylis, kuriame absorbuojama elektromagnetinė banga. Nesunku matyti, kad (56) sutampa su (57), kai  $t = \tau$ . Pagal (56) ir (57) formules apskaičiuota temperatūros pokyčio priklausomybė nuo laiko yra parodyta 45 pav. Matyti, kad esant tai pačiai elektrinio lauko amplitudei, bet keičiantis impulso trukmei



45 pav. Temperatūros pokytis apskaičiuotas pagal (56) ir (57) esant trumpam (a) ir ilgam (b) mikrobangų impulsui, esant tai pačiai elektrinio lauko amplitudei.

apskaičiuotas didžiausias temperatūros pokytis  $\Delta T_{max}$  gali pasikeisti keletą kartų.

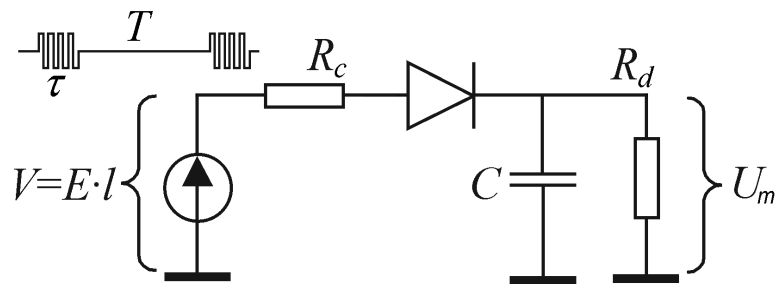
Atliekant eksperimentus, yra matuojama kritinio elektrinio lauko  $E_{th}$ , kurį pasiekus, įvyksta prietaiso gedimas, priklausomybė nuo impulso trukmės. Turint omenyje, kad, esant skirtingoms impulso trukmėms, gedimas įvyks pasiekus tą patį temperatūros pokytį, iš gautųjų išraiškų nesunkiai galima užrašyti kritinio elektrinio lauko išraišką. Kai  $T \gg \tau_h$  gautume,

$$E_{th} = \sqrt{\frac{Z_0 c d l \Delta T_{max}}{\tau_h (1 - \exp(-\tau/\tau_h))}}, \quad (59)$$

kur  $Z_0$  yra laisvos erdvės banginė varža. Kaip matyti iš gautosios išraiškos, kai  $\tau \ll \tau_h$ :

$$E_{th} = \sqrt{\frac{Z_0 c d l \Delta T_{max}}{\tau}}, \quad (60)$$

o kai bus tenkinama atvirkščia nelygybė, kritinis elektrinis laukas nuo  $\tau$  nepriklauso. Tarpinėje impulsų trukmių srityje kritiniam elektriniam laukui apskaičiuoti reikia naudoti (59) išraišką. Parenkant  $\tau_h$  reikšmę, galima priderinti (59) išraišką aprašoma  $E_{th}$  priklausomybę nuo  $\tau$  su eksperimentiškai išmatuota.



46 pav. Parazitinio krūvio modelio scheminis vaizdas:  $V=El$  išorinio elektrinio lauko indukuojama įtampa grandinėje,  $R_c$  – kondensatoriaus įkrovimo varža,  $R_d$  – kondensatoriaus išsikrovimo varža. Kondensatoriui užsikrovus iki įtamos  $U_m$  schema nustoja funkcionuoti

### 6.1.2 Parazitinio krūvio modelis

Galima galvoti, kad išorinis elektrinis laukas indukuoja tiriamojo prietaiso grandinėje įtampą  $V=El$ , kur  $E$  būtų išorinio elektrinio lauko amplitudė, o  $l$  grandinės, kurioje indukuojasi elektrinis laukas geometrinis ilgis. Indukuotoji įtampa per p-n sandūrą pralaidžia kryptimi užkrauną kondensatorių, kaip tai parodyta 46 pav. Kondensatorius išsikrauna per kitą varžą, todėl turėtume dvi charakteringas trukmes įkrovimo trukmę  $\tau_c=R_cC$  ir išsikrovimo trukmę  $\tau_d=R_dC$ . Sakykime, kad, kondensatoriui  $C$  užsikrovus iki įtamos  $U_m$ , schema nustoja veikti.

Sprendžiant labai panašią tiesinę diferencialinę lygtį kaip ir prieš tai buvusiam skyrelyje ir pasinaudojus periodinėmis kraštinėmis sąlygomis galima gauti tokią kritinio lauko išraišką:

$$E_{th} = \frac{\pi U_m}{l} \frac{1 - \exp\left(\frac{\tau}{\tau_d} - \frac{T}{\tau_d} - \frac{\tau}{\tau_c}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c}\right)}, \quad (61)$$

iš kurios galima apskaičiuoti  $E_{th}$  priklausomybę nuo impulso trukmės  $\tau$  ir pasikartojimo periodo  $T$ . Šiuo atveju turėtume du parametrus  $\tau_c$  ir  $\tau_d$ , kuriuos parinkdami galėtume priderint apskaičiuotą kritinio elektrinio lauko priklausomybę nuo impulso trukmės, esant skirtingiems impulsų pasikartojimo dažniams  $f_p=1/T$  su eksperimentiškai išmatuota.

Tuo atveju, kai turime tik vieną charakteringą kondensatoriaus įkrovimo/išsikrovimo trukmę  $\tau_c = \tau_d$ , gauname paprastesnę išraišką, aprašančią  $E_{th}$  priklausomybę nuo  $\tau$ .

$$E_{th} = \frac{\pi U_m}{l(1 - \exp(-\tau/\tau_c))}. \quad (62)$$

Užrašydami (62), mes laikėme, kad  $T \gg \tau_c$ . Kaip matyti iš gautos išraiškos, kai  $\tau \ll \tau_c$ :

$$E_{th} = \frac{\pi \tau_c U_m}{l\tau}, \quad (63)$$

kritinis elektrinis laukas yra atvirkščiai proporcingas impulso trukmei. Lyginat (62), (63) su (59), (60) matyti, kad tiek šiluminio, tiek ir parazitinio krūvio modelių atvejais impulso trukmės su charakteringąja sistemos trukme santykis yra eksponentėje. Skirtumas tik tas, kad šiluminio modelio atveju kritinio elektrinio lauko didėjimas, trumpėjant impulsui bus silpnesnis, nes šiluminis poveikis yra proporcingas  $E^2$ , kai tuo tarpu parazitinio krūvio modelio atveju įkrovimo efektas yra proporcingas elektrinio lauko amplitudei.

## 6.2 DGM impulsų poveikio elektroninei aparatūrai tyrimai

Didelės galios mikrobangų elektrinio lauko poveikio tyrimus atlikome pusiau beatspindinėje Mikrobangų laboratorijos kameroje. Eksperimento schema pavaizduota 47 pav. Iš paveikslo matyti, kad eksperimento schema yra labai panaši į tyrimų schemą aprašytą 4.4 skyriuje. Mikrobangų generatorius į bangolaidinį traktą generuodavo mikrobangų impulsus. Jų galia buvo matuojama rezistoriniu jutikliu, prijungtu prie pagrindinio trakto per bangolaidinį šakotuvą. Mikrobangų impulsai per kalibruotą slopintuvą buvo nukreipiami į perduodančią anteną, kurios spinduliuojamais mikrobangų impulsais buvo paveikiamas tiriamasis elektroniniai prietaisai, mūsų atveju kompiuterinio tinklo maršrutizatoriai. Atstumas tarp spinduliuojančios antenos ir tiriamojo objekto buvo parenkamas taip, kad jis stovėtų tolimojoje spinduliuojančios antenos zonoje. Šalia maršrutizatoriaus buvo pastatyta

priimančioji ruporinė antena, sujungta su rezistoriniu jutikliu. Jis buvo naudojamas elektrinio lauko, veikiančio maršrutizatorių, stipriui nustatyti. Kadangi spinduliuojančios antenos stiprinimas yra žinomas, nesunkiai galima suskaičiuoti lauką, kuris yra sukuriamas priimančios antenos vietoje  $E_s$ :

