



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Haroldas Lukas SMIČIUS

MIKROJUOSTELINIŲ MIKROBANGŲ FILTRŲ MODELIAVIMAS IR TYRIMAS

MODELLING AND INVESTIGATION OF MICROSTRIP MICROWAVE FILTERS

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modeliavimas ir tyrimas**
Autorius **Haroldas Lukas Smičius**
Vadovas **Darius Plonis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šio darbo tikslas - ištirti mikrojuostelinių mikrobangų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikas bei nustatyti šių filtrų centrinio dažnio valdymo galimybes. Siekiant šio tikslo buvo atlikta darbų apie mikrojuostelinius filtrus analitinė apžvalga, feroelektrinių medžiagų santykinės dielektrinės skvarbos parametro priklausomybių analizė, parašyti algoritmai ir programos mikrojuostelės matmenims skaičiuoti, sumodeliuoti ir ištirti du briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (BSPBIR) konstrukcijos feroelektriniai filtrai. Vienas iš jų naudoja 1 μm , kitas - 2 μm storio feroelektrinius padėklus. Atitinkamai filtrų centriniai dažniai - 31 GHz ir 30,6 GHz, suderinamumas esant 20 V nustatymo įtampai - 31,7 % ir 21,15 %, maksimalūs perdavimo nuostoliai (kai $E=0$) - 10,8 dB ir 8,7 dB, minimalus atspindžių slopinimas - 3 dB ir 4 dB. Tokie sumodeliuotų filtrų parametrai tenkina užduoties sąlygas, nes naudojant žemą centrinio dažnio nustatymo įtampą (iki 20 V) filtrai pasižymi aukštu suderinamumu.

Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos laipsniui.
Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2019, 53 p., 21 iliustr., 5 lent., 35 bibl., 2 priedai.

Prasminiai žodžiai: derinami, mikrojuosteliniai, juostiniai, mikrobangų, plonasluoksniai, feroelektriniai, filtrai, MATLAB, Sonnet, santykinė, dielektrinė skvarba, bario strončio titanatas, centrinis dažnis.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electronic Systems

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Electronics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Modeling and Investigation of Microstrip Microwave Filters**
Author **Haroldas Lukas Smičius**
Academic supervisor **Darius Plonis**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The purpose of this work - to investigate the transmission and reflection characteristics of microstrip microwave filters and to determine the central frequency control capabilities of these filters. For this purpose, an analytical review of work on microstrip filters was made, an analysis of the dependencies of the relative dielectric permittivity parameter of ferroelectric materials was made, algorithms and programs for calculating microstrip dimensions was developed and two ferroelectric Parallel-Coupled Half-Wavelength Resonator filters was made and investigated. One of them uses 1 μm thick substrate, other uses 2 μm thick substrate. Respectively center frequencies are 31 GHz and 30,6 GHz, tunability at 20 V bias voltage are 31,7 % and 21,15 %, insertion losses (when $E=0$) are 10,8 dB and 8,7 dB, return losses are 3 dB and 4 dB. Such parameters of simulated filters meet the task conditions, because the filters have high tunability at low bias voltage (up to 20 V).

Modeling and Research of Microstrip Microwave Filters. Master's Thesis for Electronics Engineering Degree. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, 2019, 53 p., 21 illustrations, 5 tables, 35 bibl., 2 appendixes.

Keywords: tunable, microstrip, band-pass, microwave, thin-film, ferroelectric, filter, MATLAB, Sonnet, relative, dielectric permittivity, barium, strontium, titanate, center frequency.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas)

Prof. dr. D. Navakauskas

2019 m. _____ mėn. ____ d.

Haroldas Lukas SMIČIUS

**MIKROJUOSTELINIŲ MIKROBANGŲ FILTRŲ MODELIAVIMAS IR
TYRIMAS**

**MODELLING AND INVESTIGATION OF MICROSTRIP MICROWAVE
FILTERS**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. D. Plonis

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Konsultantas

dr. A. Gaidienė

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valst. kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

prof. dr. D. Navakas

201_ m. _____ mėn. ____ d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS

Studentui

Haroldas Lukas SMIČIUS

Baigiamojo darbo tema: Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modeliavimas ir tyrimas

Modeling and Investigation of Microstrip Microwave Filters

Patvirtinta 201_ m. _____ mėn. ____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201_ m. _____ mėn. ____ d.

Darbo tikslas – ištirti mikrojuostelinių mikrobangų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikas ir nustatyti šių filtrų valdymo galimybes.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti darbo temą parašytos literatūros analizę.
2. Atrinkti ir apskaičiuoti feroelektrinių medžiagų dielektrines skvarbas.
3. Sudaryti mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modelius.
4. Išanalizuoti sudarytų modelių perdavimo ir atspindžio charakteristikas ir nustatyti jų valdymo galimybes.

Aiškinamojo rašto turinys

1. Įvadas
 - 1.1. Darbo aktualumas ir tikslas
 - 1.2. Darbo uždaviniai
 - 1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai
 - 1.4. Darbo naujumas ir praktinė nauda
 - 1.5. Darbo struktūra
2. Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų analitinė apžvalga

3. Feroelektrinių medžiagų atranka ir analizė
4. Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modelių sudarymas
5. Perdavimo ir atspindžio charakteristikų analizė

Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

A priedas. Skaityto pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma

B priedas. Pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas:

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

(parašas)

doc. dr. Darius Plonis

(pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(parašas)

201_ m. _____ mėn. ____ d.

TURINYS

Žymenys ir santrumpos	7
Ivadas	9
Darbo aktualumas ir tikslas	9
Darbo uždaviniai	9
Naudoti tyrimo ir analizės metodai	10
Darbo naujumas ir praktinė nauda	10
Darbo struktūra	10
1. Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų analitinė apžvalga	11
1.1. GSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų apžvalga	11
1.2. BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų apžvalga.....	12
1.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas	13
2. Feroelektrinių medžiagų atranka ir analizė	14
2.1. Feroelektrinių medžiagų būsenos	14
2.2. Feroelektrinio sluoksnio storis	17
2.3. Elektrinio lauko poveikis feroelektriko dielektrinei skvarbai.....	19
2.4. Trumpas skyriaus apibendrinimas	22
3. Mikrojuostelinių mikrobangų filtrų modelių sudarymas	23
3.1. Lygčių filtrams modeliuoti aiškinimas	23
3.1.1. GSPBIR konstrukcijos filtrai.....	23
3.1.2. BSPBIR konstrukcijos filtrai	28
3.2. Mikrojuostelinių filtrų modeliavimas	33
3.2.1. GSPBIR konstrukcijos filtro modeliavimas	33
3.2.2. BSPBIR konstrukcijos filtro modeliavimas	38
3.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas	43
4. Perdavimo ir atspindžio charakteristikų analizė	44
4.1. Sumodeliuotų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos.....	44
4.2. Sumodeliuotų filtrų charakteristikų palyginimas su kitų autorių tyrimuose aprašytomis feroelektrinių filtrų charakteristikomis	47
4.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas	48
Apibendrinimas. Išvados	49
Literatūra	51

A priedas. Skaityto pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma.....	55
B priedas. Pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga ...	56

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS

Lotynų kalbos abėcėlė

$B_{j,j+1}$	tarpelio tarp j -ojo ir $j+1$ -ojo rezonatorių susceptansas, S
BSPBIR	briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių konstrukcija
BST	bario strončio titanatas
BTO	bario titanatas
$C_g^{j,j+1}$	tarpelio tarp j -ojo ir $j+1$ -ojo rezonatorių nuoseklioji talpa, F
$C_p^{j,j+1}$	tarpelio tarp j -ojo ir $j+1$ -ojo rezonatorių šuntuojančioji talpa, F
E	elektrinis laukas, kV/cm
EMB	elektromagnetinė banga
FBW	(angl. <i>Fractional Bandwidth</i>) praleidžiamų dažnių juostos plotis, %
f_0	rezonanso dažnis, Hz
f_{0b}	rezonanso dažnis po mastelio korekcijos, Hz
f_{0d}	rezonanso dažnis iki mastelio korekcijos, Hz
$g_0, g_1, \dots, g_n$	ekvivalentinio žemų dažnių filtro koeficientai
GSPBIR	galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių konstrukcija
$J_{j,j+1}$	tarpelio tarp j -ojo ir $j+1$ -ojo rezonatorių charakteringasis admitansas, S
l_j	j -ojo rezonatoriaus / pusrezonatoriaus ilgis, mm
m	filtro mastelio sumažinimo santykis
n	filtro pakopų skaičius
$S_{j-1,j}$	tarpelis tarp $j-1$ -ojo ir j -ojo rezonatorių, mm
STO	strončio titanatas
T	temperatūra, °C
T_C	medžiagos <i>Kiuri</i> temperatūra, °C
W	mikrojuostelės plotis, mm
w_j	j -ojo pusrezonatoriaus plotis, mm
Y_0	filtro įėjimo ir išėjimo išvadų charakteringasis admitansas, S
Z_0	filtro įėjimo ir išėjimo išvadų charakteringasis impedansas, Ω
Z_{0e}	charakteringasis impedansas esant porinei modai, Ω
Z_{0o}	charakteringasis impedansas esant neporinei modai, Ω

Graikų kalbos abėcėlė

α	ϵ_r priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio koeficientas
β	ϵ_r priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio charakteristikos statumo koeficientas
Δl_j^{e1} ir Δl_j^{e1}	j -ojo rezonatoriaus ilgiai, skirti šuntuojančiosioms talpoms atitinkamai viename ir kitame rezonatoriaus galuose, mm
ϵ_r	santykinė dielektrinė skvarba
ϵ_{rb}	ϵ_r po mastelio korekcijos
ϵ_{rd}	ϵ_r iki mastelio korekcijos
ϵ_{re}	santykinės dielektrinės skvarbos efektyvioji dalis
ϵ_{00}	įsotinto feroelektriko santykinė dielektrinė skvarba
ϵ	ϵ_r po ir iki mastelio korekcijos santykis
θ_j	j -ojo rezonatoriaus elektrinis ilgis, rad
λ_{g0}	rezonanso bangos ilgis medžiagoje, mm
λ_{g0j}	rezonanso bangos ilgis j -ajame pusrezonatoriuje, mm
ω_0	kampinis dažnis esant rezonansui, rad/s

IVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Tikslas – ištirti mikrojuostelinių mikrobangų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikas ir nustatyti šių filtrų centrinio dažnio valdymo galimybes. Centrinio dažnio valdymas realizuotas naudojant feroelektrinę medžiagą kaip mikrojuostelinio filtro padėklą. Šių filtrų tyrimai šiuo metu yra labai aktualūs, nes šiuolaikinės komunikacinės sistemos duomenų perdavimui naudoja mikrobangas, o su artėjančia 5G mobiliojo ryšio technologija, kurios tikimasi sulaukti 2020 metais, atsiras poreikis, kad mobilieji įrenginiai gebėtų dirbti 24,25–86 GHz dažnių diapazone, o taip pat palaikyti ir dabartinius standartus, kurie naudoja dažnius 0,85–2,4 GHz diapazone (Huawei 5G spectrum). Tokiam plačiam mikrobangų dažnių diapazonui palaikyti reikalingi derinamo centrinio dažnio mikrobangų filurai, kurie taip pat turi būti kompaktiški ir ekonomiškai, nes turi tilpti į išmaniojo telefono dydžio prietaisą, kuris maitinamas iš baterijų. Mikrojuosteliniai filurai, lyginant su šiuo metu populiariausiais LC rezonansiniais kontūrais, yra pranašesni, nes geba dirbti aukštesniuose dažniuose ir yra kompaktiškesni (Miller, 2012). Feroelektrinis padėklas šiam filtrui suteikia centrinio dažnio valdymo funkciją. Jokia kita centrinio dažnio valdymo technologija nėra taip gerai tinkanti mikrojuosteliniams filtrams kaip ši (Miller, 2012), tačiau tai nėra vienintelis feroelektrikų pranašumas, jie dar pasižymi greitu derinimu, žema nustatymo įtampa ir galia, kompaktiškumu bei patikimumu (Tiggelman, 2009; Miller, 2012).

Darbo uždaviniai

Atlikti mokslinės literatūros apžvalgą apie mikrojuostelinius filurus. Atlikti feroelektrinių medžiagų dielektrinės skvarbos parametro priklausomybės nuo medžiagos sudėties, temperatūros ir ją veikiančio elektrinio lauko stiprio analizę. Parašyti algoritmus ir programas šioms priklausomybėms skaičiuoti. Atlikti galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (GSPBIR) ir briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (BSPBIR) konstrukcijų filtrų mikrojuostelės matmenų skaičiavimo formulių analizę. Parašyti algoritmus ir programas GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų filtrų mikrojuostelės matmenims skaičiuoti. Sumodeliuoti feroelektrinius mikrobangų filurus ir ištirti jų perdavimo ir atspindžio charakteristikas bei centrinio dažnio valdymo galimybes.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Filtrų charakteristikų tyrimams atlikti naudojamas programinis paketas „Sonnet“, skirtas elektromagnetinių bangų modeliams tirti kompiuterinėje erdvėje. Juo apskaičiuojamos filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos bei atvaizduojami jų grafikai. Programinis paketas „Sonnet“ skaičiavimus atlieka pasitelkiant momentų metodą ir Maksvelo lygtis.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Feroelektrikų tyrimai prasidėjo XX a. pradžioje (Tiggelman, 2009). Daug mokslininkų dėmesio jie susilaukė dėl paraelektrinėje būsenoje pasireiškiančios savybės – dielektrinės skvarbos dydžio priklausomybės nuo feroelektriką veikiančio elektrinio lauko ir temperatūros (Hong, 1976). Maždaug 1960 metais, dėl šios savybės, feroelektrikai buvo nuodugniai tiriama siekiant juos taikyti derinamos talpos kondensatorių (varikapų) gamyboje (Hong, 1976). Feroelektriniai varikapai, lyginant su dabar naudojamais šios srities analogais (puslaidininkiniu ir MEMS varikapais), pasižymi greitu valdymu, žema valdymo įtampa, yra kompaktiški, lengvi, patikimi, kadangi valdomi elektriniu lauku, naudoja mažai energijos (Tiggelman, 2009; Miller, 2012). Feroelektriniai varikapai yra labai paprastai integruojami į mikrojuostelinius filtrus (Miller, 2012). Šioje taikymo srityje jie nėra pakankamai tyrinėti naudojant kompiuterines modeliavimo priemones. Modeliuojant kompiuteriu išvengiama gamybos ir matavimų paklaidų (Miller, 2012), taip pat sutaupoma laiko ir pinigų.

Darbo struktūra

Aiškinamąjį raštą sudaro 6 dalys. Darbas pradedamas įvadu. Pirmajame skyriuje pateikiama analitinė literatūros apie mikrojuostelinius mikrobangų filtrus apžvalga. Apžvelgiami GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų mikrojuosteliniai filtrai.

Antrajame skyriuje nagrinėjamos feroelektrikų santykinės dielektrinės skvarbos parametro priklausomybės nuo medžiagos sandaros, temperatūros ir ją veikiančio elektrinio lauko stiprio.

Trečiajame skyriuje nagrinėjamos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų mikrojuostelinių filtrų matmenų skaičiavimo formulės, rašomos jas skaičiuojančios programos ir modeliuojami du mikrojuosteliniai feroelektriniai mikrobangų filtrai.

Ketvirtajame skyriuje tiriamos darbe sumodeliuotų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos bei centrinio dažnio nustatymo galimybės. Taip pat palyginami šiame darbe tirtų filtrų parametrai su kitų autorių darbuose aprašytų feroelektrinių mikrojuostelinių mikrobangų filtrų parametrais. Darbas pabaigiamas apibendrinimu ir išvadomis.

1. MIKROJUOSTELINIŲ MIKROBANGŲ FILTRŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Skyriaus tikslas – susipažinti su mikrojuostelinių mikrobangų filtrų tema parašytais darbais. Skyriuje pristatomi darbai, kuriuose aprašomi GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų mikrojuostelinių filtrų tyrimai.

1.1. GSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų apžvalga

Straipsnyje (Gupta, 2015) aprašomas juostinio penktos eilės Čebyševio mikrojuostelinio filtro modeliavimas ir tyrimas. Filtras modeliuojamas naudojant EMB modeliavimo programinę įrangą „IE3D“. Padėklui pasirinktas 1,6 mm storio „FR4“ dielektrikas, kurio ϵ_r yra 4,4. Suprojektuotas filtras, kurio centrinis dažnis – 6,05 GHz, pralaidumo juostos plotis – 2,8 % centrinio dažnio, perdavimo ir atspindžių nuostoliai centriniame dažnyje atitinkamai – 21 dB ir 4,3 dB.