$$E_s = \sqrt{2Z_0W}, \quad (64)$$

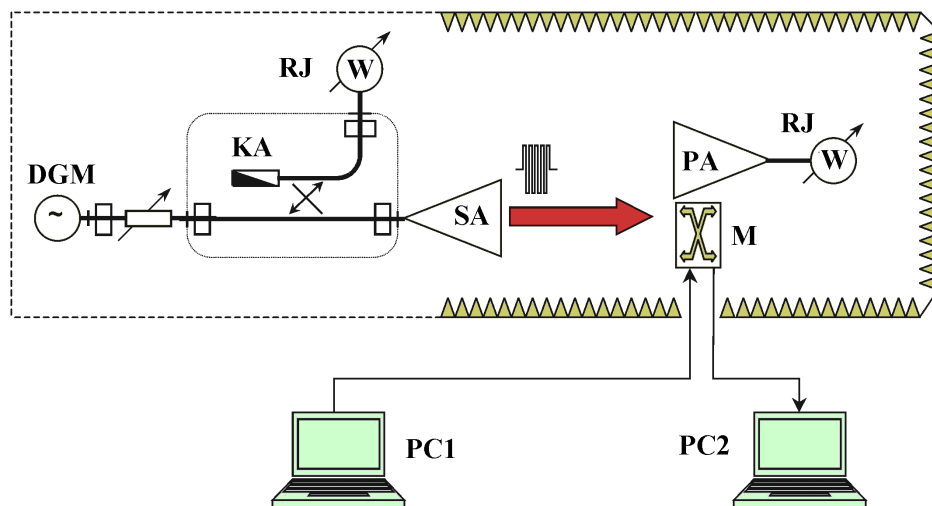
čia  $E_s$  yra amplitudinė elektrinio lauko reikšmė. Įstačius šią išraišką įstačius galios tankio formulę (50) gautume:

$$E_s = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{2Z_0G_sP}{4\pi}}, \quad (65)$$

čia  $P$  yra mikrobangų impulsų galia patenkanti į spinduliuojančią anteną. Elektromagnetinio atsparumo tyrimuose dažnai yra vartojame efektinė elektrinio lauko reikšmė,

$$\tilde{E}_s = \frac{E_s}{\sqrt{2}}. \quad (66)$$

Sakykime, kad RJ sujungtas su priimančia antena išmatuoja galią  $P_p$ . Ją nesunkiai galima susieti su priimančios antenos efektiu plotu  $S_{eff}$  ir galios tankiu  $W$ , kurį sukuria tame taške spinduliuojanti antena



47 pav. Stipraus elektromagnetinio lauko poveikio kompiuterinio tinklo maršrutizatoriams tyrimo Mikrobangų laboratorijos pusiau beatspindinėje kameroje blokinė schema: DGM pažymėtas didelės galios mikrobangų impulsų magnetroninis generatorius, KA – kryptinis šakotuvus, SA ir PA – spinduliuojanti ir priimanti ruporinės antenos, RJ – rezistorinis jutiklis matuojantis mikrobangų impulsų galią, M pažymėtas tiriamasis maršrutizatorius, PC1 ir PC2 yra kompiuteriai.

$$P_p = S_{eff}W. \quad (67)$$

Iš (64) išraiškos išreiškę galios tankį ir jį įstatę į (67), gautume išraišką leidžiančią nustatyti elektrinio lauko stiprį sukuriama priimančios antenos vietoje, kuri pažymėsime  $E_p$ , nes jis nustatomas pagal galią, kurią išmatuoja RJ sujungtas su priimančia antena:

$$E_p = \sqrt{\frac{2Z_0P_p}{S_{eff}}}. \quad (68)$$

Į šią išraišką įstatę efektyvaus antenos ploto išraišką (30) (65 psl.) gausime elektrinio lauko stiprio matuojamo su priimančia antena išraišką:

$$E_p = \sqrt{\frac{8\pi Z_0 P_p}{G_p \lambda^2}}. \quad (69)$$

Taigi, išmatavus mikrobangų impulsų galią, patenkančią į spinduliuojančią anteną  $P$ , ir galią  $P_p$ , patenkančią į priimančią anteną, elektrinio lauko stiprį tiriamojo objekto vietoje, pasinaudojus (65) ir (69) išraiškomis, galima nustatyti dviem nepriklausomais būdais. Reikia pastebėti, kad visuose mūsų atliktuose tyrimuose elektrinio lauko reikšmės nustatytos abiem būdais neblogai sutapdavo.

Apžvelgiant siunčiamo ir priimamo elektrinio lauko matavimus matyti, kad šiais atvejais indėlių į matavimo netikslumus įneša panašiai kaip ir ankstesniuose matavimuose DGM galios matavimai ir ruporinių antenų kalibravimo paklaidos. Siunčiamo elektrinio lauko esančio atstumu  $l$  nuo spinduliuojančios antenos bei priimamo elektrinio lauko su priimančiąja antena santykinės netiesioginių matavimų neapibrėžtis galime užrašyti taip:

$$\frac{\Delta E_s}{E_s} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{2P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_s}{2G_s}\right)^2}, \quad (70)$$

$$\frac{\Delta E_p}{E_p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{2P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_p}{2G_p}\right)^2}, \quad (71)$$

čia  $P = 95 - 1$  kW,  $\Delta P = 5 - 0,1$  kW,  $l = 1$  m,  $\Delta l = 15$  mm,  $G_s = G_p = 15 - 70$  dB,  $\Delta G_s = \Delta G_p = 1$  dB.

Kaip jau buvo minėta, elektromagnetinio atsparumo tyrimai buvo vykdomi pusiau beatspindinėje kameroje. Už šios kameros ribų buvo pastatomi du kompiuteriai, kurie per tiriamąjį prietaisą buvo sujungiami į vietinį tinklą. Tinklo greičio sumažėjimui nustatyti tarp dviejų kompiuterių buvo siunčiami didelės talpos failai, pasinaudojant failų perdavimo protokolu (FTP). Duomenų paketų perdavimo sutrikdymas išorinio elektromagnetinio lauko impulsais buvo įvertinamas tikrinant duomenų paketų perdavimą tarp dviejų kompiuterių, sujungtų per tiriamą prietaisą, panaudojant *Windows* operacinėje sistemoje esančią programą *Ping*. Minėtoji programa tikrina ar kompiuteris yra pasiekiamas per tinklą.

Įvairių elektromagnetinio pažeidžiamumo lygių kritiniai laukai buvo suskirstyti į 5 kategorijas:

- **L0** – kai laukas mažesnis už L0, poveikio elektroninei aparatūrai nėra, kai jis didesnis stebimas silpnas poveikis, krenta duomenų perdavimo sparta, tačiau paketai dar nėra prarandami.
- **L1** – vidutinis poveikis, prarandama dalis duomenų paketų.
- **L2** – stiprus poveikis, duomenų perdavimas yra visiškai sustabdomas, tačiau išjungus DGM impulsų spinduliavimą tiriamasis prietaisas atsistato savaime.
- **L3** – labai stiprus poveikis, duomenų perdavimas visiškai sustabdomas, prietaisas nebeveikia ir išjungus DGM impulsų spinduliavimą, o norint atstatyti ryšį tarp kompiuterių reikia perkrauti prietaisą (išjungti ir iš naujo įjungti prietaiso maitinimą).
- **L4** – gedimas, stebimas fizinis prietaiso gedimas, reikia pakeisti prietaisą ar jo dalį.

Tokių būdu, keisdami elektromagnetinio lauko stiprį, mes nustatėme tiriamojo elektroninio prietaiso vieno ar kito elektromagnetinio pažeidžiamumo lygio kritinį elektrinį lauką.

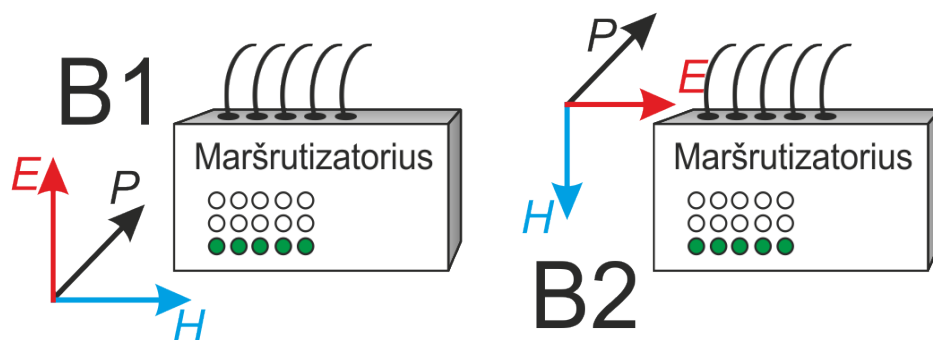


### 6.3 Maršrutizatorių atsparumo DGM impulsams tyrimai

Šiame poskyryje aprašyti kompiuterinio tinklo perjungėjų (switch) ir maršrutizatorių (router) atsparumo didelės galios mikrobangų impulsams tyrimai. Tinklo perjungėjas yra prietaisas, turintis keletą prievadų (dažniausiai penkis), gebantis išiminti sujungtų į tinklą kompiuterių MAC adresus ir pagal juos perskirstantis gaunamus į bet kurį prievadą paketus. Mes tyrėme du tokius prietaisus: senesnio modelio perjungėją Micronet SP605K galintį veikti 10/100 Mb/s sparta ir naujesnį 100/1000 Mb/s spartos modelį D-Link DGS-105. Maršrutizatorius yra kiek sudėtingesnis prietaisas, galintis ne tik perskirstyti paketus, bet ir suteikti prie jo prijungtiems kompiuteriams tinklo adresus. Mes tyrėme bevielį 100/1000 Mb/s spartos maršrutizatorių Canyon CNP-WF514 galinti atlikti tiek tinklo komutacijos tiek ir įtaisų prijungimo prie tinklo naudojant WiFi technologiją funkcijas. Toliau mes visus šiuos tirtus prietaisus vadinsime maršrutizatoriais.

Elektroninių tinklo prietaisų atsparumo elektromagnetinio lauko poveikiui tyrimo metodika yra aprašyta 6.2 skyriuje. Pagal (70) ir (71) formules suskaičiavę santykinės matavimų neapibrėžtis gauname, kad siunčiamo ir priimančio elektrinio lauko amplitudės išmatuojama  $\pm 3,3\%$  ir  $\pm 2,9\%$  procentų neapibrėžtimis atitinkamai siunčiamam ir priimamam elektriniam laukui.

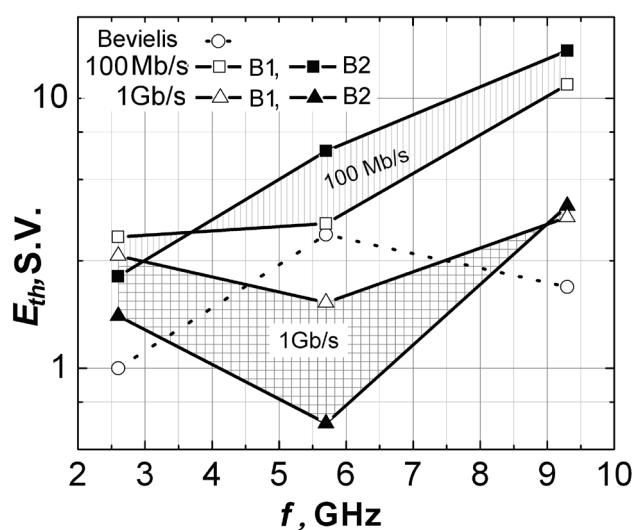
Tirdami laidinių maršrutizatorių atsparumą, mes naudojome dvi elektromagnetinės spinduliuotės poliarizacijas tiriamųjų objektų atžvilgiu kaip



48 pav. Eksperimentuose naudota DGM spinduliuotės poliarizacija tiriamojo maršrutizatoriaus atžvilgiu.  $P$  – Pointigo vektorius,  $E$  – elektrinio lauko ir  $H$  – magnetinio lauko vektoriai.

pavaizduota 48 pav. Kadangi bevielis maršrutizatorius turi išorinę anteną, šiuose tyrimuose apsiribojome vienu blogiausiu variantu (tikėtinas didžiausias išorinio lauko poveikis), kai jo antena yra lygiagreti išorinio elektrinio lauko vektoriui. Mes nustatėme maršrutizatorių kritinio elektrinio lauko  $E_{th}$ , kuriam esant pasiekiamas L3 pažeidžiamumo lygis, priklausomybę nuo mikrobangų dažnio, mikrobangų impulsų trukmės ir jų pasikartojimo dažnio. Galima priminti, kad, pasiekus L3 kritinį lauką, prietaisas nustoja funkcionuoti, ir jo savybės neatsistato, nuėmus išorinį poveikį.

Maršrutizatoriai buvo veikiami trimis skirtingais mikrobangų dažniais: 2,75 GHz (S), 5,7 GHz (C) ir 9,2 GHz (X), bei dviem skirtingomis elektrinio lauko kryptimis B1 ir B2 (48 pav.). Matavimų rezultatai, kuomet mikrobangų impulsų trukmė  $\tau = 1 \mu\text{s}$ , o pasikartojimo dažnis  $f = 12,5 \text{ Hz}$  yra pateikti 49 pav. Paveiksle parodytas L3 kritinio lauko, atidėto ordinačių ašyje santykiniais vienetais, priklausomybė nuo mikrobangų dažnio. Iš paveikslo matome, kad stebima pakankamai stipri  $E_{th}$  priklausomybė nuo mikrobangų dažnio ir spinduliavimo krypties. Kaip ir buvo galima tikėtis, bevielis maršrutizatorius buvo jautriausias 2,75 GHz dažnio mikrobangoms. Taip atsitinka todėl, kad bevielis internetas transliuojamas 2,4 GHz dažniu, todėl ir maršrutizatoriaus antena buvo jautriausia S diapazono mikrobangų

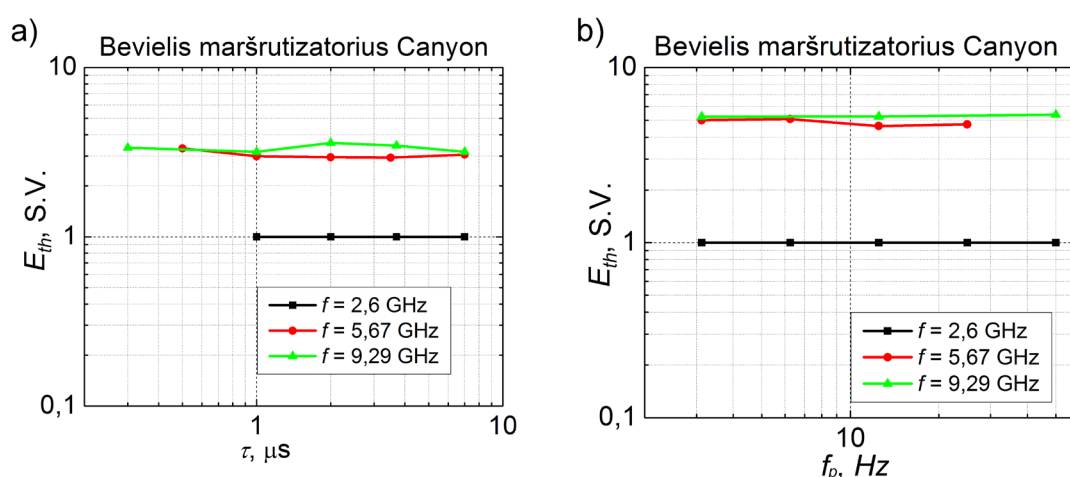


49 pav. Elektrinio lauko, reikalingo sukelti maršrutizatorių elektromagnetinio pažeidžiamumo lygį L3, priklausomybė nuo didelės galios mikrobangų dažnio. Užpildytos linijos vaizduoja skirtumą tarp L3 lygio kai prietaisai spinduliuojami skirtingos poliarizacijos DGM impulsais.