Straipsnyje (Lindo, 2015) aprašomas dviejų juostinių filtrų projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklams pasirinkti 96 % aliuminio oksido dielektrikai, padengti 10–90 μm „QM44F“ dielektrine danga, siekiant gauti ϵ_r lygias 8 ir 9. Abiejų pagamintų filtrų centrinis dažnis – 90 GHz, bet filtras, naudojantis didesnės dielektrinės skvarbos padėklą, pasižymi siauresne praleidžiamų dažnių juosta, mažesniais nuostoliais ir stipresniu signalo slopinimu už praleidžiamų dažnių juostos ribų.

Straipsnyje (Singh, 2015) aprašomas dviejų juostinių penktos eilės Čebyševio mikrojuostelinių filtrų modeliavimas ir tyrimas. Filtrai modeliuojami naudojant EMB modeliavimo programinę įrangą „IE3D“. Padėklui pasirinktas 0,635 mm storio dielektrikas, kurio ϵ_r yra 10,2. Sumodeliuotų filtrų centriniai dažniai – 6 GHz ir 10 GHz, pralaidumo juostos pločiai atitinkamai – 6 % ir 5 % centrinio dažnio, perdavimo nuostoliai – 2 dB ir 7 dB ir atspindžių nuostoliai – 19 dB ir 6 dB. Pastebėta, kad GSPBIR konstrukcija suprojektuotų filtrų pralaidumo juosta teoriškai negalėtų viršyti 10 % centrinio dažnio ribos.

Straipsnyje (Vosoogh, 2016) aprašomas juostinio ketvirtos eilės Čebyševio mikrojuostelinio filtro projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklui pasirinktas 0,253 mm storio „Rogers RO3003“ dielektrikas, kurio ϵ_r yra 3. Pagaminto filtro centrinis dažnis – 62 GHz, pralaidumo juostos plotis – 3,2 % centrinio dažnio, perdavimo ir atspindžių nuostoliai centriniame dažnyje atitinkamai – 3 dB ir 12,5 dB.

Straipsnyje (QIN, 2016) aprašomas juostinio ketvirtos eilės Čebyševio mikrojuostelinio filtro projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklui pasirinktas 0,79 mm storio „Duroid 5870“

dielektrikas, kurio ϵ_r yra 2,33. Pagaminto filtro centrinis dažnis – 3,2 GHz, pralaidumo juostos plotis – 6,25 % centrinio dažnio, perdavimo ir atspindžių nuostoliai atitinkamai – 5 dB ir 30 dB.

Straipsnyje (Cunningham, 1989) aprašomas dviejų juostinių filtrų projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklams pasirinkti 0,254 mm (10 mil) ir 0,635 mm (25 mil) storio aliuminio oksido dielektrikai, kurių ϵ_r yra 9,4. Pastebėta, kad storesnį padėklą naudojantis filtras pasižymi mažesniais perdavimo nuostoliais, tačiau ir silpnesniu signalo slopinimu už pralaidumo juostos ribų. Darbe palyginami tokių pačių parametrų GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų filurai ir daroma išvada, kad GSPBIR konstrukcija yra tinkamesnė projektuojant aukšto centrinio dažnio ir siauros praleidžiamų dažnių juostos filtras.

1.2. BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų apžvalga

Straipsnyje (Singh, 2015) aprašomas juostinio penktos eilės Čebyševio mikrojuostelinio filtro modeliavimas ir tyrimas. Filtras modeliuojamas naudojant EMB modeliavimo programinę įrangą „IE3D“. Padėklui pasirinktas 0,635 mm storio dielektrikas, kurio ϵ_r yra 10,2. Sumodeliuoto filtro centrinis dažnis – 9,5 GHz, pralaidumo juostos plotis – 14,7 % centrinio dažnio, perdavimo ir atspindžių nuostoliai atitinkamai – 0,8 dB ir 45 dB. Lyginant BSPBIR ir GSPBIR konstrukcijų filtras pastebėta, kad BSPBIR konstrukcijos filtrų nuostoliai ir filtro matmenys yra mažesni.

Straipsnyje (Mehdi, 2012) aprašomi dviejų juostinių penktos eilės Čebyševio mikrojuostelinių filtrų projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Filurai suprojektuoti taip, kad visi jo pusrezonatoriai yra vienodo pločio. Pasak autorių, toks sprendimas leis išvengti netolygumų, kurie gali atsirasti gamybos proceso metu. Padėklui pasirinkta dielektrinė keramika, kurios ϵ_r yra 6,2. Pagamintų filtrų centriniai dažniai – 34,25 GHz ir 34,32 GHz, atitinkamai pralaidumo juostų pločiai – 11,09 % ir 10,9 % centrinio dažnio, perdavimo nuostoliai – 3 dB ir 2,9 dB ir atspindžių slopinimas – 19 dB ir 17 dB.

Straipsnyje (Sharma, 2013) aprašomi dviejų juostinių trečios eilės Čebyševio mikrojuostelinių filtrų modeliavimas ir tyrimas. Filurai modeliuojami naudojant MATLAB kalba parašytas programas. Padėklams pasirinkti 1,58 mm ir 3,38 mm storio „Rogers RO4003c“ dielektrikai, kurių ϵ_r yra 4,2. Sumodeliuotų filtrų centriniai dažniai atitinkamai – 2,45 GHz ir 2,75 GHz, pralaidumo juostos pločiai atitinkamai – 12,2 % ir 11,7 % centrinio dažnio, perdavimo nuostoliai – 3,5 dB ir 4 dB ir atspindžių nuostoliai – 45 dB ir 50 dB.

Straipsnyje (Lindo, 2009) aprašomas dviejų juostinių filtrų projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklams pasirinkti 96 % aliuminio oksido dielektrikai, padengti 10–90 μm „QM44F“ dielektrine danga, siekiant gauti ϵ_r lygias 8 ir 9. Abiejų pagamintų filtrų centrinis dažnis – 93 GHz, bet filtras, naudojantis didesnės dielektrinės skvarbos padėklą, pasižymi siauresne praleidžiamų dažnių juosta.

Mažesnės ε_r padėklą naudojantis filtras pasižymi mažesniais nuostoliais ir stipresniu signalo slopinimu už praleidžiamų dažnių juostos ribų.

Straipsnyje (Khan, 2015) aprašomas juostinio ketvirtos eilės Čebyševio mikrojuostelinio filtro projektavimas, gaminimas ir tyrimas. Padėklui parinktas 0,508 mm storio „Duroid 5880“ dielektrikas, kurio ε_r yra 2,2. Pagaminto filtro centrinis dažnis – 16,76 GHz, pralaidumo juostos plotis – 6 % centrinio dažnio, perdavimo ir atspindžių nuostoliai atitinkamai – 3 dB ir 30 dB.

1.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Skyriuje apžvelgti devyni šaltiniai, kuriuose aprašyti GSPBIR ir (arba) BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų tyrimai. Iš jų trys teoriniai tyrimai, kuriuose aprašytos filtrų modeliacijos kompiuteriu ir šeši praktiniai tyrimai, kai tiriamas realiai pagamintas filtras. Didelių skirtumų tarp realiai atliktų ir kompiuteriu modeliuotų tyrimų nematyti, rezultatai labai panašūs. Apibendrinant analizuotus tyrimus matyti, kad visų aptartų GSPBIR konstrukcijos filtrų praleidžiamų dažnių juostos plotis varijuoja 2,8–6,25 % centrinio dažnio ribose, o BSPBIR konstrukcijos filtrų praleidžiamų dažnių juostos plotis varijuoja 6–14,7 % centrinio dažnio ribose. Tokia statistika patvirtina straipsnyje (Singh, 2015) pateiktą teiginį, kad teorinė maksimali GSPBIR konstrukcijos filtrų praleidžiamų dažnių juostos pločio riba yra 10 % centrinio dažnio. Taip pat iš aptartų šaltinių matyti, kad visi BSPBIR konstrukcijos filurai pasižymi mažesniais perdavimo nuostoliais ir didesniu atspindžių slopinimu.

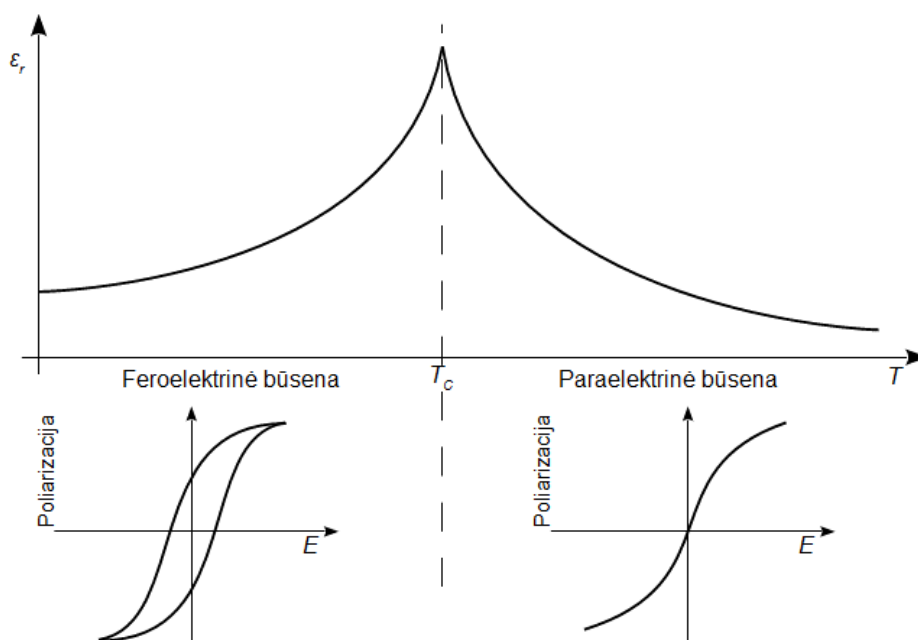
2. FEROELEKTRINIŲ MEDŽIAGŲ ATRANKA IR ANALIZĖ

Pirmajame skyriuje apžvelgti mikrojuosteliniai filtrai, kurių pralaidumo juosta nėra derinama, nes ji priklauso nuo laike nekintančių mikrojuostelės geometrinių parametrų ir padėklo medžiagos ϵ_r parametro. Feroelektrinis derinamas filtras nuo ankstesniame skyriuje apžvelgtų skiriasi tuo, kad jo padėklas pagamintas iš medžiagos, kurios ϵ_r kinta priklausomai nuo ją veikiančio elektrinio lauko ir temperatūros (Hong, 1976). Kadangi šiuos parametrus lengvai galima keisti realiu laiku ir jų pokytis turi įtakos filtro centriniam dažniui nustatyti, toks metodas yra tinkamas filtro centriniam dažniui derinti. Šiame skyriuje išsamiai nagrinėjamos feroelektrinių medžiagų ϵ_r parametro priklausomybės nuo pasirinktos feroelektrinės medžiagos, priemaišų joje koncentracijos, temperatūros, medžiagos sluoksnio storio ir medžiagą veikiančio elektrinio lauko stiprio.

Skyriaus tikslas – sukurti algoritmus ir programas feroelektrinių medžiagų ϵ_r parametrui skaičiuoti kai žinomas feroelektriko storis ir elektrinio lauko stipris. Programos vėliau bus taikomos filtrų modeliams kurti.

2.1. Feroelektrinių medžiagų būsenos

Feroelektrikai – tai klasė dielektrikų, kurių ϵ_r nėra konstanta – ji priklauso nuo medžiagos gardelėje esančių dipolių poliarizacijos kampo. Yra dvi feroelektrinių medžiagų būsenos, kurios pavaizduotos 2.1 pav.



2.1 pav. Feroelektrinių medžiagų būsenos, kai temperatūra artima *Kiuri* temperatūrai

- Feroelektrinė, kuriai būdinga spontaniška poliarizacija ir histerezės reiškinys. Ši būseną turi tik dvi galimas poliarizacijas, o poliarizacijos apvertimas atliekamas sukūrus priešingo poliarumo elektrinį lauką E . Svarbu paminėti, kad poliarizacija išlieka net jeigu nelieka elektrinio lauko. Šia savybe paremtas feroelektrinių operatyvinių atminčių veikimo principas.
- Paraelektrinė, kuriai būdinga atsitiktinė poliarizacija, tačiau ši poliarizacija yra netiesiškai proporcinga veikiančiam elektriniam laukui E , kuo laukas stipresnis, tuo daugiau dipolių pasisuka elektrinio lauko veikimo kryptimi. Šioje būsenoje dirba feroelektriniai derinamos talpos kondensatoriai (varikapai).

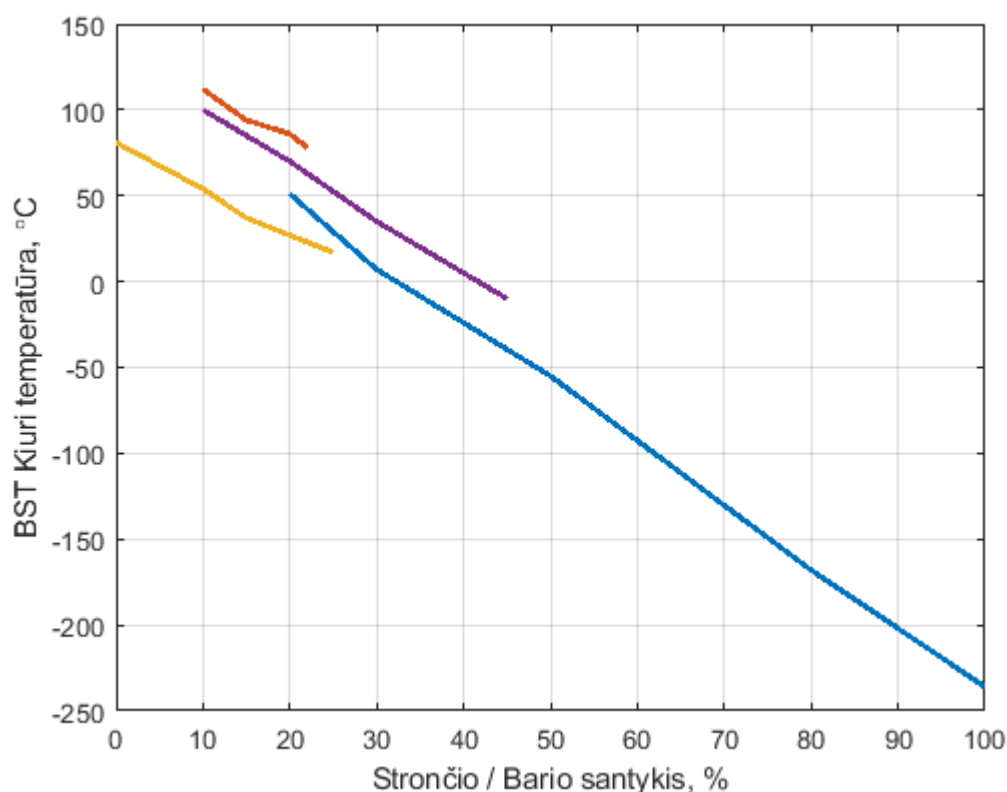
Kokioje būsenoje šiuo metu yra feroelektrikas, nusako jo temperatūra. Kai temperatūra T yra žemesnė už šiam feroelektrikui specifinę *Kiuri* temperatūrą T_C (dar vadinamą *Kiuri* slenksčiu), feroelektrikas yra feroelektrinėje būsenoje, kai $T > T_C$, feroelektrikas yra paraelektrinėje būsenoje. Iš grafiko matyti, kad aukščiausia ϵ_r yra tada, kai $T \approx T_C$, taip pat tokioje temperatūroje pasireiškia stipriausia ϵ_r priklausomybė nuo temperatūros. Šią savybę naudoja temperatūra valdomi varikapai, tačiau kai norima užtikrinti temperatūrinį stabilumą, projektuojama taip, kad darbinė feroelektriko temperatūra būtų tolima *Kiuri* slenksčiui. Feroelektrinių medžiagų *Kiuri* temperatūros pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Vienkomponenčių (grynųjų) feroelektrinių medžiagų *Kiuri* temperatūros

Pavadinimas	Cheminė formulė	Kiuri temperatūra, °C	Literatūros nuoroda
Strončio titanatas (STO)	SrTiO_3	–236	(Kumar, 2002)
Kalio arsenatas	KH_2AsO_4	–176	(SkedSoft)
Rubidžio arsenatas	RbH_2AsO_4	–162	(SkedSoft)
Kalio fosfatas	KH_2PO_4	–150	(Kao, 2004)
Rubidžio fosfatas	RbH_2PO_4	–126	(SkedSoft)
Kalio fosfatas	KD_2PO_4	–60	(SkedSoft)
Cinko titanatas	ZnTiO_3	5	(globalSino)
Natrio niobatas	NaNbO_3	63	(globalSino)
Bario titanatas (BTO)	BaTiO_3	120	(2004 Kao)
Kalio niobatas	KNbO_3	435	(2004 Kao)
Švino titanatas (PTO)	PbTiO_3	490	(globalSino)

Iš 2.1 lentelės matyti, kad feroelektrikų *Kiuri* temperatūros yra labai skirtingos ir apima platų temperatūrų diapazoną. Vienkomponenčių (grynųjų) kristalų *Kiuri* temperatūra dažniausiai nėra tinkama darbui kambario temperatūroje, pavyzdžiui strončio titanato (STO) *Kiuri* slenkstis yra artimas absoliutaus nulio temperatūrai (maždaug –236 °C), dėl to kambario temperatūroje šios

medžiagos ϵ_r yra santykinai nedidelė, o bario titanato (BTO) *Kiuri* temperatūra yra 120 °C, tai reiškia, kad kambario temperatūroje ši medžiaga yra feroelektrinėje būsenoje. Tam, kad būtų galima elektriniu lauku keisti feroelektriko ϵ_r , būtina kad feroelektrikas dirbtų paraelektrinėje būsenoje, tai reiškia, kad temperatūra turi būti aukštesnė už medžiagos *Kiuri* temperatūrą. Gamybos metu galima parinkti medžiagos *Kiuri* temperatūrą įterpiant į medžiagą atitinkamą kiekį priemaišų. Tokie feroelektrikai vadinami daugiakomponenčiais arba negrynaisiais, nes jų sudėtyje yra keli komponentai sumaišyti kažkokiu santykiu (Hornebecq, 2004). Sumaišius BTO ir STO gaunamas bario strončio titanatas (BST), jo *Kiuri* temperatūros priklausomybių nuo strončio priemaišų santykio grafikai pateikti 2.2 paveiksle.