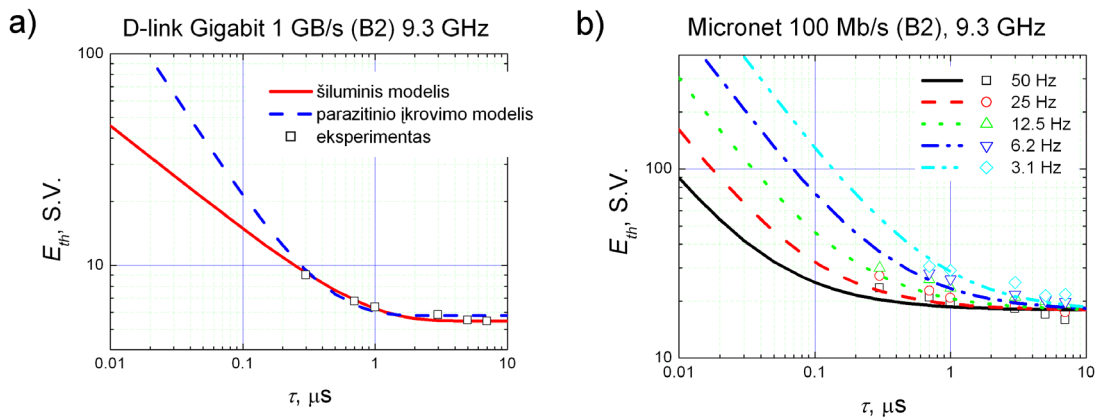
spinduliuotei. Iš paveikslo matyti, kad senesnio modelio 10/100 Mb/s perdavimo spartos maršrutizatoriui  $E_{th}$  abiem spinduliuotės kryptims didėja, augant dažniui. Tačiau modernesnis 1 Gb/s perdavimo spartos maršrutizatorius yra jautriausias 5,7 GHz mikrobangų spinduliuotei. Iš 49 pav. matyti, kad C diapazone šis maršrutizatorius yra labiau pažeidžiamas nei bevielis. Tai gali būti dėl to, kad jame yra naudojami didesnės spartos ir mažesnių matmenų elektroniniai komponentai, kurie yra jautresni didesnio dažnio elektromagnetiniai spinduliuotei. Jei tokia tendencija išsilaikytų, galime tikėtis, kad dar didesnės spartos 10 Gb/s spartos maršrutizatoriai bus žymiai jautresni didesnio dažnio spinduliuotei C ar X dažnių ruožuose.

Kaip jau buvo minėta, mes atlikome  $E_{th}$  tyrimus nuo DGM impulsų trukmės bei jų pasikartojimo dažnio. Tyrimų metu impulsų trukmė buvo keičiama 0,3 – 8  $\mu$ s intervale, o pasikartojimo dažnis nuo vienkartinį impulsų iki 50 Hz. Iš eksperimentinių rezultatų atliktų su bevieliu maršrutizatoriumi buvo nustatyta, kad minimalus elektrinis laukas reikalingas sutrikdyti maršrutizatoriaus darbą nepriklauso nei nuo impulsų trukmės nei nuo jų pasikartojimo dažnio, kas matyti iš eksperimentinių rezultatų pateiktų 50 pav.

Tyrinėjant laidinius maršrutizatorius pasirodė, kad kai kuriais atvejais  $E_{th}$  priklauso nuo impulsų trukmės ir jų pasikartojimo dažnio. Tokių eksperimentų



50 pav. Bevielio maršrutizatoriaus Canyon CNP-WF514 lygio L3 elektromagnetinio pažeidžiamumo priklausomybė nuo DGM impulsų trukmės (a) ir nuo jų pasikartojimo dažnio (b). Elektrinio lauko poliarizacija – B1. Elektrinio lauko amplitudė pavaizduota santykiniais vienetais



51 pav. Spartaus (a) ir senesnio modelio (b) maršrutizatorių lygio L3 kritinio elektrinio lauko priklausomybės nuo mikrobangų impulsų trukmės (poliarizacija B2). Eksperimento rezultatai parodyti simboliais, linijos – skaičiavimų rezultatai: (a) ištisinė linija atitinka šiluminiam modeliui, brūkšniuotoji linija parodo skaičiavimus parazitinio krūvio modeliui (b) kreivės apskaičiuotos parazitinio krūvio modeliui.

rezultatai prie 9,3 GHz dažnyje orientacija B2 yra parodyti taškais 51 pav. Kaip matyti iš paveikslo, kritinio lauko didėjimas trumpėjant mikrobangų trukmei yra užregistruotas abiejų tipų laidiniams maršrutizatoriams. Tokios priklausomybės yra būdingos tiek šiluminiam, tiek ir parazitinio krūvio modeliams.

Iš eksperimentinių 1 Gb/s maršrutizatoriaus tyrimo rezultatų parodytų 51a pav. matyti, kad kritinis laukas didėja apie 1,8 karto, impulso trukmei sumažėjus nuo 7 iki 0,3  $\mu\text{s}$ . Paveiksle taip pat parodytos priderintos prie eksperimento rezultatų  $E_{th}$  priklausomybės nuo impulso trukmės šiluminiam (59) ir parazitinio krūvio (62) modeliams. Pirmoji jų yra parodyta ištisine o antroji brūkšniuota linija. Parametrai derinat eksperimento rezultatus su apskaičiuotomis kreivėmis buvo tokie: šiluminiam modeliui  $\tau_h = 0,7 \mu\text{s}$ ,  $E_{th}(\tau \rightarrow \infty) = 5,5$ , o parazitinio krūvio modeliui  $\tau_c = 0,32 \mu\text{s}$ ,  $E_{th}(\tau \rightarrow \infty) = 5,8$ . Kaip matyti iš paveikslo abu modeliai neblogai atitinka eksperimentiškai išmatuotus taškus. Norint išrinkti kuris iš modelių yra tinkamesnis, eksperimentus reikėtų atlikti su 100 ns ar dar trumpesniais mikrobangų impulsais, ko deja mūsų turimi magnetroniniai generatoriai atlikti neleidžia.

Kaip matyti iš 51b pav., senesnio modelio maršrutizatoriui buvo pastebėta kritinio lauko priklausomybė tiek nuo impulso trukmės, tiek ir nuo jų

pasikartojimo dažnio. Matyti, kad  $E_{th}$  didėja apie 30% pasikartojimo dažniui mažėjant nuo 50 Hz iki 3 Hz. Kritinis laukas priklauso ir nuo impulso trukmės. Buvo pastebėta, kad naudojant trumpiausius impulsus  $\tau = 0,3 \mu\text{s}$  nepavyko pasiekti L3 lygio, panaudojus net didžiausią aparatūriškai įmanomą elektrinio lauko stiprį, kai pasikartojimo dažnis buvo lygus ar mažesnis nei 6 Hz. Panaudojus parazitinio krūvio modelį (61), buvo apskaičiuota kreivių šeima geriausiai sutampanti su eksperimentinio tyrimo rezultatais esant tokiems parametrams:  $\tau_c = 10 \mu\text{s}$ ,  $\tau_d = 5 \text{ s}$  ir  $E_{th}(\tau \rightarrow \infty) = 18$ . Ji yra parodyta 51b pav. linijomis. Iš paveikslo matyti, kad kaip ir prieš tai išanalizuoto vieno relaksacijos laiko atveju (žr. 51a pav.) patikimesniam parazitinio krūvio modelio patvirtinimui, eksperimentus reikėtų taip pat atlikti su dar trumpesniais ir didesnės amplitudės impulsais.