2.2 pav. BST *Kiuri* temperatūros priklausomybė nuo strončio priemaišų koncentracijos. Grafikai nubraižyti remiantis duomenimis: (Kumar, 2002) – mėlyna, (Kathait, 2017) – raudona, (Abomosfata, 2018) – oranžinė, (Ferro, 2019) – violetinė

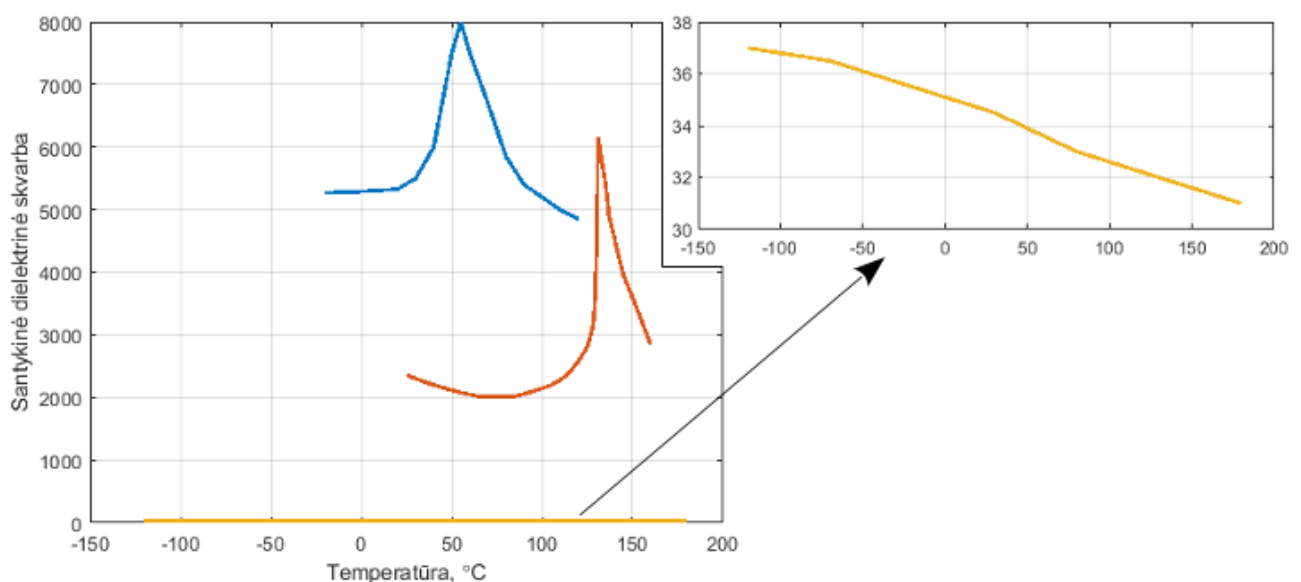
2.2 paveiksle pateikti grafikai nubraižyti pagal duomenis surinktus iš skirtingų šaltinių, daugumoje jų aprašomi laboratorijose daryti tyrimai. Horizontalioje ašyje pateiktas strončio ir bario elementų santykis medžiagoje išreikštas procentais. Ši vertė reiškia medžiagos atominės sandaros, išreikštos pagal formulę $\text{Ba}_{100-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$, kintamąjį x . Vertikalioje ašyje nurodytos *Kiuri* slenksčio temperatūros. Matyti, kad tyrimais gauti rezultatai nėra visiškai vienodi, tačiau aiškiai matoma tiesinė BST *Kiuri* temperatūros priklausomybė nuo strončio ir bario elementų santykio medžiagoje. Iš

2.2 pav. matyti, kad norint pagaminti BST feroelektriką, kuris kambario temperatūroje turėtų aukštą dielektrinę skvarbą, reiktų kad strončio / bario santykis būtų maždaug 30 %.

Priemaišos nebūtinai turi būti feroelektrinės kilmės, kaip šiuo atveju, tačiau naudojant feroelektrines priemaišas gaunama didesnė junginio ϵ_r ir stipresnė jos priklausomybė nuo elektrinio lauko bei temperatūros. Šios savybės yra ypač svarbios feroelektriniams filtrams. Sekančiuose skyriuose bus kalbama tik apie paraelektrinę feroelektrinių medžiagų būseną, nes šioje būsenoje dirba visi feroelektriniai filtrai.

2.2. Feroelektrinio sluoksnio storis

Pirmajame poskyryje aptartos feroelektrinių medžiagų būsenos. Iš 2.1 pav. matyti, kad kai temperatūra artima medžiagos $Kiuri$ temperatūrai, feroelektrikai pasižymi labai aukšta dielektrine skvarba ir stipria jos priklausomybe nuo temperatūros, tačiau taip yra ne visuomet. Maždaug 1990-aisiais, atsiradus naujiems medžiagų nusodinimo būdams, tokiems kaip aukštadažnis medžiagos užpurškimas (angl. *Radio Frequency Sputtering*) ir cheminis medžiagos garų nusodinimas (angl. *Chemical Vapor Deposition*), atsivėrė galimybės pagaminti itin plonus (10 nm eilės) feroelektrinių medžiagų sluoksnius (Steer, 2009). Tiriant šiuos sluoksnius buvo pastebėta, kad jų charakteristikos ženkliai skiriasi lyginant su tokios pačios sudėties įprastine medžiagos spausdinimo arba presavimo technologija pagamintų feroelektrinių sluoksnių. Charakteristikų palyginimas pateiktas 2.3 pav.



2.3 pav. Santykinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo temperatūros, kai feroelektrikas:

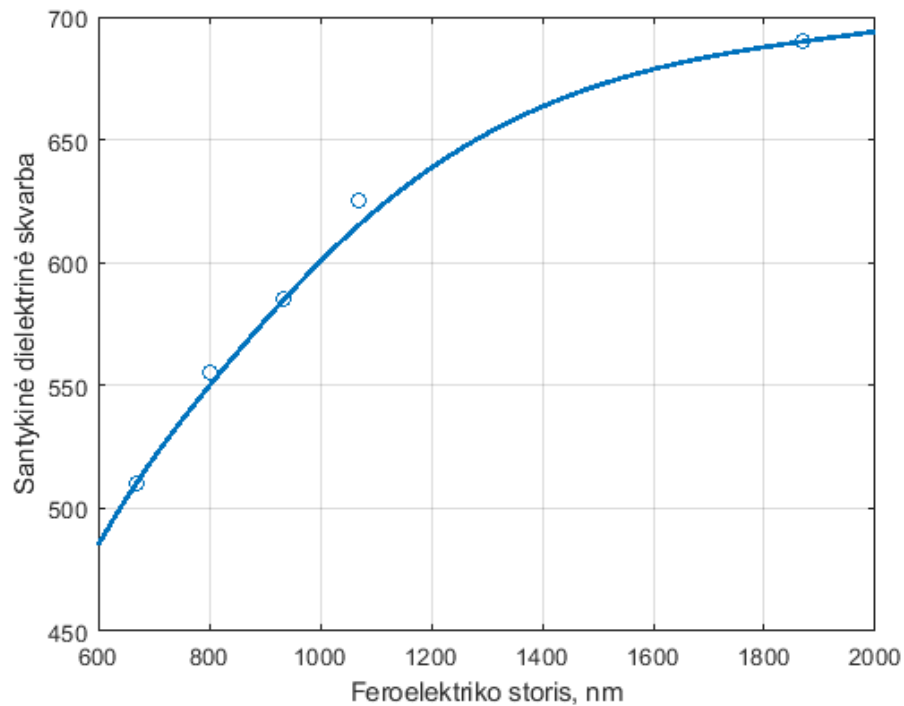
10 mm storio Ba_{80%}Sr_{20%}TiO₃ – mėlyna (Chen, 2015), 1,42 mm storio BaTiO₃ – raudona (Iiser, 2000),

50 nm storio Ba_{75%}Sr_{25%}TiO₃ – oranžinė (Hornebecq, 2004)

Presavimo technologija pagaminto 10 mm ir spausdinimo technologija pagaminto 1,42 mm storio feroelektrinių sluoksnių ϵ_r temperatūrinės charakteristikos pavaizduotos atitinkamai mėlyna ir raudona spalvomis. Iš charakteristikų (žr. 2.3 pav.) aiškiai matyti stiprus dielektrinės skvarbos padidėjimas ties *Kiuri* temperatūros riba – gryo BTO esant maždaug 130 °C temperatūrai (raudonas grafikas) ir BST su 20 % strončio priemaišų esant maždaug 55 °C temperatūros (mėlynas grafikas). Taip pat matyti, kad kuo storesnis feroelektrinis sluoksnis, tuo aukštesnė jo ϵ_r . Oranžiniu grafiku pavaizduotas cheminiu medžiagos garų nusodinimo metodu pagamintas 50 nm storio BST feroelektrikas, turintis 25 % strončio priemaišų. Šio feroelektriko ϵ_r pakito tik 6 vienetais, kai temperatūra pakito intervale nuo –120 °C iki 180 °C (vidutiniškai ϵ_r pakinta vienetu per 50-ies °C temperatūros pokytį) ir šis kitimas yra labai tiesiškas – visiškai nematomas *Kiuri* slenksčiui būdingas dielektrinės skvarbos padidėjimas, o tai reiškia aukštą temperatūrinį stabilumą. Auštas temperatūrinis stabilumas leidžia supaprastinti arba netgi pašalinti filtro temperatūros kompensavimo schemą, o tai sumažina filtro matmenis energijos sąnaudas ir savikainą. Taip pat supaprastėja filtro derinimo algoritmas, nes feroelektriko ϵ_r priklauso tik nuo vieno parametro – jį veikiančio elektrinio lauko stiprio. Taip pat svarbu paminėti, kad plonų feroelektrikų dielektrinės skvarbos derinimui pakanka žemesnių įtampų (maždaug 3–10 V), nes elektriniu lauku veikiamas kur kas mažesnis medžiagos storis (Chase, 2005), o tai labai svarbu norint šiuos filtrus naudoti mobiliuosiuose bei žemose įtampose dirbančiuose įrenginiuose.

Kadangi sluoksnio storis turi didelę įtaką medžiagos charakteristikoms, feroelektriniai sluoksniai skirstomi į 3 grupes: plonus sluoksnius (angl. *Thin-film*), storus sluoksnius (angl. *Thick-film*) ir vadinamus monolitus (angl. *Bulk*). Plonų sluoksnių storis turi neviršyti 1 μm (Tiggelman, 2009), tą leidžia aukštadažnio medžiagos užpurškimo ir cheminio garų nusodinimo technologijos (Steer, 2009). Storių sluoksnių storis būna 1–1500 μm ribose (Tiggelman, 2009), šiems sluoksniams pagaminti dažniausiai naudojamos spausdinimo ir sol-gel technologijos (Nath, 2006). Storesni negu storio sluoksnio feroelektrikai vadinami monolitais (Tiggelman, 2009), paprastai jie yra spausdinami, tačiau kartais labai storiems sluoksniams pagaminti naudojama presavimo technologija (Chen, 2015).

Feroelektrinio sluoksnio storis yra vienas iš parametų, nusakančių jo ϵ_r , kai elektrinio lauko stipris $E=0$ kV/cm. Kiti parametrai yra priemaišų koncentracija ir temperatūra. Kadangi eksploatavimo metu priemaišų koncentracija yra pastovi, o temperatūra kinta labai nežymiai, medžiagos storis parenkamas atsižvelgdam tik į ϵ_r parametą. Elektriniu lauku neapkrauto BST feroelektriko su 30 % strončio priemaišų ϵ_r priklausomybės nuo feroelektrinio sluoksnio storio grafikui (žr. 2.4 pav.) sudaryti duomenys paimti iš (Nath, 2006) aprašytų tyrimų.



2.4 pav. Neapkrauto BST feroelektriko su 30 % strončio priemaišų ϵ_r priklausomybė nuo feroelektrinio sluoksnio storio

Grafike apskritimais pažymėtos penkių (Nath, 2006) darbe aprašytų bandinių ϵ_r vertės esant nuliniam elektrinio lauko stipriui $E = 0$. Naudoti 668 nm, 801 nm, 935 nm, 1068 nm ir 1869 nm storio bandiniai, kurių ϵ_r atitinkamai 510, 555, 585, 625 ir 690. Visi bandiniai pagaminti iš BST feroelektrinės medžiagos, turinčios 30 % strončio priemaišų, naudojant aukšto dažnio medžiagos užpurškimo technologiją. Kad grafikas būtų aiškesnis, nubraižyta šiuos apskritimus aproksimuojanti kreivė. Iš 2.4 pav. matyti, kad storesni feroelektrikai pasižymi aukštesnėmis ϵ_r vertėmis, tačiau ši priklausomybė nėra tiesinė. Aiškiausias ϵ_r augimas matomas iki kol sluoksnio storis neviršija maždaug 1,1 μm , tolimesnis sluoksnio auginimas nebeduoda tokio didelio ϵ_r pokyčio. Sluoksnio storinimas taip pat nėra gerai, nes kuo storesnis feroelektrinis sluoksnis, tuo aukštesnė įtampa reikalinga jo dielektrinei skvarbai pakeisti (Chase, 2005; Tiggelman, 2009), plačiau apie tai sekančiame poskyryje.

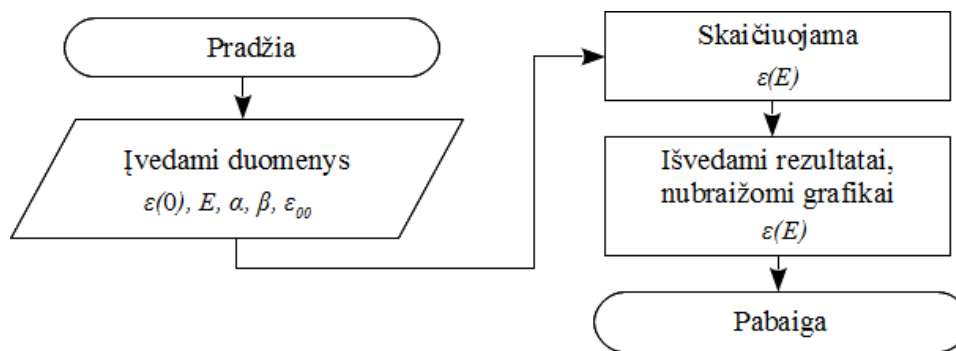
2.3. Elektrinio lauko poveikis feroelektriko dielektrinei skvarbai

Elektrinio lauko poveikio santykinai dielektrinei skvarbai modeliavimas ištirtas ir aprašytas šaltiniuose (Jimenez, 2015) ir (Liou, 1998). Šiuose šaltiniuose feroelektriko ϵ_r apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_{00} + \frac{\varepsilon(0)}{\alpha + \beta E^2}, \quad (2.1)$$

čia $\varepsilon(E)$ – santykinė dielektrinė skvarba, kai feroelektrinę medžiagą veikia elektrinis laukas E , išreikštas kV/cm , $\varepsilon(0)$ – santykinė dielektrinė skvarba, kai elektrinio lauko stipris $E = 0$, ε_{00} – minimali feroelektriko ε_r , kai feroelektriko gardelė yra pilnai įsisotinusi, tuomet elektrinio lauko didinimas nebeturi įtakos. α – charakteristikos formos koeficientas ir β – charakteristikos statumo koeficientas, nuo jo priklauso kaip greitai mažėja ε_r didinant elektrinio lauko stiprį.

Sukurtas programos algoritmas (žr. 2.5 pav.) ir naudojant MATLAB programinę įrangą parašyta programa (žr. 2.1 programos kodas), kuri pagal 2.1 formulę braižo dielektrinės skvarbos charakteristikas.



2.5 pav. Programos, feroelektriko santykinėi dielektrinei skvarbai skaičiuoti pagal feroelektriką veikiančio elektrinio lauko stiprį, algoritmas

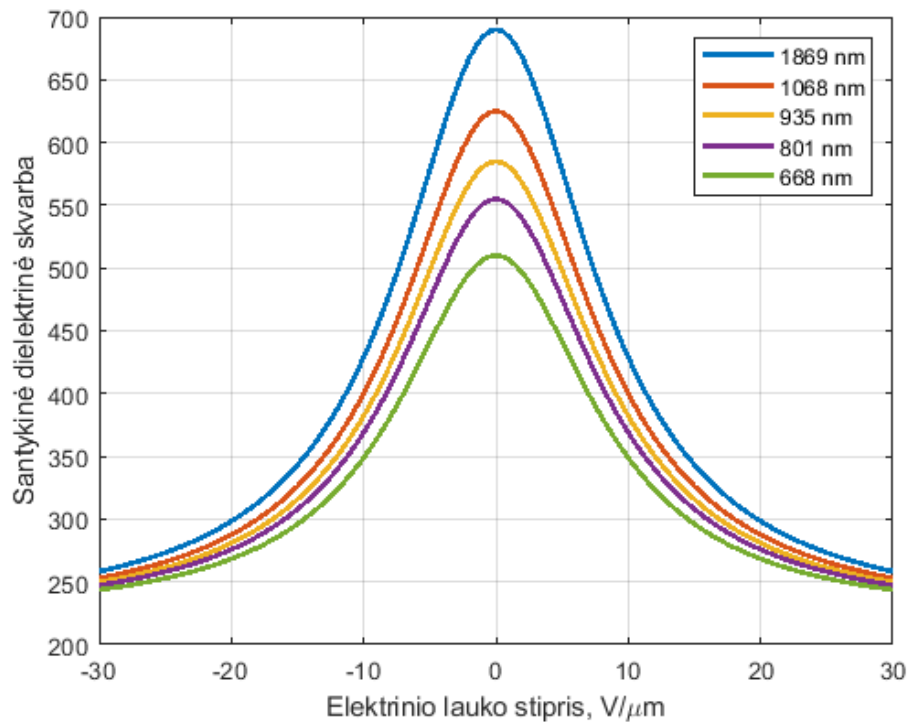
2.1 programos kodas. Programos, feroelektriko santykinėi dielektrinei skvarbai skaičiuoti pagal feroelektriką veikiančio elektrinio lauko stiprį, kodas

```

01 Eps_0 = [690 625 585 555 510]; % Dielektrinė skvarba, kai E=0
02 E = -30 : 0.5 : 30;           % Elektrinio lauko kitimo intervalas
03
04 num_graphs = size(Eps_0,2);
05 A = 200;                     % Charakteristikos formos koeficientas
06 B = 0.025;                   % Charakteristikos statumo koeficientas
07 e00 = 220;                   % Įsisotinusio feroelektriko dielektrinė skvarba
08 e0 = zeros(num_graphs, 1);
09 eE = zeros(num_graphs, size(E,2));
10
11 for i = 1 : num_graphs
12     e0(i) = (Eps_0(i) - e00) * A;
13     eE(i,:) = e00 + (e0(i)./(A + B * (E*10).^2));
14 end
15
16 figure('Name', 'Dielektrinė skvarba nuo elektrinio lauko')
17 plot(E, eE, 'LineWidth', 2.0)
18 legend('1869 nm', '1068 nm', '935 nm', '801 nm', '668 nm')
19 xlabel('Elektrinio lauko stipris, V/\mum')
20 ylabel('Santykinė dielektrinė skvarba')
21 grid on
  
```

Į masyvą Eps_0 surašomos elektriniu lauku neapkrautų ($E=0$) feroelektrinių sluoksniu ϵ_r vertės, masyve E nurodomos elektrinio lauko stiprio kitimo ribos. Koeficientai A , B ir ϵ_{00} empiriškai parenkami tokiais, kad gautos charakteristikos forma ir statumas kiek įmanoma labiau atitiktų laboratorinio tyrimo metu gautų charakteristikų formą ir statumą. Skaičiavimų rezultatai išvedami skaitiniu ir grafikų pavidalu.

Kad įsitikinti, ar programa gaunami grafikai yra teisingi, pamėginta ją gauti (Nath, 2006) šaltinyje atvaizduotus grafikus, rezultatai pateikti 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Santykinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo feroelektriką veikiančio elektrinio lauko stiprio

Dielektrinės skvarbos, nesant elektrinio lauko poveikiui, vertės $\epsilon(0)$, paimtos iš (Nath, 2006) šaltinio, jos taip pat yra pateiktos 2.4 pav. Elektrinio lauko ribos parinktos tokios pat, kokios parinktos analizuojamame darbe, o ϵ_{00} , α ir β konstantai parinkti tokie, kad rezultate gauti grafikai kuo geriau atitiktų analizuojamame darbe gautus grafikus. Bandymai parodė, kad grafikai geriausiai sutampa kai $\epsilon_{00} = 220$, $\alpha = 200$ ir $\beta = 0,025$. Iš to galima preliminariai pasakyti, kad (Nath, 2006) darbe tirtu BST feroelektriko, turinčio 30 % strončio priemaišų minimali dielektrinės skvarbos vertė lygi 220, charakteristikos formos koeficientas lygus 200 ir charakteristikos statumo koeficientas 0,025. Šie duomenys bus reikalingi skaičiuojant įvairaus storio feroelektrinių sluoksnių dielektrinės skvarbos priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio grafikus.

2.4. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Pirmajame poskyryje aptartos feroelektrinė ir paraelektrinė feroelektrikų būsenos. Feroelektriniai filtrai dirba paraelektrinėje būsenoje, todėl projektuojant tokį filtrą svarbu atkreipti dėmesį į filtro darbinių temperatūrų diapazoną ir pagal tai pasirinkti tokią feroelektrinę medžiagą, kuri šiame temperatūrų diapazone dirbtų paraelektrinėje būsenoje. Į feroelektriko kristalą galima įterpti kitos medžiagos (kito feroelektriko arba ne feroelektriko) ir taip pakeisti jo *Kiuri* slenksčio temperatūrą, nes grynų feroelektrinių kristalų *Kiuri* slenkstis dažniausiai yra netinkamas racionaliam energijos resursų panaudojimui valdant tokį filtrą.

Antrajame poskyryje aiškinamas feroelektrinių sluoksnių skirstymas į grupes pagal jų storį. Sluoksniai skirstomi į tokias grupes: plonieji (angl. *Thin-film*), storieji (angl. *Thick-film*) ir monolitai (angl. *Bulk*). Pagrindinis dėmesys skiriamas ploniesiems sluoksniams, nes jie pasižymi labai aukštu temperatūriniu stabilumu ir žema derinimo įtampa (pakanka 10 voltų) (Chase, 2005). Nors plonųjų sluoksnių ϵ_r yra santykinai neaukšta, tačiau dielektrinės skvarbos valdymo diapazonas nedaug siauresnis negu storųjų sluoksnių ir monolitų. Panaudojant skyriuje aptartas formules parašytas algoritmas ir programa neapkrauto feroelektriko santykinei dielektrinei skvarbai skaičiuoti pagal feroelektrinio sluoksnio storį.

Trečiajame poskyryje aiškinama ϵ_r priklausomybė nuo feroelektriką veikiančio elektrinio lauko stiprio, taip pat parašytas algoritmas ir programa jos skaičiavimui. Ši programa patikrinama naudojant (Nath, 2006) tyrime pateiktus duomenis. Programa paskaičiuoti grafikai minimaliai skiriasi nuo tiriamajame darbe pateiktų grafikų.

3. MIKROJUOSTELINIŲ MIKROBANGŲ FILTRŲ MODELIŲ SUDARYMAS

Įranga, dirbanti mikrobangų dažnių ruože, beveik visuomet naudoja juostinės (angl. *Band-pass*) perdavimo charakteristikos filtrus (Miller, 2012), todėl šiame darbe pasirinkta modeliuoti juostinius filtrus. Pirmajame skyriuje atlikta mikrojuostelinių filtrų analizė, kurios metu pastebėta, kad juostinei filtro charakteristikai gauti dažniausiai naudojamos galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (angl. *End-Coupled Half-Wavelength Resonator*) (toliau – GSPBIR) ir briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (angl. *Edge-Coupled Half-Wavelength Resonator*) (toliau – BSPBIR) mikrojuostelinių filtrų konstrukcijos. Viena svarbiausių priežasčių, lėmusių šių konstrukcijų populiarumą – santykinai nesudėtingos ir gana tikslios mikrojuostelių matmenų skaičiavimo lygtys (Lindo, 2009).

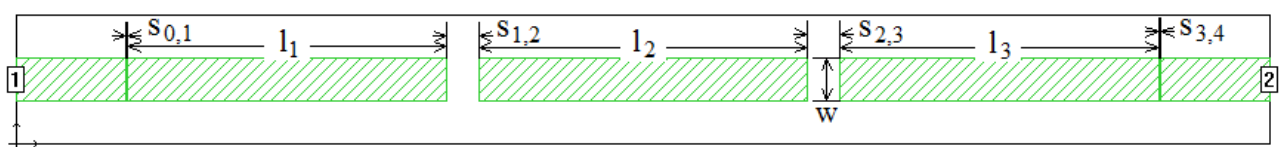
Skyriaus tikslas – sumodeliuoti GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų filtrus, kurių perdavimo ir atspindžio charakteristikas bus tiriamos kitame skyriuje. Siekiant šio tikslo pirmajame poskyryje aiškinamos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijų mikrojuostelinių filtrų matmenų skaičiavimo formulės. Remiantis šiomis formulėmis MATLAB aplinkoje parašyti algoritmai ir programos filtrų matmenų skaičiavimams automatizuoti. Antrajame poskyryje, naudojant šias programas, apskaičiuoti mikrojuostelinių filtrų matmenys ir „Sonnet Professional“ EMB simulatoriumi sumodeliuoti filtrai.

3.1. Lygčių filtrams modeliuoti aiškinimas

Kituose skyreliuose aiškinamos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijos juostinių filtrų mikrojuostelės matmenų skaičiavimo lygtys. Remiantis šiomis lygtimis, MATLAB aplinkoje parašytos programos mikrojuostelės matmenų skaičiavimams automatizuoti.

3.1.1. GSPBIR konstrukcijos filtrai

Galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (GSPBIR) konstrukcijos mikrojuostelinio filtro sandara pateikta 3.1 pav.



3.1 pav. Galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių konstrukcijos mikrojuostelinio filtro sandara

Visi filtro rezonatoriai galuose nėra apkrauti (atvirojo tipo), o kiekvieno rezonatoriaus ilgis l_j yra lygus pusei filtro rezonansinio dažnio bangos ilgio, atsižvelgiant į signalo vėlinimą padėklo medžiagoje, apie kurį bus kalbama vėliau. Čia j nurodo rezonatoriaus numerį. Rezonatoriai vienas nuo kito yra atskirti tarpeliais $s_{j-1,j}$. Ši struktūra, dėl savybės perslinkti signalo fazę, vadinama *J-Inverteriu*, detalai jis aprašytas (Hong, 1976). Tokiuose inverteriuose stipriausias elektrinis laukas susikoncentruoja rezonatoriaus galuose ir rezonatoriuose sukuria šuntuojančio tipo rezonansą. GSPBIR konstrukcijos filtrams projektuoti naudojamos formulės (Hong, 1976):

$$\frac{J_{01}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2 g_0 g_1}}, \quad (3.1)$$

$$\frac{J_{j,j+1}}{Y_0} = \frac{\pi FBW}{2} \frac{1}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad \text{čia } j = 1 \dots n-1, \quad (3.2)$$

$$\frac{J_{n,n+1}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2 g_n g_{n+1}}}, \quad (3.3)$$

čia n yra filtro pakopų skaičius, $g_0, g_1 \dots g_n$ – žemų dažnių filtro koeficientai, kurie parenkami pagal tai, koks filtras projektuojamas (Čebyševio, Beselio ar Butervorfo), šie koeficientai paimami iš koeficientų lentelės, ją galima rasti (RFcafe), FBW – praleidžiamų dažnių juostos plotis išreikštas santykiniais vienetais (pvz., 10 % = 0,1), $J_{j,j+1}$ – tarpelio tarp j -ojo ir $j+1$ -ojo rezonatorių charakteringasis admitansas, Y_0 – filtro įėjimo ir išėjimo išvadų charakteringasis admitansas, kuris yra atvirkščias charakteringajam impedansui $Z_0 = 1/Y_0$.

Sakykim, kad tarpelių talpa yra vien tik nuoseklaus kondensatorių jungimo talpa (į šuntuojančias talpas nekreipkime dėmesio), tuomet kiekvienam *J-Inverteriui* susceptansas $B_{j,j+1}$ paskaičiuojamas pagal formulę (Hong, 1976):

$$\frac{B_{j,j+1}}{Y_0} = \frac{\frac{J_{j,j+1}}{Y_0}}{1 - \left(\frac{J_{j,j+1}}{Y_0}\right)^2}. \quad (3.4)$$

Elektrinis ilgis radianais paskaičiuojamas pagal formulę (Hong, 1976):

$$\theta_j = \pi - \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{2B_{j-1,j}}{Y_0} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{2B_{j,j+1}}{Y_0} \right) \right]. \quad (3.5)$$

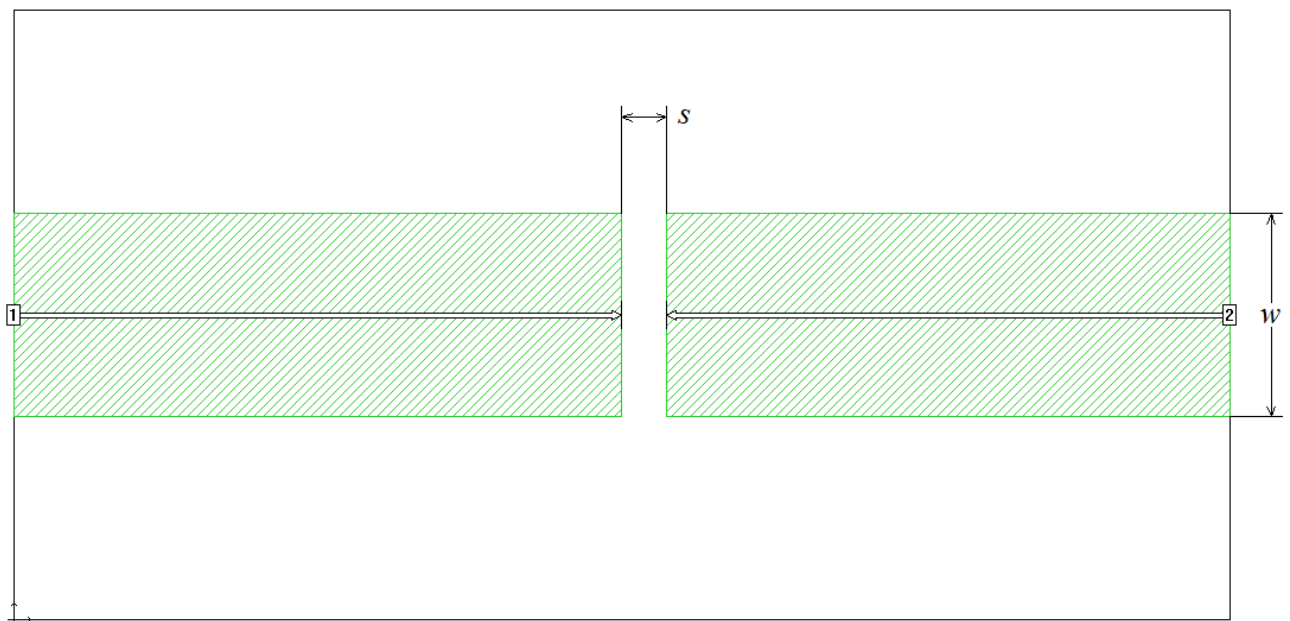
Rezonatorius skiriančio tarpelio nuosekloji talpa C_g apskaičiuojama pagal formulę (Hong, 1976):

$$C_g^{j,j+1} = \frac{B_{j,j+1}}{\omega_0}, \quad (3.6)$$

čia $\omega_0 = 2\pi f_0$ – kampinis dažnis rezonanso metu. Kad sužinoti kitus mikrojuostelių matmenis, reikia apskaičiuoti rezonatorius skiriančių tarpelių ilgius, kurie atitinka (3.6) lygtimi apskaičiuotas talpas.