Apibendrinant šiame skyriuje pateiktus maršrutizatorių atsparumo DGM impulsų poveikiui tyrimus (L3 lygis) galima tvirtinti, kad senesnio modelio iki 100 MB/s prietaisai yra mažiau pažeidžiami, nei naujesnieji 1 GB/s greičio prietaisai. Buvo pastebėta kritinio elektrinio lauko priklausomybė nuo DGM impulsų trukmės ir jų pasikartojimo dažnio. Eksperimento rezultatai neblogai sutapo su abiem šiluminio ir parazitinio krūvio modeliais aprašytais 6.1 skyriuje. Norint nustatyti, kuris iš modelių geriau aprašo eksperimentų duomenis reikėtų atlikti eksperimentus su trumpesniais DGM impulsais.

Šio poskyrio rezultatai buvo atspausdinti straipsnyje: M. Dagys, Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, and V. Tamošiūnas, "Investigation of susceptibility of routers to high power microwave pulse radiation," in Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference on, 2010, Vol. 1 pp. 126-128.

#### **6.4 Šviesolaidinių konverterių atsparumo DGM impulsams tyrimai**

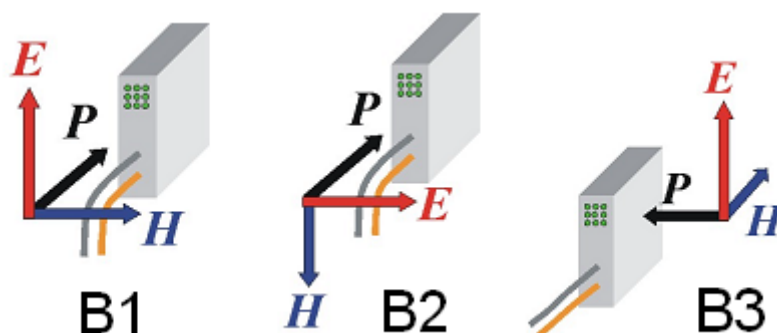
Šiame skyriuje aprašomi eksperimentų rezultatai gauti ištyrus šešių skirtingų šviesolaidinių konverterių atsparumą didelės galios mikrobangų impulsams:

- MOXA IMC-21-M-ST,
- EDIMAX -912MST,
- EDIMAX -912MST+,
- TP LINK MC100CM,
- EMINENT EM4001,
- Allied Telesyn AT-MC101XL.

Šviesolaidiniai konverteriai tai yra prietaisai, keičiantys elektrinius impulsus į šviesos impulsus ir atvirkščiai. Skirtingai nei maršrutizatorių tyrimu metu, tiriant šviesolaidinių konverterių atsparumą DGM impulsams buvo fiksuojami visi elektromagnetinių pažeidimų lygiai nuo L0 iki L4, kurie yra aprašyti 6.2 skyriuje. Eksperimentai atlikti 2,75 GHz, 5,7 GHz ir 9,2 GHz dažniuose naudojant tris elektromagnetinės spinduliuotės poliarizacijas tiriamųjų objektų atžvilgiu kaip pavaizduota 52 pav.

Atliekant tyrimus su skirtingos trukmės ir pasikartojimo dažnio DGM impulsais buvo pastebėtos labai silpnos minimalaus elektrinio lauko, reikalingo sutrikdyti šviesolaidinių konverterių darbą, priklausomybės nuo šių parametru. Todėl nepavyko gautų rezultatų priderinti nei prie šiluminio kaitimo modelio, nei prie parazitinio krūvio modelio. Taip gali būti todėl, kad šiuolaikinių šviesolaidinių konverterių laiko konstantos yra žymiai trumpesnės nei mūsų naudotos DGM impulsų trukmės.

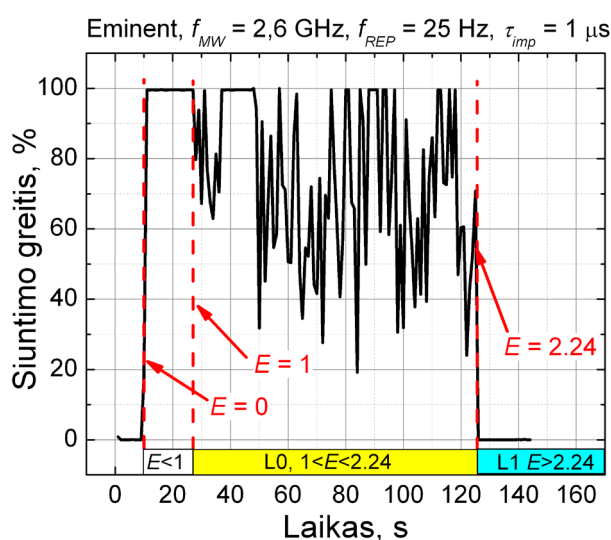
53 pav. pavaizduota tipinė tinklo apkrovimo diagrama, kuomet DGM



52 pav. Eksperimentuose naudota DGM spinduliuotės poliarizacija tiriamojo šviesolaidinio konverterio atžvilgiu.  $P$  – Pointigo vektorius,  $E$  – elektrinio lauko ir  $H$  – magnetinio lauko vektoriai

spinduliuote yra veikiamas šviesolaidinis konverteris. Eksperimentas buvo atliekamas tarp dviejų kompiuterių siunčiant didelės apimties failą, tokių būdu pilnai apkraunant kompiuterinį tinklą, ir tuo pat metu vykdant PING komandą, leidžiančią nustatyti ar yra ryšys tarp dviejų kompiuterių. Iš paveikslo matyti, kad nesant DGM spinduliuotei kompiuterinis tinklas yra apkrautas pilnai. Kai yra pasiekama L0 lygio spinduliuotė prasideda greičio fliktuacijos ir krenta bendras tinko apkrovimas. Kai yra pasiekiamas elektrinio lauko dydis, atitinkantis L1 lygį, duomenų siuntimas tarp kompiuterių nutrūksta, ir tuo pat metu pradedami stebėti dingę PING komandos paketai. Reiškinius atsirandančius L0 ir L1 pažeidžiamumo lygiuose galima paaiškinti sumažėjusiu signalo/triukšmo santykiu. Nes šiuose lygiuose neatsiranda jokių fizinių įrangos pažeidimų, o išjungus DGM spinduliuotę prietaiso veikimas akimirksniu atsistato.

Tyrinėjant šviesolaidinių konverterių atsparumą DGM spinduliuotei, mūsų tikslas buvo nustatyti sąlygas, kurioms esant tiriamasis prietaisas yra labiausiai pažeidžiamas. Todėl kiekviename dažnyje mes parinkome tokią spinduliuotės poliarizacijos kryptį (žr. 52 pav.), kurioje prietaiso pažeidžiamumas buvo pasiekiamas esant mažiausiai elektrinio lauko amplitudei. Nustatytos tokiu būdu įvairių šviesolaidinių konverterių



53 pav. Didelės galios mikrobangų poveikis kompiuterinio tinklo greičiui, didinat išorinio impulsinio mikrobangų elektrinio lauko, veikiančio Eminent EM4001 šviesolaidinį konverterį, amplitudę.

elektromagnetinio pažeidžiamumo lygių priklausomybės nuo didelės galios mikrobangų dažnio, kuomet impulso trukmė  $\tau = 4 \mu\text{s}$ , o pasikartojimo dažnis 12.5 Hz, yra parodytos 54 pav. Kaip ir ankstesniuose prietaisų atsparumo tyrimuose, elektrinio lauko reikšmės yra vaizduojamos santykiniais vienetais. Spalvų, nurodančių pažeidžiamumo lygį, lentelė yra pateikta 54 pav. Atliekant bandymus kartais buvo stebima tokia situacija, kad pasiekus pažeidžiamumo lygį L2, kuomet 100% PING paketų yra prarandama, tačiau po kiek laiko, ar netgi toliau didinant DGM impulsų galią, ryšys atsistato. Elektrinių laukų sritis, kurioje buvo pastebėtas šis reiškinys yra pažymėta L2 v1/v2. Prietaiso atsistatymas, DGM impulsais sutrikdžius ryšį tarp kompiuterių, gali būti paaiškinamas tuo, kad, sutrikus ryšiui tarp paketų siuntėjo ir priėmėjo, duomenų apdorojimo įrenginys padidina puslaidininkinio lazerio spinduliuojamą galią. Tokiu būdu pagerėja santykis signalas/triukšmas ir atsistato PING paketų perdavimas tarp kompiuterių.