Jų skaičiavimas formulėmis yra labai sudėtingas, reikia apskaičiuoti II tipo grandinę su viena nuosekliaja ir dviem šuntuojančiomis talpomis, todėl toks būdas praktikoje retai taikomas. Dažniausiai tarpelio ilgį atitinkančios nuoseklioji C_g ir šuntuojančioji C_p talpos gaunamos EMB simulatoriumi empiriniu būdu keičiant tarpelio ilgį ir apskaičiuojant šias talpas iš Y parametrų. Y parametrai apskaičiuoti „Sonnet“ EMB simulatoriumi.

Simulatoriumi susikuriamas naujas projektas, parenkami matavimo vienetai ir pagrindiniai modeliuojamo filtro parametrai: dielektrinių sluoksnių storiai, dielektrinės skvarbos ir nuostolių vertės, bandinio dydis ir rezoliucija, metalo laidumas ir nuostolių vertė. Kuo tiksliau parinkti šie parametrai, tuo tiksliau bus apskaičiuotos talpų vertės. Mikrojuostelė turi atrodyti panašiai į pateiktą 3.2 pav. Mikrojuostelės plotis W pasirenkamas toks, koks bus naudojamas modeliuojant filtrą, o tarpelio ilgis s parenkamas savo nuožiūra, nes bus atliekama daug bandymų su skirtingais tarpelio ilgiais tam, kad būtų gauti duomenys, reikalingi nuosekliosios C_g ir šuntuojančiosios C_p talpų apskaičiavimui. Ant kairiosios ir dešinėsios mikrojuostelių ties bandinio išorinėmis kraštinėmis pažymimi įėjimo ir išėjimo prievada (paveiksle jie pažymėti žymenimis „1“ ir „2“). Kadangi reikia išmatuoti tik tarpelio zonos talpas, prievada nukeliami iki pat tarpelio, tai padaroma dešiniu pelės klavišu spustelėjus ant prievado žymens, paspaudus *Port Properties, Reference Plane* skiltyje pasirinkus *Linked* ir paspaudus ant pelytės piktogramos. Pelyte reikia paspausti ant mikrojuostelės briaunos, esančios prie tarpelio. Taisyklingai atlikus turime matyti rodykles nuo prievado iki tarpelio (tokias, kokias matome 3.2 pav.). Simuliavimo dažnis parenkamas toks, koks yra modeliuojamo filtro rezonanso dažnis.



3.2 pav. EMB simulatoriumi „Sonnet“ nubraižytos mikrojuostelės, kurių pločiai W ir tarp jų tarpelis s

Simuliacija turėtų būti iš karto suskaičiuota, nes skaičiavimai atliekami tik vienam dažniui. Programos rezultatų lange pateiktos Y parametrų realiosios ir menamosios dalys. Nuosekloji C_g ir šuntuojančioji C_p talpos apskaičiuojamos pagal formules (Hong, 1976):

$$C_g = - \frac{Im(Y_{21})}{\omega_0}, \quad (3.7)$$

$$C_p = \frac{Im(Y_{11} + Y_{21})}{\omega_0}, \quad (3.8)$$

čia Im reiškia menamąją parametro dalį, ω_0 – kampinį dažnį rezonanso metu. Keičiant tarpelio ilgį simuliacija kartojama tol, kol gaunamos C_g vertės, artimos mūsų apskaičiuotoms $C_g^{j,j+1}$ vertėms arba tol, kol surenkama pakankamai duomenų joms apskaičiuoti. Kiekvieną kartą atlikus simuliaciją užrašomos tarpelio tarp rezonatorių ilgio s ir šį tarpelio ilgį atitinkančių nuosekliosios C_g ir šuntuojančiosios C_p talpų vertės. Efektyvioji dielektrinės skvarbos dalis apskaičiuojama pagal formulę (Hong, 1976):

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}. \quad (3.9)$$

Dėl signalo vėlinimo padėklo medžiagoje, bangų, sklindančių oru, ir bangų, sklindančių mikrojuostele, ilgiai nėra vienodi, todėl filtru sklindančios rezonansinio dažnio bangos ilgis apskaičiuojamas pagal formulę (Hong, 1976):

$$\lambda_{g0} = \frac{300}{f_0(GHz)\sqrt{\varepsilon_{re}}} \text{ mm}. \quad (3.10)$$

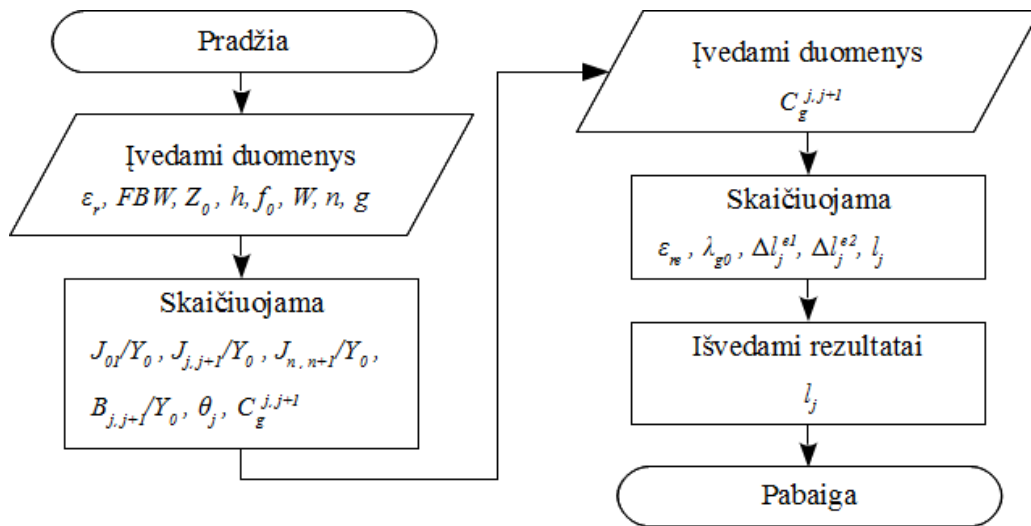
Mikrojuostele sklindančios bangos ilgis λ_{g0} ir filtro rezonansinis dažnis pateikti ne SI sistemos vienetais. Pagal 3.11 formules (Hong, 1976) apskaičiuojami šuntuojančiųjų talpų ilgiai Δl_j^{e1} ir Δl_j^{e2} , atitinkamai pirmame ir antrame rezonatoriaus galuose.

$$\begin{aligned} \Delta l_j^{e1} &= \frac{\omega_0 C_p^{j-1,j}}{Y_0} \frac{\lambda_{g0}}{2\pi}, \\ \Delta l_j^{e2} &= \frac{\omega_0 C_p^{j,j+1}}{Y_0} \frac{\lambda_{g0}}{2\pi}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Rezonatorių ilgiai apskaičiuojami pagal formulę (Hong, 1976):

$$l_j = \frac{\lambda_{g0}}{2\pi} \theta_j - \Delta l_j^{e1} - \Delta l_j^{e2}. \quad (3.12)$$

Tam, kad automatizuoti skaičiavimus ir sumažinti klaidų atsiradimo riziką, sukurtas algoritmas (žr. 3.3 pav.) ir MATLAB aplinkoje parašyta programa (žr. 3.1 programos kodas) GSPBIR konstrukcijos filtro mikrojuostelės matmenims skaičiuoti.



3.3 pav. Programos, GSPBIR konstrukcijos filtrų mikrojuostelės matmenims skaičiuoti, algoritmas

3.1 programos kodas. Programos, GSPBIR konstrukcijos filtrų mikrojuostelės matmenims skaičiuoti, kodas

```

01 %% Įvesties parametrai.
02 EPSr = 4;      % Padėklo santykinė dielektrinė skvarba
03 FBW = 0.005;  % Filtro pralaidumo juostos plotis, %
04 Z0 = 50;      % Charakteringasis impedansas, omai
05 h = 1;        % Dielektrinio padėklo storis, mm
06 f0 = 3.5182;  % Filtro centrinis dažnis, GHz
07 W = 1;        % Mikrojuostelės plotis, mm
08 numPoles = 3; % Filtro eilė
09 g = [1 1.5963 1.0967 1.5963 1]; % 3 eilės Čebyševio filtro koeficientai
10      % kai praleidžiamų dažnių ch-os bangavimas 0,5 dB
11
12 %% Tarpelių ilgių skaičiavimas.
13 % J-Inverterių susceptansų skaičiavimas
14 JY = zeros(1, numPoles + 1);
15 JY(1) = sqrt(FBW * pi / (g(1) * g(2)) / 2);
16 for j = 2 : numPoles
17     JY(j) = (pi * FBW) / (2 * sqrt(g(j) * g(j+1)));
18 end
19 JY(numPoles+1) = sqrt(FBW * pi / (g(numPoles+1) * g(numPoles+2)) / 2);
20
21 BY = zeros(1, numPoles + 1);
22 for j = 1 : numPoles + 1
23     BY(j) = JY(j) / (1 - JY(j)^2);
24 end
25
26 % Rezonatorių elektrinių ilgių skaičiavimas
27 Q = zeros(1, numPoles);
28 for j = 1 : numPoles
29     Q(j) = pi - 0.5*(atan(2* BY(j)) + atan(2* BY(j+1)));
30 end
31
32 % Tarpelių nuoseklaus jungimo talpų skaičiavimas
33 CAPg = zeros(1, numPoles + 1);
34 for j = 1 : numPoles + 1
35     CAPg(j) = (BY(j) / Z0) / (2*pi*f0*1e9);
36 end
37 % Santykinės dielektrinės skvarbos efektyviosios dalies skaičiavimas
38 EPSeff = (EPSr + 1)/2 + (EPSr - 1)/(2*sqrt(1 + (12*h)/W));
  
```

```

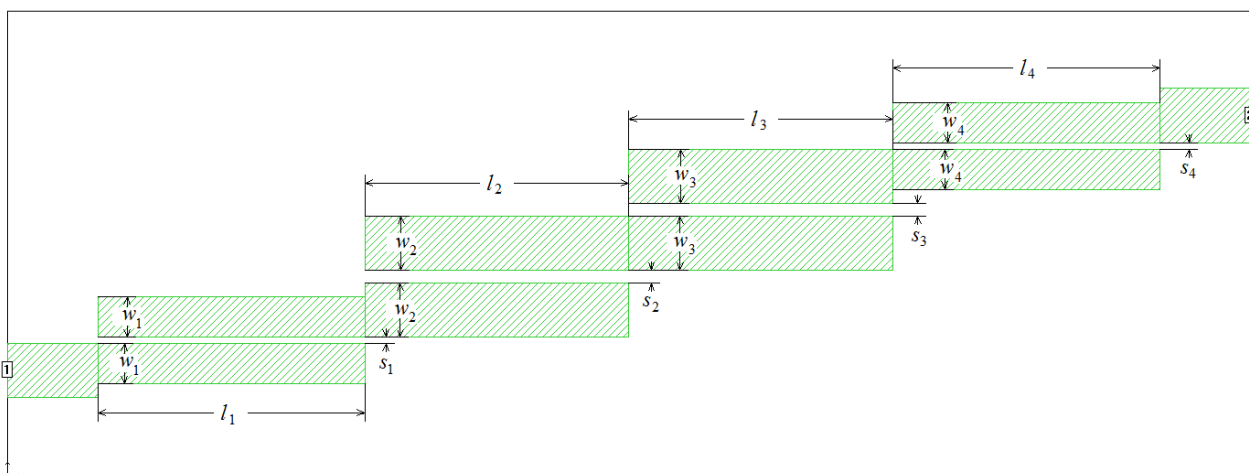
39 % Bangos ilgio padėklo mediagoje skaičiavimas
40 LambdaG0 = 300 / (f0 * sqrt(EPSeff));
41
42 %% Rezonatorių ilgių skaičiavimas.
43 % CAPp - tarpelių šuntuojančiųjų talpų vertės. Jos išskaičiuojamos is EMB
44 % simulatoriumi apskaičiuotų Y parametru
45 CAPp = [6.79e-16 1.9665e-14 1.9665e-14 6.79e-16];
46
47 % Šuntuojančiųjų talpų ilgių skaičiavimas
48 le1 = zeros(1, numPoles);
49 le2 = zeros(1, numPoles);
50 for j = 1 : numPoles
51     le1(j) = (2*pi*f0*1e9*CAPp(j)*LambdaG0*Z0) / (2*pi);
52     le2(j) = (2*pi*f0*1e9*CAPp(j+1)*LambdaG0*Z0) / (2*pi);
53 end
54
55 % Rezonatorių ilgių skaičiavimas
56 length = zeros(1, numPoles);
57 for j = 1 : numPoles
58     length(j) = LambdaG0*Q(j) / (2*pi) - le1(j) - le2(j);
59 end

```

Programos kode reikia suvesti filtro eilės numerį, $g_0, g_1, \dots, g_n$ koeficientus, padėklo medžiagos ϵ_r , padėklo storį, centrinį dažnį, pralaidumo juostos plotį ir mikrojuostelės plotį. Iš šių duomenų programa apskaičiuoja tarpelių nuoseklaus jungimo talpų vertes. Naudojant EMB simulatorių reikia surasti šias nuoseklaus jungimo talpų vertes atitinkančius tarpelių ilgius ir iš Y parametru pagal 3.8 formulę apskaičiuoti tarpelių šuntuojančiąsias talpas. Į programą suvedus šuntuojančiųjų talpų vertes gaunamos visų rezonatorių ilgių vertės.

3.1.2. BSPBIR konstrukcijos filtrai

Briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (BSPBIR) konstrukcijos mikrojuostelinio filtro sandara pateikta 3.4 pav.



3.4 pav. Briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių konstrukcijos mikrojuostelinio filtro sandara

Rezonatoriai yra išdėstyti lygiagrečiai vienas kitam ir paslinkti vienas kito atžvilgiu taip, kad su gretimais rezonatoriais persidengtų pusė savo ilgio. Dėl didelio rezonatorių persidengimo ploto, ši konstrukcija pasižymi didele nuosekliaja talpa, kurios dėka pasiekiamas ženkliai didesnis praleidžiamų dažnių juostos plotis negu 3.1.1 skyrelyje nagrinėtais GSPBIR konstrukcijos filtrais. BSPBIR ir GSPBIR konstrukcijos filurai pradedami projektuoti naudojant tą pačią žemų dažnių filtro ekvivalentinę schemą, todėl projektuojant BSPBIR filtrą, pradžioje taikomos 3.1.1 skyrelyje aptartos (3.1 – 3.3) formulės. Beveik visi BSPBIR konstrukcijos filtro rezonatoriai (išskyrus vidurinį rezonatorių) sudaryti iš dviejų skirtingo ilgio l ir pločio w dalių (žr. 3.4 pav.), kurios šiame darbe vadinamos pusrezonatoriais. BSPBIR konstrukcijos filtrų persidengiantys pusrezonatoriai yra vienodo ilgio l_j ir pločio w_j , todėl jie vadinami pusrezonatorių poromis, o formulėse esantis žymuo j reiškia pusrezonatorių poros numerį. Skaičiuojant kiekvieno pusrezonatoriaus matmenis, pirma reikia apskaičiuoti rezonatorių charakteringuosius impedansus esant porinei ir neporinei modoms, atitinkamai $(Z_{0e})_{j,j+1}$ ir $(Z_{0o})_{j,j+1}$ (Hong, 1976):

$$\begin{aligned}(Z_{0e})_{j,j+1} &= \frac{1}{Y_0} \left[1 + \frac{J_{j,j+1}}{Y_0} + \left(\frac{J_{j,j+1}}{Y_0} \right)^2 \right] \quad j = 0 \dots n, \\ (Z_{0o})_{j,j+1} &= \frac{1}{Y_0} \left[1 - \frac{J_{j,j+1}}{Y_0} + \left(\frac{J_{j,j+1}}{Y_0} \right)^2 \right] \quad j = 0 \dots n,\end{aligned}\tag{3.13}$$

čia $J_{j,j+1}$ – j -osios pusrezonatorių poros charakteringasis admitansas, Y_0 – filtro įėjimo ir išėjimo išvadų charakteringasis admitansas, kuris yra atvirkščias charakteringajam impedansui $Z_0 = 1/Y_0$. Kadangi reikia apskaičiuoti pusės rezonatoriaus impedansą, (3.13) formulėmis gautos impedanso vertės dalinamos iš 2, kaip nurodoma šaltinyje (Sharma, 2013):

$$\begin{aligned}(Z_{0se})_{j,j+1} &= \frac{(Z_{0e})_{j,j+1}}{2}, \\ (Z_{0so})_{j,j+1} &= \frac{(Z_{0o})_{j,j+1}}{2}.\end{aligned}$$

Vidutinio mikrojuostelės pločio W ir naudojamo padėklo aukščio h santykis apskaičiuojamas pagal (Sharma, 2013):

$$\begin{aligned}\frac{W}{h} &= \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2}, \\ A &= \frac{Z_c}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right).\end{aligned}\tag{3.14}$$

Pirminiams skaičiavimams vietoje Z_c statoma filtro charakteringojo impedanso vertė. ϵ_r – padėklo santykinė dielektrinė skvarba. Jeigu gautas W/h santykis yra < 2 , vidutinis pusrezonatorių pločio W ir padėklo aukščio h santykis apskaičiuojamas pagal tą pačią (3.14) formulę, jeigu ne, geriau

skaičiuoti pagal (3.15) formulę – atsakymas bus tikslesnis (Hong, 1976). Šiems skaičiavimams vietoje Z_c statomos pusrezonatoriams apskaičiuotos $(Z_{0se})_{j,j+1}$ ir $(Z_{0se})_{j,j+1}$ vertės.

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right] \right\}$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.15)$$

Pusrezonatorių pločio w ir tarpelių s tarp pusrezonatorių vertės apskaičiuojamos pagal (Sharma, 2013):

$$s_j = \frac{2h}{\pi} \cosh^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{se}\right) + \cosh\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{so}\right) - 2}{\cosh\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{so}\right) - \cosh\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{se}\right)} \right], \quad (3.16)$$

$$w_j = \frac{h}{\pi} \left\{ \cosh^{-1} \frac{1}{2} \left[\left(\cosh\left(\frac{\pi s}{2h}\right) - 1 \right) + \left(\cosh\left(\frac{\pi s}{2h}\right) + 1 \right) \cosh\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{se}\right) \right] - \frac{\pi s}{2h} \right\}. \quad (3.17)$$

Kadangi BSPBIR konstrukcijos filtrų kiekvienas pusrezonatorius yra skirtingo pločio w_j , dielektrinės skvarbos efektyvioji dalis ε_{re} skaičiuojama kiekvienam pusrezonatoriui atskirai pagal formulę (Sharma, 2013):

$$\varepsilon_{rej} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w_j}}}. \quad (3.18)$$

Rezonansinio dažnio bangos ilgis λ_{g0} mikrojuostelėje apskaičiuojamas pagal formulę (Sharma, 2013):

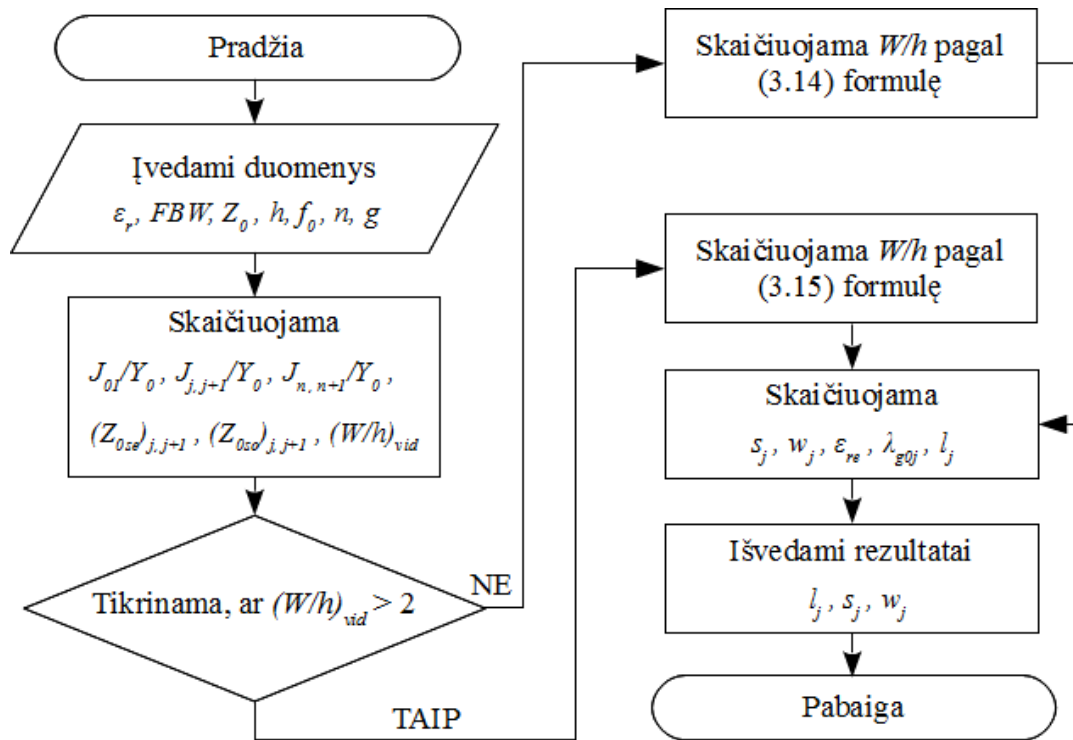
$$\lambda_{g0j} = \frac{300}{f_0(\text{GHz}) \sqrt{\varepsilon_{rej}}} \text{ mm}. \quad (3.19)$$

Formulė panaši į jau aptartą (3.10), skirtumas tas, kad dėl skirtingų pusrezonatorių efektyviųjų dielektrinių skvarbų, bangų ilgiai juose yra skirtingi.

Kadangi rezonatorius yra pusės bangos ilgio, tai pusrezonatoriaus ilgis lygus ketvirčiui bangos ilgio (Sharma, 2013):

$$l_j = \frac{\lambda_{g0j}}{4} = \frac{300}{4f(\text{GHz}) \sqrt{\varepsilon_{rej}}}. \quad (3.20)$$

Tam, kad automatizuoti skaičiavimus ir sumažinti klaidų atsiradimo riziką, sukurtas algoritmas (žr. 3.5 pav.) ir MATLAB aplinkoje parašyta programa (žr. 3.2 programos kodas) GSPBIR konstrukcijos filtro mikrojuostelės matmenims skaičiuoti.



3.5 pav. Programos, BSPBIR konstrukcijos filtrų mikrojuostelės matmenims skaičiuoti, algoritmas

3.2 programos kodas. Programos, BSPBIR konstrukcijos filtrų mikrojuostelės matmenims skaičiuoti, kodas

```

01 %% Įvesties parametrai.
02 EPSr = 4;      % Padėklo santykinė dielektrinė skvarba
03 FBW = 0.03;   % Filtro pralaidumo juostos plotis, %
04 Z0 = 50;      % Charakteringasis impedansas, omais
05 h = 2;        % Dielektrinio padėklo storis, mm
06 f0 = 0.394;   % Filtro centrinis dažnis, GHz
07 numPoles = 3; % Filtro eilė
08 g = [1 1.5963 1.0967 1.5963 1]; % 3 eilės Čebyšėvo filtro koeficientai
09 % kai praleidžiamų dažnių ch-os bangavimas 0,5 dB
10
11 %% Pusrezonatorių ilgių ir pločių skaičiavimas
12 % Susceptansų skaičiavimas
13 JY = zeros(1, numPoles + 1);
14 JY(1) = sqrt(FBW * pi / (g(1) * g(2)) / 2);
15 for j = 2 : numPoles
16     JY(j) = (pi * FBW) / (2 * sqrt(g(j) * g(j+1)));
17 end
18 JY(numPoles+1) = sqrt(FBW * pi / (g(numPoles+1) * g(numPoles+2)) / 2);
19
20 % Pusrezonatorių charakteringųjų impedansų skaičiavimas porinei ir
21 % neporinei modoms
22 Z0even = zeros(1, numPoles + 1);
23 Z0odd = zeros(1, numPoles + 1);
24 Z0se = zeros(1, numPoles + 1);
25 Z0so = zeros(1, numPoles + 1);
26 for j = 1 : numPoles + 1
27     Z0even(j) = Z0 * (1 + JY(j) + JY(j)^2);
28     Z0se(j) = Z0even(j) / 2;
29     Z0odd(j) = Z0 * (1 - JY(j) + JY(j)^2);
30     Z0so(j) = Z0odd(j) / 2;
31 end
  
```

```

32 % Skaičiuojamas W/h santykis
33 A = (Z0 / 60) * sqrt((EPSr + 1)/2) + ((EPSr - 1) / (EPSr + 1)) *
34 * (0.23 + (0.11 / EPSr));
35 Whsant = (8 * exp(A)) / (exp(2 * A) - 2);
36
37 % Rezonatorių W/h skaičiavimas
38 Ae = zeros(1, numPoles + 1);
39 Ao = zeros(1, numPoles + 1);
40 Whe = zeros(1, numPoles + 1);
41 Who = zeros(1, numPoles + 1);
42
43 if Whsant < 2          % Jei W/h < 2, naudojama 3.14 formulė,
44                     % jei W/h > 2, naudojama 3.15 formulė
45     for j = 1 : numPoles + 1
46         Ae(j) = (Z0se(j) / 60) * sqrt((EPSr + 1)/2) + ((EPSr - 1) /
47             / (EPSr + 1)) * (0.23 + (0.11 / EPSr));
48         Whe(j) = (8 * exp(Ae(j))) / (exp(2 * Ae(j)) - 2);
49         Ao(j) = (Z0so(j) / 60) * sqrt((EPSr + 1)/2) + ((EPSr - 1) /
50             / (EPSr + 1)) * (0.23 + (0.11 / EPSr));
51         Who(j) = (8 * exp(Ao(j))) / (exp(2 * Ao(j)) - 2);
52     end
53 else
54     for j = 1 : numPoles + 1
55         Ae(j) = (60 * (pi^2)) / (Z0se(j) * sqrt(EPSr));
56         Whe(j) = 2 / pi * ((Ae(j)-1) - log(2 * Ae(j)-1) + ((EPSr-1) /
57             / (2 * EPSr)) * log(Ae(j)-1));
58         Ao(j) = (60 * (pi^2)) / (Z0so(j) * sqrt(EPSr));
59         Who(j) = 2 / pi * ((Ao(j)-1) - log(2 * Ao(j)-1) + ((EPSr-1) /
60             / (2 * EPSr)) * log(Ao(j)-1));
61     end
62 end
63
64 % Rezonatorių pločio W ir rezonatorių skiriančio tarpelio ilgio s
65 % skaičiavimas
66 sh = zeros(1, numPoles + 1);
67 s = zeros(1, numPoles + 1);
68 Wh = zeros(1, numPoles + 1);
69 W = zeros(1, numPoles + 1);
70 for j = 1 : numPoles + 1
71     sh(j) = (2/pi)*acosh((cosh((pi/2)*Whe(j)) + cosh((pi/2)*Who(j)) -2) /
72         / (cosh((pi/2)*Who(j)) - cosh((pi/2)*Whe(j))));
73     s(j) = sh(j) * h;
74     pis2h = (pi*s(j)) / (2*h);
75     Wh(j) = (1/pi)*(acosh(0.5*((cosh(pis2h) -1) + (cosh(pis2h) + 1) *
76         * cosh((pi/2)*Whe(j)) )) - pis2h);
77     W(j) = Wh(j) * h;
78 end
79
80 % Santykinės dielektrinės skvarbos efektyviosios dalies skaičiavimas
81 EPSeff = zeros(1, numPoles + 1);
82 for j = 1 : numPoles + 1
83     EPSeff(j) = (EPSr + 1)/2 + (EPSr - 1)/(2*sqrt(1 + (12*h)/W(j)));
84 end
85
86 % Pusrezonatorių ilgių skaičiavimas
87 LambdaG = zeros(1, numPoles + 1);
88 ResLength = zeros(1, numPoles + 1);
89 for j = 1 : numPoles + 1
90     LambdaG(j) = 300 / (f0 * sqrt(EPSeff(j)));
91     ResLength(j) = LambdaG(j)/4;
92 end

```

Programos kode reikia suvesti filtro eilės numerį, $g_0, g_1, \dots, g_n$ koeficientus, padėklo medžiagos ε_r , padėklo storį, centrinį dažnį ir pralaidumo juostos plotį. Programa pagal šiuos duomenis apskaičiuoja tarpelių dydžius, pusrezonatorių ilgį ir plotį.

3.2. Mikrojuostelinių filtrų modeliavimas

3.1 poskyryje sudaryti algoritmai ir parašytos MATLAB aplinkoje dirbančios programos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų matmenims skaičiuoti. Šiame poskyryje bus patikrinta, kaip veikia parašytos programos, taip pat jomis bus apskaičiuoti mikrojuostelių matmenys feroelektriniams filtrams. Naudojant apskaičiuotus mikrojuostelių matmenimis bus modeliuojami filurai „Sonnet“ EMB simulatoriumi. Šie filurai bus naudojami perdavimo ir atspindžio charakteristikoms bei centrinio dažnio valdymo riboms tirti.

3.2.1. GSPBIR konstrukcijos filtro modeliavimas

Antrajame skyriuje pastebėta, kad optimaliausias feroelektrinio sluoksnio storis yra iki $1,1 \mu\text{m}$ (žr. 2.4 pav.), nes dielektrinės skvarbos dydis yra netiesiogiai proporcingas sluoksnio storiui. Taip pat žinoma, kad kuo storesnis sluoksnis, tuo aukštesnė įtampa reikalinga dielektrinei skvarbai derinti. Atsižvelgiant į šiuos kriterijus, nuspręsta filtrą modeliuoti ant $1 \mu\text{m}$ storio feroelektrinio padėklo. Tokio storio feroelektrikui derinti pakanka 10 voltų įtampos (žr. 2.5 pav.), o elektriniu lauku neapkrauto feroelektriko ε_r yra santykinai aukšta – 600 (žr. 2.4 pav.).

Filurai ant feroelektrinio padėklo modeliuojami retai, dėl to šios parametrų vertės nėra standartinės ir nėra aišku, ar 3.1 poskyryje parašytos mikrojuostelės matmenų skaičiavimo programos teisingai skaičiuos tokių filtrų matmenis. Siekiant tai išsiaiškinti, buvo nuspręsta atrinkti du standartinių parametrų filurus, suvesti jų parametrus į programą, pagal programą apskaičiuotus mikrojuostelės matmenis EMB simulatoriumi „Sonnet“ sukurti filtrų modelius ir patikrinti, ar gauta perdavimo charakteristika yra tokia pati, kokia buvo užduota programoje. Atsitiktinai atrinkti filtrų parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

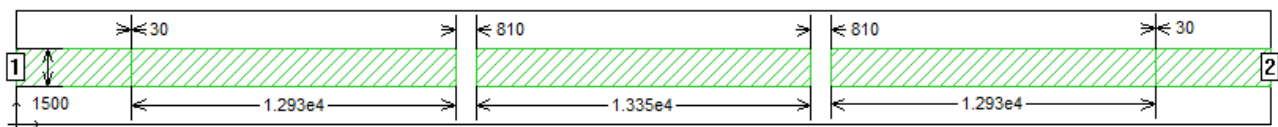
Nuspręsta programą išbandyti modeliuojant ženkiai skirtingus, tačiau tuo pačiu ir standartinius filurus. Pirmasis turi neaukštą centrinį dažnį, bet siaurą pralaidumo juostą bei didelius dielektrinius nuostolius, antrasis priešingai – aukštą centrinį dažnį, plačią pralaidumo juostą ir 4 kartus mažesnius dielektrinius nuostolius. Taip pat filtrų dielektrinė skvarba skiriasi 2 kartus, o mikrojuostelės plotis 3 kartus. Programa apskaičiuoti filtro rezonatorių ir tarpelių matmenys pateikti lentelės apačioje.