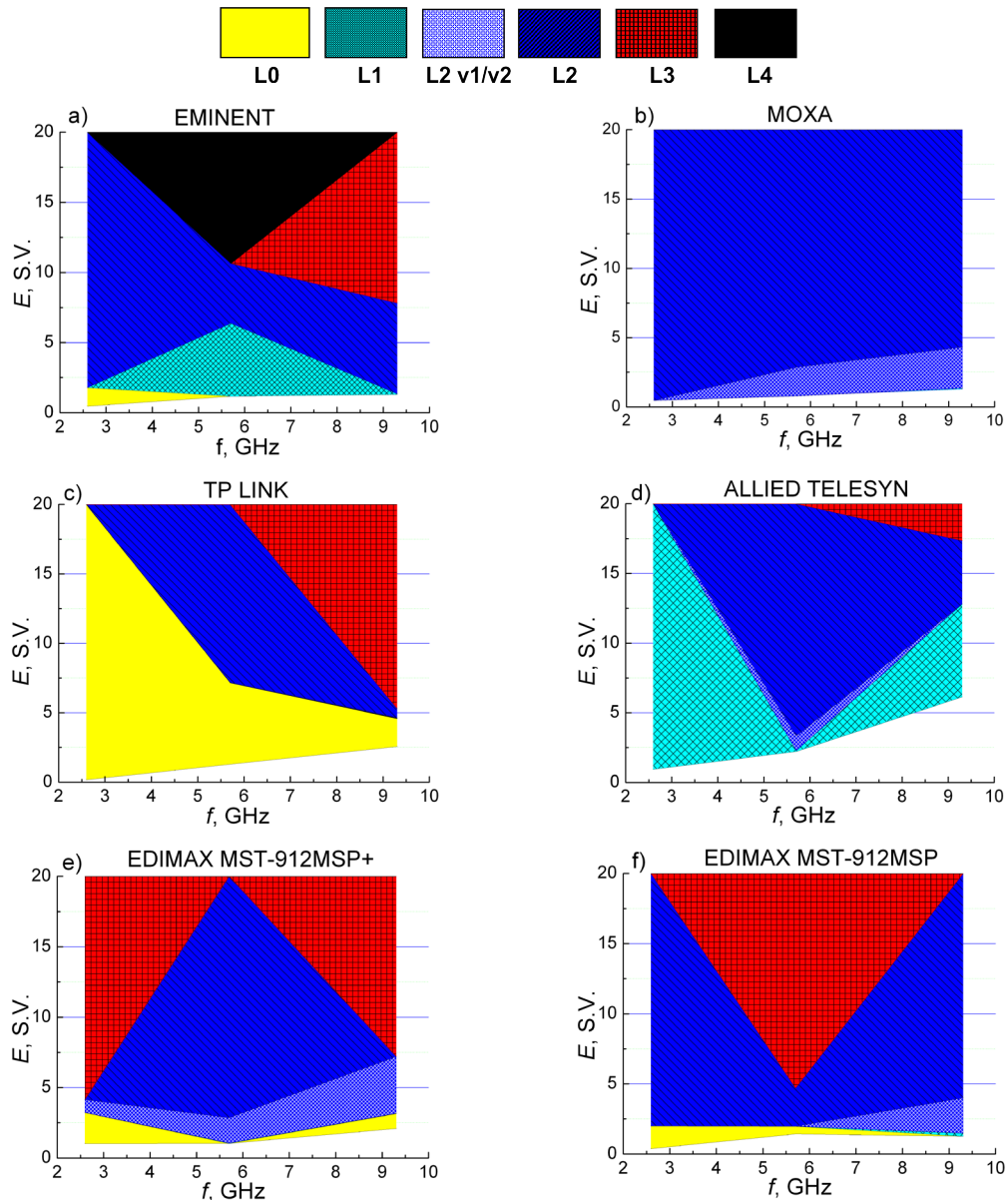
Kaip matyti iš 54a pav. šviesolaidinis konverteris EMINENT EM4001 C dažnių ruože buvo negrižtamai sugadintas. Kadangi L4 lygio nepavyko pasiekti nei vienam kitam prietaisui, eksperimentą pakartojome su kitu nesugadintu prietaisu ir jis patyrė gedimą esant tom pačiom eksperimentinėm sąlygom.

Iš 54 pav. pateiktų rezultatų matyti, kad tik vieninteliame iš tiriamųjų industriniame šviesolaidiniame konverteriui MOXA, kuris yra patalpintas į plastikinę dėžutę nepavyko pasiekti L3 lygio tirtame dažnių ir elektrinio lauko stiprių ruože. Išstudijavus visų šviesolaidinių konverterių elektrines schemas buvo nustatyta, kad industrinio konverterio optinis modulis gali dirbti platesniame temperatūrų diapazone ( $-10 - +85^{\circ}\text{C}$ ), nei optiniai moduliai naudojami komerciniuose prietaisuose ( $0 - +70^{\circ}\text{C}$ ). Tačiau sunku tikėtis, kad nežymiai didesnis temperatūrų diapazonas galėtų paaiškinti padidėjusį industrinių šviesolaidinių konverterių atsparumą DGM spinduliuavimui. Be to reikia atkreipti dėmesį į tai, kad industrinio šviesolaidinio konverterio korpusas buvo plastmasinis, kai tuo tarpu visų komercinių – metaliniai. Todėl galima manyti, kad metalinis korpusas tam tikriems mikrobangų dažniams veikia kaip



rezonatorius, taip mažindamas tokių šviesolaidinių konverterių atsparumą DGM impulsų poveikiui.

Apibendrinant šviesolaidinių konverterių atsparumo DGM impulsams tyrimus, reikėtų pastebėti, kad kai kurie prietaisai buvo sugadinti esant pakankamai mažai elektrinio lauko amplitudei, trumpam veikiančiam impulsui ir retam pasikartojimo dažniui. Atlikti tyrimai atskleidė, kad prietaisai su



54 pav. Šviesolaidinių konverterių elektromagnetinių atsparumo lygių priklausomybė nuo DGM dažnio, kai impulsų trukmė 1  $\mu$ s, o pasikartojimo dažnis 12,5 Hz. (a) – “Eminent” EM4001 metalinis korpusas, komercinis; (b) – “MOXA” IMC-21-M-ST plastmasinis, industrinis; (c) – “TP LINK” MC100CM metalinis, komercinis; (d) – “Allied Telesyn” AT-MC101XL metalinis, komercinis; (e) – “EDIMAX” –912 MST+ metalinis, komercinis; (f) – “EDIMAX” –912 MST metalinis, komercinis.

metaliniais korpusais yra labiau pažeidžiami nei su plastikiniais. Galimas dalykas, kad metalinės dėžutės su įvairiomis skylutėmis gali veikti kaip rezonatoriai, tokiu būdu blogindami elektroninių prietaisų atsparumą.

Šio poskyrio rezultatai buvo atspausdinti straipsnyje: Ž. Kancleris, R. Simniškis, P. Ragulis, M. Dagys, „Investigation of susceptibility of network switches and media converters to high power microwave pulse radiation“, NATO RTO SCI-232; Norfolk, USA, May 10-11, 2011.