3.1 lentelė. GSPBIR konstrukcijos filtro matmenų skaičiavimo programos patikrinimui naudojami filtrų parametrai

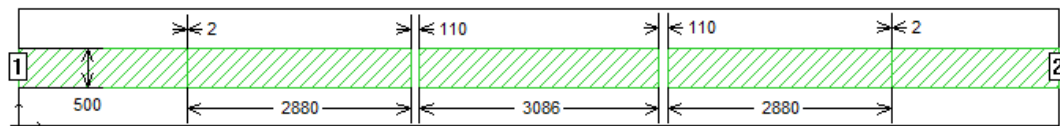
	Filtras nr. 1	Filtras nr. 2
Centrinis dažnis	6 GHz	16 GHz
Praleidžiamų dažnių juostos plotis	3 %	10 %
Charakteristikos tipas	3 pakopos Čebyševio su 0,5 db bangele	3 pakopos Čebyševio su 0,1 db bangele
Charakteringasis impedansas	50 Ω	50 Ω
Padėklo storis	1,6 mm	0,6 mm
Padėklo dielektrinė skvarba	4,4	10,8
Mikrojuostelės plotis	1,5 mm	0,5 mm
Padėklo nuostolių tangentas	0,02	0,005
Programa apskaičiuoti mikrojuostelės matmenys		
$l_1 = l_3$	12,933 mm	2,88 mm
l_2	13,3416 mm	3,0863 mm
$s_{0,1} = s_{3,4}$	0,03 mm	0,002 mm
$s_{1,2} = s_{2,3}$	0,81 mm	0,11 mm

Pagal šiuos matmenis „Sonnet“ EMB simulatoriumi nubraižyti filtrų brėžiniai (žr. 3.6 pav.) ir išmatuotos perdavimo ir atspindžio charakteristikos (žr. 3.7 pav.). Filtrų brėžiniai pateikti skirtingu masteliu, nes jų dydis skiriasi maždaug 4 kartus, matmenys pateikti mikrometrais. Svarbu paminėti, kad pirmojo filtro matmenys suapvalinti iki dešimtųjų milimetro dalių, tačiau tai neturėtų pastebimai paveikti matavimo rezultatus.

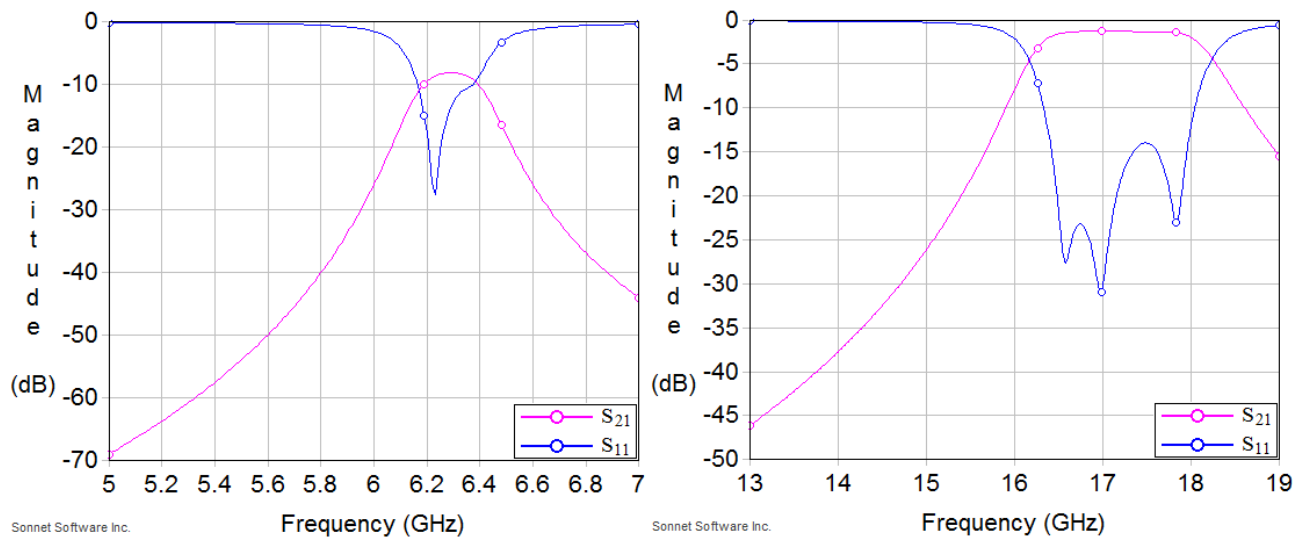
Filtras nr. 1



Filtras nr.2



3.6 pav. Sumodeliuotų pirmojo (viršuje) ir antrojo (apačioje) GSPBIR filtrų mikrojuostelių matmenys



3.7 pav. Sumodeliuotų pirmojo (kairėje) ir antrojo (dešinėje) GSPBIR filtrų perdavimo (raudona) ir atspindžio (mėlyna) charakteristikos

Iš filtrų perdavimo charakteristikų (žr. 3.7 pav.) matyti, kad pirmojo filtro centrinis dažnis pasislinko 5 %, o antrojo 7,5 % į aukštųjų dažnių pusę. Filtrų pralaidumo juostos bei slopinimo lygiai atitinka užduotas vertes. Tokie rezultatai rodo, kad 3.1 poskyryje parašyta programa pakankamai tiksliai skaičiuoja standartinių filtrų mikrojuostelės matmenis (centrinio dažnio poslinkį galima iš anksto numatyti), todėl sekantis žingsnis – naudojant šią programą apskaičiuoti feroelektriniam padėklui pritaikytos mikrojuostelės matmenis.

Pastebėta, kad 3.1.1 skyrelyje aptartomis formulėmis apskaičiuoti tokių mažų mikrojuostelės matmenų neįmanoma, 1 μm pločio mikrojuostelei paskaičiuojamas 1 pm ilgio tarpelis, tai reiškia, kad mikrojuostelės plotis yra milijoną kartų didesnis už tarpelio ilgį. Tokių matmenų filtrų ne tik nepavyktų pagaminti, bet jų net nebūtų galima sumodeliuoti EMB simulatoriumi „Sonnet“.

Empiriškai keičiant mikrojuostelės proporcijas netyčia buvo pastebėta, kad sumažinus filtro matmenis taip, kad visų matmenų santykis liktų nepakitęs, filtro centrinis dažnis padidėja tiek kartų, kiek sumažinti matmenys. Taip pat buvo pastebėta, kad naudojant (3.10) formulę nesunku prognozuoti kaip pakis filtro centrinis dažnis priklausomai nuo to, kiek kartų pakito filtro matmenys ir jo padėklo dielektrinė skvarba. λ_{g0} reiškia filtro rezonanso bangos ilgį. Akivaizdu, kad jeigu matmenys sumažės 10 kartų, rezonatorius sumažės irgi 10 kartų, todėl jame rezonuos 10-čia kartų trumpesnės bangos. Taigi naudojant santykinis vienetus iš (3.10) formulės galima išsireikšti:

$$f_{ob} = f_{0d} \frac{m}{\epsilon}, \quad (3.21)$$

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\epsilon_{rb}}}{\sqrt{\epsilon_{ed}}}$$

čia m – santykis nusakantis, kiek kartų sumažinami matmenys, ϵ_{rd} ir ϵ_{rb} atitinkamai dabartinė ir būsima padėklo santykinė dielektrinė skvarba, f_{0d} ir f_{0b} atitinkamai dabartinis ir būsimas filtro centrinis dažnis po mastelio keitimo.

Taigi, žinant šią teoriją galima uždavinį pradėti spręsti nuo kito galo. Nuspręsta modeliuoti filtrus, kurių parametrai tokie: santykinė dielektrinė skvarba ir padėklo storis, kaip jau išsiaiškinta antrajame skyriuje, atitinkamai $\epsilon_r = 600$ ir $h = 1 \mu\text{m}$, tokio storio BST feroelektriko nuostolių tangentas pagal (Nath, 2006) yra maždaug 0,005, centrinis dažnis $f_0 = 100 \text{ GHz}$ (naudojant feroelektrinį padėklą, dėl aukštos dielektrinės skvarbos sumažėja bangų ilgiai, todėl sudėtinga suprojektuoti žemesnio centrinio dažnio filtrus), dažnių juostos plotis 1 % (GSPBIR filtrų praleidžiamų dažnių juosta nebūna labai plati, ypač jeigu centrinis dažnis nėra aukštas (Hong, 1976)), perdavimo charakteristika Čebyševio 3 pakopos su 0,5 dB bangele, mikrojuostelės plotis $w = 1 \mu\text{m}$, impedansas $z_0 = 50 \Omega$. Mastelį keisti bus patogiau, jei pradiniai filtro padėklo storis ir mikrojuostelės plotis bus po 1 mm, tuomet santykis bus $m = 1000:1$. Pradinė ϵ_r geriau, kad būtų kiek įmanoma žemesnė, tuomet ϵ bus reikšmingesnis lyginant su m , kuris ir taip labai didelis, todėl $\epsilon_{rd} = 4$. Duomenis suvedus į (3.21) formules:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\epsilon_{rb}}}{\sqrt{\epsilon_{ed}}} = \frac{\sqrt{600}}{\sqrt{4}} = 12,2474,$$

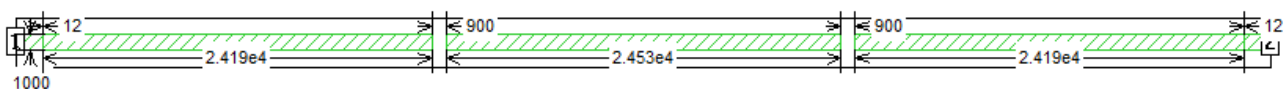
$$f_{0b} = f_{0d} \frac{m}{\epsilon} \Leftrightarrow f_{0d} = f_{0b} \frac{\epsilon}{m},$$

$$f_{0d} = f_{0b} \frac{\epsilon}{m} = 100 \text{ (GHz)} \frac{12,24745}{1000} = 1,22474 \text{ GHz}.$$

Pastebėta, kad dėl mažos, GSPBIR konstrukcijos filtrams būdingos, nuosekliosios talpos, neįmanoma sumodeliuoti filtro tokiam žemam dažniui. Todėl buvo nuspręsta filtro centrinių dažnių padidinti iki $f_0 = 300 \text{ GHz}$ ir praleidžiamų dažnių juostą sumažinti iki 0,5 %. Atlikus duomenų korekciją gautas filtras, kurio centrinis dažnis:

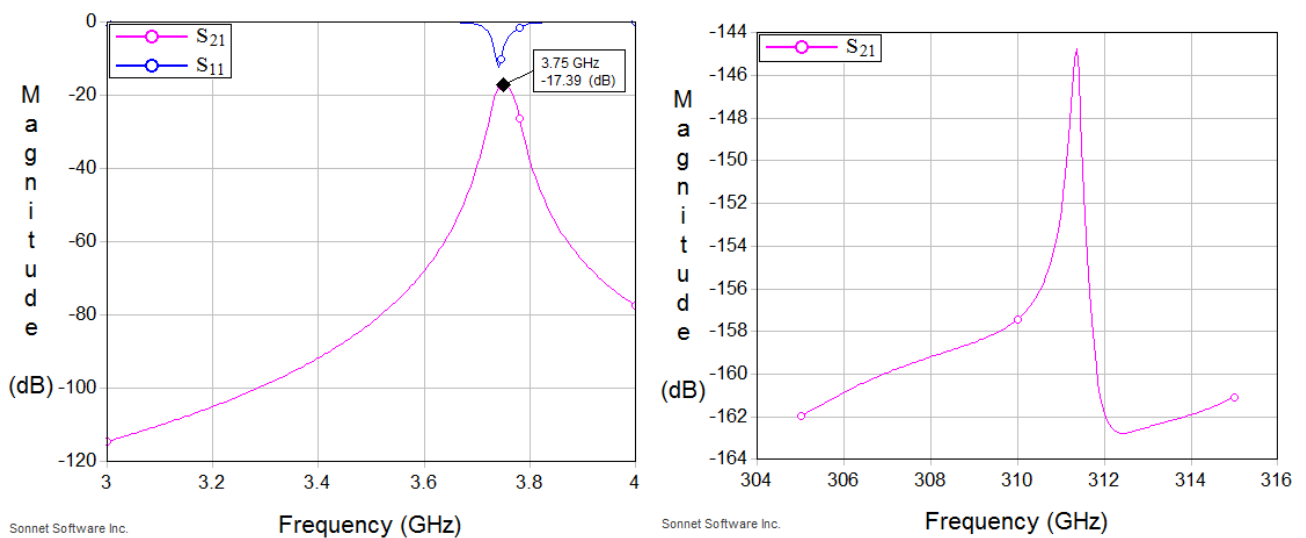
$$f_{0d} = f_{0b} \frac{\epsilon}{m} = 300 \text{ (GHz)} \frac{12,24745}{1000} = 3,674 \text{ GHz}.$$

Atsižvelgiant į tai, kad matmenų skaičiavimo tikslumas, skaičiuojant 6 GHz ir 16 GHz centrinio dažnio filtrų matmenis, atitinkamai buvo 95,238 % ir 93,023 %, buvo apskaičiuota, kad dažniui didėjant vienu GHz, centrinio dažnio tikslumas mažėja 0,2215 % ir rezultate dažnis visada gaunamas didesnis už norimąjį. Įvertinus šias paklaidas buvo paskaičiuota, kad esant 3,674 GHz centriniam dažniui, skaičiavimų tikslumas bus 95,753 %, todėl filtras buvo skaičiuojamas 3,518 GHz centriniam dažniui. Sumodeliuoto filtro matmenys pateikti 3.8 pav.



3.8 pav. Sumodeliuoto 3,674 GHz centrinio dažnio GSPBIR filtro matmenys pateikti nanometrais

Filtras gavosi labai ilgas ir siauras, tačiau jei filtras būtų modeliuojamas 1,22474 GHz centriniam dažniui, kaip buvo planuota, jis būtų dar tris kartus ilgesnis. Pagrindinė problema, modeliuojant GSPBIR konstrukcijos filtras, yra tarpelių $s_{0,1}$ ir $s_{3,4}$ ilgiai. Mikrojuostelės plotis w ir tarpelis s sudaro nuosekliają (nuoseklaus jungimo) talpą. Projektuojant neaukšto centrinio dažnio filtras ir norint gauti plačią praleidžiamų dažnių juostą, šios talpos turi būti didelės. Kadangi mikrojuostelės pločio keisti negalima, jis turi būti labai artimas feroelektrinio padėklo storiui (antrajame skyriuje buvo nuspręsta, kad padėklas turi būti 1 μm storio), reikia mažinti tarpelį s . Šiuo atveju, kai $f_0 = 3,518 \text{ GHz}$, tarpeliai $s_{0,1}$ ir $s_{3,4}$ yra po 12 μm , o tai yra labai maži atstumai lyginant su filtro matmenimis. Dėl šios priežasties GSPBIR konstrukcijos filtras reikėtų rinktis tik kai reikia gauti labai aukštą centrinių dažnį, o naudojant 1 μm storio feroelektrinį padėklą, šia konstrukcija nelabai pavyktų sumodeliuoti filtro su žemesniu kaip 200 GHz centriniu dažniu.