## 7 Rezultatai ir išvados

- Atliekant modeliavimus, baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu, buvo surasti optimalių rezistorinių jutiklių, pritaikytų WR90, WRD250 ir WRD840 bangolaidžiams, fizikiniai parametrai.
- Modeliuojant baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu rezistorinių jutiklių jautriuosius elementus bangolaidžiuose pastebėta, kad, pakeitus jų skersinius matmenis ar savitąją varžą, keičiasi vidutinio elektrinio lauko jautriajame elemente priklausomybės nuo dažnio polinkis, kas leidžia optimizuoti jutiklio jautrio dažninę charakteristiką
- Naudojantis baigtinių skirtumų laiko skalėje metodu įsitikinta, kad rezistorinio jutiklio elektrofizikinius parametrus galima parinkti taip, kad sistema, sudaryta iš rezistorinio jutiklio ir prie jo prijungtos ruporinės antenos, pasižymėtų plokščia jautrio dažnine charakteristika.
- Pagaminti ir eksperimentiškai ištirti rezistoriniai jutikliai pritaikyti WR90, WRD250 bangolaidžiams. Eksperimentiškai nustatytas sukurtų jutiklių dažninės charakteristikos netolygumas jų darbo dažnių ruože yra apie  $\pm 9,1\%$  ir  $\pm 25\%$  atitinkamai jutikliams pritaikytiems WR90, WRD250 bangolaidžiams.
- Pagaminti rezistoriniai jutikliai gali registruoti mikrobangų impulsų signalus nuo kelių vatų, o jų aprėpiamas galių diapazonas siekia 50 dB.
- Ištyrus elektromagnetinio lauko poveikį, trims skirtingų tipų internetiniams maršrutizatoriams, nustatyta elektrinio lauko vertė, impulso trukmė ir pasikartojimo dažnis reikalingi norint pasiekti L3 pažeidžiamumo lygį. Taip pat pastebėta, kad 100 Mb/s spartos maršrutizatorius yra mažiausiai jautrus DGM spinduliuotei.
- Buvo pastebėta kritinio elektrinio lauko (L3 lygis) priklausomybė nuo DGM impulsų trukmės ir jų pasikartojimo dažnio. Nors ir

eksperimento rezultatai sutapo su abiejų analizuotų modeliais šiluminio ir parazitinio krūvio, tačiau norint nustatyti, kuris iš modelių geriau aprašo eksperimentų duomenis reikėtų atlikti eksperimentus su trumpesniais nei  $\tau = 0,7 \mu\text{s}$  DGM impulsais.

- Iš šviesolaidinių konverterių atsparumo DGM impulsams tyrimų matyti, kad kai kurie prietaisai buvo sugadinti esant pakankamai mažai elektrinio lauko amplitudei, trumpam veikiančiam impulsui ir retam pasikartojimo dažniui.

## 8 Naudotos literatūros sąrašas

- [1] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: Wiley. com, 2006.
- [2] Agilent, "Agilent App note 64-1C," 1995.
- [3] A. S. Brush, "Measurement of microwave power - A review of techniques used for measurement of high-frequency RF power," *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, vol. 10, pp. 20-25, 2007.
- [4] R. Roy, A. Kush, and R. Dixit, "Design and Development of Thermistor based Power Meter at 140 GHz Frequency Band," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 32, pp. 1407-1414, 2011.
- [5] D. Adamson, J. Miall, J. Howes, M. Harper, and R. Thompson, "A new 75-110 GHz primary power standard with reduced thermal mass," in *Microwave Measurements Conference (ARFTG), 2010 75th ARFTG*, 2010, pp. 1-4.
- [6] A. Daulle, P. Xavier, and D. Raully, "A power sensor for fast measurement of telecommunications signals using substitution method," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 1190-1196, 2001.
- [7] A. Daulle., J. Richard., P. Xavier., and D. Raully., "ELECTROMAGNETIC WAVE SENSOR," France Patent, 2003.
- [8] B. Mellouet, L. Velasco, and J. Achkar, "Fast method applied to the measurement of microwave power standards," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 381-384, 2001.
- [9] L. Brunetti, L. Oberto, M. Sellone, and E. Vremera, "Thermoelectric against bolometric microwave power standard," in *Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on*, 2012, pp. 732-733.
- [10] W. H. Jackson, "A thin-film/semiconductor thermocouple for microwave power measurements," *HP Journal*, vol. 26, 1974.
- [11] J. B. Scott, T. Low, S. Cochran, B. Keppeler, J. Staroba, and B. Yeats, "New thermocouple-based microwave/millimeter-wave power sensor MMIC techniques in GaAs," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 338-344, 2011.
- [12] K. Mutamba, K. Beilenhoff, A. Megej, R. Dorner, E. Genc, A. Fleckenstein, P. Heyman, J. Dickmann, C. Woelk, and H. Hartnagel, "Micromachined 60 GHz GaAs power sensor with integrated receiving antenna," in *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, 2001, pp. 2235-2238.
- [13] I. A. Ali, M. Kabula, and H. L. Hartnagel, "Electro-thermal simulation of micromachined power sensors at dc and microwave frequencies," in *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2010 7th International Symposium on*, 2010, pp. 1-6.

- [14] A. Dehe, V. Krozer, B. Chen, and H. Hartnagel, "High-sensitivity microwave power sensor for GaAs-MMIC implementation," *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 2149-2150, 1996.
- [15] D.-b. Wang and X.-p. Liao, "A novel MEMS double-channel microwave power sensor based on GaAs MMIC technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 188, pp. 95-102, 2012.
- [16] W. De Bo, L. X. Ping, and L. Tong, "A novel thermoelectric and capacitive power sensor with improved dynamic range based on GaAs MMIC technology," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 33, pp. 269-271, 2012.
- [17] L. J. Fernandez, R. Wiegerink, J. Flokstra, J. Sese, H. Jansen, and M. Elwenspoek, "A capacitive RF power sensor based on MEMS technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, p. 1099, 2006.
- [18] Y. Cui and X. Liao, "Modeling and design of a capacitive microwave power sensor for X-band applications based on GaAs technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, p. 055013, 2012.
- [19] H. Seppä, J. Kyynäräinen, and A. Oja, "Microelectromechanical systems in electrical metrology," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 440-444, 2001.
- [20] D. L. Rogers, J. M. Woodall, G. Pettit, and D. McInturff, "High-speed 1.3  $\mu$  m GaInAs detectors fabricated on GaAs substrates," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 9, pp. 515-517, 1988.
- [21] Z. Hu, V. Vo, and A. A. Rezazadeh, "High tangential signal sensitivity GaAs planar doped barrier diodes for microwave/millimeter-wave power detector applications," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 15, pp. 150-152, 2005.
- [22] L. Wang, F. Xiao, X.-H. Tang, and S.-Y. Wu, "A fast-speed pulse detector based on Si-Schottky diode," in *Microwave Conference, 2008. APMC 2008. Asia-Pacific*, 2008, pp. 1-4.
- [23] J. Gradauskas, A. Sužiedelis, S. Ašmontas, E. širmulis, V. Kazlauskaitė, A. Lucun, and M. Vingelis, "Sensitive planar semiconductor detector from microwave to IR applications," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 10, pp. 662-667, 2010.
- [24] A. Sužiedelis, S. Ašmontas, A. Kundrotas, J. Gradauskas, A. Čerškus, V. Nargelienė, and T. Anbindeis, "Planar Heterojunction Diode for Millimeter Waves Detection," in *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, 2012, pp. 927-930.
- [25] L. Earley, W. Ballard, L. Roose, and C. Wharton, "Comprehensive approach for diagnosing intense single-pulse microwave sources," *Review of scientific instruments*, vol. 57, pp. 2283-2293, 1986.
- [26] A. Roy, S. Singh, R. Menon, D. S. Kumar, R. Venkateswaran, M. Kulkarni, P. Saroj, K. Nagesh, K. Mittal, and D. Chakravarthy, "Measurement of high-power microwave pulse under intense electromagnetic noise," *Pramana*, vol. 74, pp. 123-133, 2010.

- [27] C. Adami, C. Braun, P. Clemens, M. Suhrke, H. Schmidt, and A. Taenzer, "HPM detection system for mobile and stationary use," in *EMC Europe 2011 York*, 2011, pp. 1-6.
- [28] J.-P. Ao, K. Takahashi, N. Shinohara, N. Niwa, T. Fujiwara, and Y. Ohno, "S-parameter Analysis of GaN Schottky Diodes for Microwave Power Rectification," in *Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-4.
- [29] J. O. McSpadden, R. M. Dickinson, L. Fan, and K. Chang, "A novel oscillating rectenna for wireless microwave power transmission," in *Microwave Symposium Digest, 1998 IEEE MTT-S International*, 1998, pp. 1161-1164.
- [30] U. L. Rohde and D. P. Newkirk, *RF/microwave circuit design for wireless applications*: Wiley-Interscience, 2000.
- [31] E. Hecht, *Optics 4th edition* vol. 1: Addison-Wesley Publishing Company, 2001.
- [32] P. P. Banerjee and T.-C. Poon, *Principles of applied optics*: Irwin Boston, 1991.
- [33] M. Bass and V. N. Mahajan, *Handbook of optics* vol. 2: McGraw-Hill, 2001.
- [34] L. Duvillaret, S. Rialland, and J.-L. Coutaz, "Electro-optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparison among different modulation techniques," *JOSA B*, vol. 19, pp. 2692-2703, 2002.
- [35] D.-J. Lee, N.-W. Kang, J.-H. Choi, J. Kim, and J. F. Whitaker, "Recent advances in the design of electro-optic sensors for minimally destructive microwave field probing," *Sensors*, vol. 11, pp. 806-824, 2011.
- [36] S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "Fiber-edge electrooptic/magneto-optic probe for spectral-domain analysis of electromagnetic field," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 2611-2616, 2000.
- [37] D.-J. Lee, N.-W. Kang, J.-Y. Kwon, and T.-W. Kang, "Field-calibrated electro-optic probe using interferometric modulations," *JOSA B*, vol. 27, pp. 318-322, 2010.
- [38] D. Le Quang, D. Erasme, and B. Huyart, "Fabry-Perot enhanced real-time electro-optic probing of MMICs," *Electronics Letters*, vol. 29, pp. 498-499, 1993.
- [39] A. Vickers, R. Tesser, R. Dudley, and M. Hassan, "Fabry-Perot enhancement of external electro-optic sampling," *Optical and quantum electronics*, vol. 29, pp. 661-669, 1997.
- [40] P. Muller, S. Alleston, A. Vickers, and D. Erasme, "An external electrooptic sampling technique based on the Fabry-Perot effect," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 35, pp. 7-11, 1999.
- [41] O. Mitrofanov, A. Gasparyan, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Electro-optic effect in an unbalanced AlGaAs/GaAs microresonator," *Applied Physics Letters*, vol. 86, pp. 202103-202103-3, 2005.

- [42] D.-J. Lee, J.-Y. Kwon, H.-Y. Ryu, and J. F. Whitaker, "A multi-layer electro-optic field probe," *Optics Express*, vol. 18, pp. 24735-24744, 2010.
- [43] T. Nagatsuma, M. Shinagawa, N. Sabri, A.-i. Sasaki, Y. Royter, and A. Hirata, "1.55- $\mu\text{m}$  photonic systems for microwave and millimeter-wave measurement," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 1831-1839, 2001.
- [44] A. Kanno, K. Sasagawa, and M. Tsuchiya, "W-band live electro-optic imaging system," in *Microwave Conference, 2008. EuMC 2008. 38th European*, 2008, pp. 369-372.
- [45] E. Ryder and W. Shockley, "Mobilities of electrons in high electric fields," *Physical Review*, vol. 81, p. 139, 1951.
- [46] M. Dagys, Ž. Kancleris, R. Simniškis, E. Schamiloglu, and F. J. Agee, "The resistive sensor: a device for high-power microwave pulsed measurements," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 43, pp. 64-79, 2001.
- [47] V. Dienys, Ž. Kancleris, and Z. Martūnas, *Warm electrons*. Vilnius: Mokslas, 1983.
- [48] Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Dagys, and V. Tamošiūnas, "High power millimetre wave pulse sensor for W-band," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 1, pp. 757-762, 2007.
- [49] G. Wang, J. Wang, X. Wang, and R. Fan, "The Analysis and Design of High Power Millimeter Wave Pulse Detector for 2 mm Frequency Band," *Session 4AP*, p. 811, 2010.
- [50] Ž. Kancleris, R. Simniškis, M. Dagys, and V. Tamošiūnas, "X-band resistive sensor for high-power microwave pulse measurement with flat frequency response," *Electronics Letters*, vol. 44, pp. 1143-1144, 2008.
- [51] Ž. Kancleris, V. Tamošiūnas, M. Dagys, R. Simniškis, and F. Agee, "Interaction of a semiconductor sample partly filling a waveguide's window with millimetre wave radiation," in *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, 2005, pp. 240-244.
- [52] R. Simniškis, M. Dagys, Ž. Kancleris, and V. Tamošiūnas, "Experimental Investigation of Resistive Sensor for High Power Millimetre Wave Pulse Measurement," 2008.
- [53] G.-q. Wang, J.-g. Wang, X.-f. Wang, C.-j. Tong, and S. Li, "An overmoded structure for the narrowband high-power terahertz pulse detection," in *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 1-4.
- [54] S. B. Cohn, "Properties of ridge waveguide," *Proceedings of the IRE*, vol. vol. 35, pp. 783-788, August 1947.
- [55] S. Hopfer, "The design of ridged waveguides," *Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on*, vol. 3, pp. 20-29, 1955.
- [56] J. Helszajn, *Ridge waveguides and passive microwave components*: IEE, 2000.



- [57] W. J. Hoefler and M. Burton, "Closed-form expressions for the parameters of finned and ridged waveguides," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 2190-2194, 1982.
- [58] E. Schamiloglu, "High power microwave sources and applications," in *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International*, 2004, pp. 1001-1004.
- [59] W. D. Prather, C. E. Baum, R. J. Torres, F. Sabath, and D. Nitsch, "Survey of worldwide high-power wideband capabilities," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 335-344, 2004.
- [60] D. Mansson, "Intentional electromagnetic interference (IEMI). Susceptibility investigations and classification of civilian systems and equipment," Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Upsaliensis, 2008.
- [61] D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J. L. ter Haseborg, and H. Garbe, "Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 380-389, 2004.
- [62] H. Wang, J. Li, H. Li, K. Xiao, and H. Chen, "Experimental study and spice simulation of CMOS inverters latch-up effects due to high power microwave interference," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 87, pp. 313-330, 2008.
- [63] D. Mansson, R. Thottappillil, T. Nilsson, O. Lundén, and M. Backstrom, "Susceptibility of civilian GPS receivers to electromagnetic radiation," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions*, vol. 50, pp. 434-437, 2008.
- [64] M. Dagys, Ž. Kancleris, P. Ragulis, R. Simniškis, and V. Tamošiūnas, "Investigation of susceptibility of routers to high power microwave pulse radiation," in *Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference on*, 2010, pp. 1-3.
- [65] C. Longmire, "On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 3-13, 1978.
- [66] V. Dwyer, A. Franklin, and D. Campbell, "Thermal failure in semiconductor devices," *Solid-State Electronics*, vol. 33, pp. 553-560, 1990.
- [67] N. Rinaldi, "On the modeling of the transient thermal behavior of semiconductor devices," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 2796-2802, 2001.
- [68] D. Wunsch and R. Bell, "Determination of threshold failure levels of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltages," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 244-259, 1968.
- [69] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:172480/FULLTEXT01.pdf>. (2013).
- [70] R.-Y. Fang and J. Moll, "Latchup model for the parasitic pnpn path in bulk CMOS," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 31, pp. 113-120, 1984.

- [71] W. Reczek, J. Winnerl, and W. Pribyl, "Critical charge model for transient latch-up in VLSI CMOS circuits," in *Microelectronic Test Structures, 1989. ICMTS 1989. Proceedings of the 1989 International Conference on*, 1989, pp. 251-254.
- [72] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics* vol. 160: Artech house BostonLondon, 2000.
- [73] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic waves and antennas*: Rutgers University, 2002.
- [74] V. Šlekienė, J. Sitonytė, and S. Pelanskis, *Fizikos praktikumo metodika*: Šiaulių universiteto leidykla, 2004.