3.9 pav. Sumodeliuoto 3,674 GHz centrinio dažnio GSPBIR filtro perdavimo charakteristika (kairėje) ir tą patį filtrą sumažinus santykiu 1000:1 gauta perdavimo charakteristika (dešinėje)

Iš sumodeliuoto filtro perdavimo charakteristikos (žr. 3.9 pav. kairėje) matyti, kad filtro centrinis dažnis vis tiek į aukštųjų dažnių sritį pasislinko daugiau negu buvo planuota. Šį kartą dažnio apskaičiavimo tikslumas tik 93,82 %, tai reiškia, kad nuo planuotos 3,518 GHz vertės dažnis pasislinko 6,2 % (iki 3,75 GHz). Kadangi rezultato paklaida buvo iš anksto numatyta ir matmenų skaičiavimo metu centrinis dažnis parinktas 3,518 GHz, o ne 3,674 GHz, koks buvo apskaičiuotas, šį kartą buvo suklysta tik 2,03 %. Pagal (3.21) formulę apskaičiuotas filtro centrinis dažnis po matmenų korekcijos:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\epsilon_{rb}}}{\sqrt{\epsilon_{ed}}} = \frac{\sqrt{600}}{\sqrt{4}} = 12,24745,$$

$$f_{ob} = f_{0d} \frac{m}{\epsilon} = 3,75 \frac{1000}{12,24745} = 306,2 \text{ GHz.}$$

Palyginus apskaičiuotą centrinių dažnį su EMB simulatoriumi „Sonnet“ gautu $f_0 = 311,2 \text{ GHz}$ matyti, kad atsakymo tikslumas 98,4 %, todėl visiškai tikėtina, kad paklaida galėjo atsirasti dėl apvalinimo netikslumų.

Iš sumažintų matmenų filtro perdavimo charakteristikos (žr. 3.9 pav. dešinėje) matyti, kad šiuose dažniuose signalas yra stipriai slopinamas – net rezonanso metu slopinimas siekia 145 dB. Dėl tokio stipraus slopinimo galima daryti išvadą, kad naudojant GSPBIR konstrukciją nepavyktų suprojektuoti feroelektriniam padėklui pritaikytų filtrų. Pagrindinės priežastys:

- Žemame dažnyje dirbančių filtrų nepavyktų suprojektuoti dėl, šiai konstrukcijai būdingų, mažo talpumo nuoseklaus jungimo kondensatorių.
- Aukštame dažnyje filtro nuostoliai yra tokie dideli, jog toks filtras neturėtų praktinio pritaikymo.

3.2.2. BSPBIR konstrukcijos filtro modeliavimas

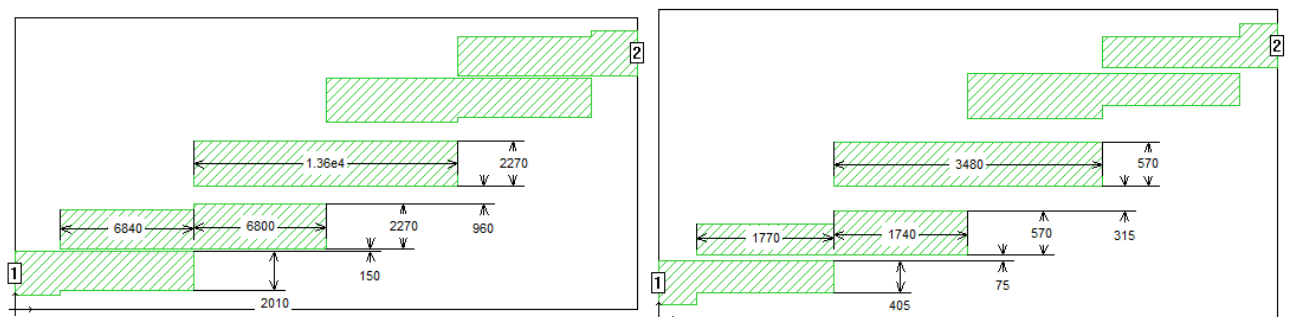
3.2.1 skyrelyje tiriant GSPBIR konstrukcijos feroelektrinį filtrą buvo pastebėta, kad ši konstrukcija nėra tinkama itin mažų matmenų filtrams (kai padėklo storis mikrometrų eilės), nes šios konstrukcijos filtrų nuoseklaus jungimo kondensatorių talpos vertės yra labai mažos. Šio trūkumo neturi briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (BSPBIR) konstrukcijos filtrai. BSPBIR konstrukcijos filtrų nuoseklaus jungimo kondensatorių plotas yra žymiai didesnis (žr. 3.3 pav.), nes kondensatorius sudarančios mikrojuostelės persidengia ne pločiu, o ilgiu, taip gaunamas žymiai didesnis kondensatoriaus plokštelių paviršiaus plotas.

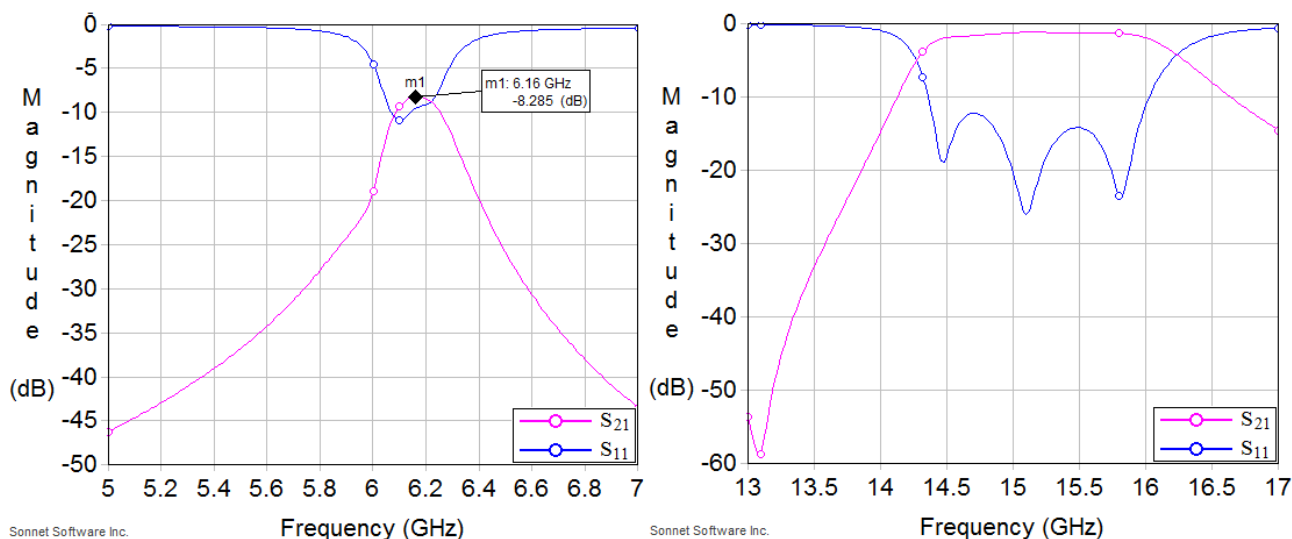
Pirmajame šio skyriaus poskyryje buvo parašyta MATLAB aplinkoje dirbanti programa BSPBIR konstrukcijos filtrų matmenims skaičiuoti. Siekiant įsitikinti, kad programa tiksliai skaičiuoja mikrojuostelės matmenis, nuspręsta sumodeliuoti du standartinius filtrus, kurių parametrai pateikti 3.2 lentelėje. Parametrai parinkti tokie patys, kokie buvo parinkti modeliuojant GSPBIR konstrukcijos filtrus, tai leis palyginti viena ir kita konstrukcija sumodeliuotų filtrų charakteristikas. Programomis apskaičiuoti mikrojuostelės matmenys pateikti lentelės apačioje. Pagal šiuos matmenis „Sonnet“ EMB simulatoriumi nubraižyti filtrų brėžiniai (žr. 3.10 pav.) ir išmatuotos perdavimo ir atspindžio charakteristikos (žr. 3.11 pav.). Filtrų brėžiniai pateikti skirtingu masteliu, nes jų dydis skiriasi beveik 4 kartus, matmenys pateikti mikrometrais. Lyginant vienodų parametru BSPBIR ir GSPBIR konstrukcijomis sumodeliuotų filtrų matmenis matyti, kad BSPBIR konstrukcijos filtrai yra maždaug 6 kartus trumpesni ir 3 kartus platesni, tai reiškia, kad BSPBIR konstrukcijos filtrai užima mažesnę paviršiaus plotą.

3.2 lentelė. BSPBIR konstrukcijos filtro matmenų skaičiavimo programos patikrinimui naudojami filtrų parametrai

	Filtras nr. 1	Filtras nr. 2
Centrinis dažnis	6 GHz	16 GHz
Praleidžiamų dažnių juostos plotis	3 %	10 %
Charakteristikos tipas	3 pakopos Čebyševio su 0,5 db bangele	3 pakopos Čebyševio su 0,1 db bangele
Charakteringasis impedansas	50 Ω	50 Ω
Padėklo storis	1,6 mm	0,6 mm
Padėklo dielektrinė skvarba	4,4	10,8
Mikrojuostelės plotis	1,5 mm	0,5 mm
Padėklo nuostolių tangentas	0,02	0,005
Programa apskaičiuoti mikrojuostelės matmenys		
$l_1 = l_4$	6,836 mm	1,768 mm
$l_2 = l_3$	6,801 mm	1,744 mm
$s_1 = s_4$	0,152 mm	0,077 mm
$s_2 = s_3$	0,957 mm	0,31 mm
$w_1 = w_4$	2,007 mm	0,402 mm
$w_2 = w_3$	2,266 mm	0,57 mm

Iš perdavimo charakteristikų (žr. 3.11 pav.), matyti, kad pirmojo filtro centrinis dažnis pasislinko 160 MHz į aukštųjų dažnių pusę, o antrojo filtro – maždaug 800 MHz į žemųjų dažnių pusę. Tai atitinka 2,6 % ir 4,2 % centrinio dažnio skaičiavimų paklaidas. Filtrų pralaidumo juostos bei slopinimo lygiai atitinka programoje užduotas vertes.

**3.10 pav.** Sumodeliuotų pirmojo (kairėje) ir antrojo (dešinėje) BSPBIR filtrų mikrojuostelių matmenys



3.11 pav. Sumodeliuotų pirmojo (kairėje) ir antrojo (dešinėje) BSPBIR filtrų perdavimo (raudona) ir atspindžio (mėlyna) charakteristikos

Naudojant BSPBIR konstrukcijos filtro matmenų skaičiavimo programą buvo pamėginta apskaičiuoti feroelektriniam padėklui pritaikytos mikrojuostelės matmenis (padėklo storis $h = 1 \mu\text{m}$ ir dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 600$), tačiau apskaičiuotų filtro matmenų realiomis sąlygomis nepavyktų pagaminti. Modeliuojant filtrus su 10 % ir 3 % pralaidumo juostos pločiu, gaunamas tarpelis tarp pusrezonatorių s atitinkamai maždaug 10000 ir 30000 kartų didesnis už pusrezonatoriaus plotį.

Taigi, kaip ir modeliuojant GSPBIR filtrą, iš pradžių bus apskaičiuoti mikrojuostelės matmenys pritaikyti milimetrų eilės storio ir žemos ϵ_r padėklui, o tada visi matmenys bus sumažinti 1000 kartų ir ϵ_r padidinta iki feroelektrinėms medžiagoms būdingos vertės. Kadangi naudojant GSPBIR konstrukciją nepavyko sumodeliuoti feroelektrinio filtro, nuspręsta BSPBIR konstrukcija sumodeliuoti du filtrus, pritaikytus $1 \mu\text{m}$ ir $2 \mu\text{m}$ storio feroelektriniam padėklams (žr. 3.3 lentelėje). Kadangi mastelis mažinamas 1000 kartų, vadinasi centrinis dažnis tiek kartų padidės, o ϵ_r padidėjimas, remiantis (3.21) formule, dažnį sumažins ne taip ir daug:

$$\epsilon_{1\mu\text{m}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{rb}}}{\sqrt{\epsilon_{ed}}} = \frac{\sqrt{600}}{\sqrt{4}} = 12,2474,$$

$$\epsilon_{2\mu\text{m}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{rb}}}{\sqrt{\epsilon_{ed}}} = \frac{\sqrt{690}}{\sqrt{4}} = 13,134,$$

čia $\epsilon_{1\mu\text{m}}$ ir $\epsilon_{2\mu\text{m}}$ – santykinės dielektrinės skvarbos padidėjimas atitinkamai $1 \mu\text{m}$ ir $2 \mu\text{m}$ storio feroelektriniam padėklams, ϵ_{rd} ir ϵ_{rb} – feroelektrinio padėklo ϵ_r atitinkamai iki ir po matmenų mastelio pakeitimo. Antrajame skyriuje buvo apskaičiuota, kad $1 \mu\text{m}$ ir $2 \mu\text{m}$ storio feroelektrinių padėklų ϵ_r atitinkamai lygios 600 ir 690 (žr. 2.4 pav.). Pasirinkta $\epsilon_{rd} = 4$, nes maždaug tokia yra daugelio dielektrinių medžiagų ϵ_r , taip pat tokia vertė yra optimali siekiant gauti aukštą ϵ .

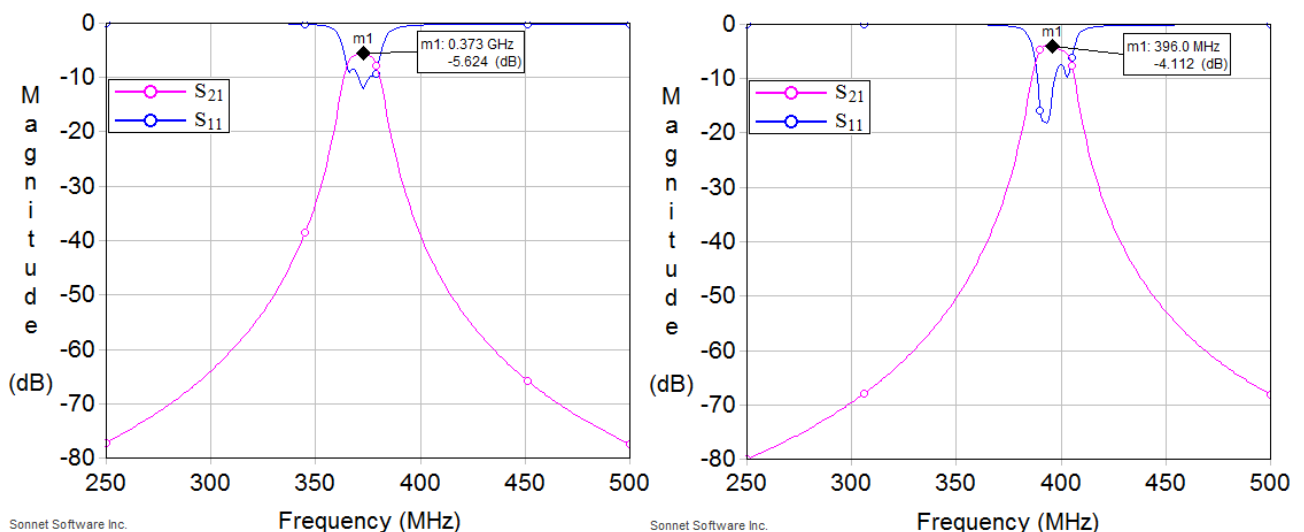
Kadangi BSPBIR konstrukcija leidžia modeliuoti santykinai žemo centrinio dažnio filtrus, nuspręsta pabandyti galutiniame rezultate sumodeliuoti 30 GHz centrinio dažnio filtrus atitinkamai ant 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinių padėklų. Toks žemas dažnis pasirinktas siekiant išvengti didelių signalo nuostolių, kurie pasireiškia aukštuose dažniuose. Siekiant galutiniame rezultate gauti 30 GHz centrinio dažnio filtrus, pirmajame etape turime apskaičiuoti matmenis filtrams, kurių centriniai dažniai:

$$f_{0d1\mu\text{m}} = f_{0b1\mu\text{m}} \frac{\epsilon_{1\mu\text{m}}}{m} = 30 \text{ (GHz)} \frac{12,2474}{1000} = 367 \text{ MHz},$$

$$f_{0d2\mu\text{m}} = f_{0b2\mu\text{m}} \frac{\epsilon_{2\mu\text{m}}}{m} = 30 \text{ (GHz)} \frac{13,134}{1000} = 394 \text{ MHz},$$

čia $f_{0d1\mu\text{m}}$ ir $f_{0d2\mu\text{m}}$ – filtrų centriniai dažniai iki mastelio pakeitimo, atitinkamai filtrų naudojančių 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus, $f_{0b1\mu\text{m}}$ ir $f_{0b2\mu\text{m}}$ – filtrų centriniai dažniai po mastelio keitimo, atitinkamai filtrų naudojančių 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus, m – mastelio sumažinimo santykis.

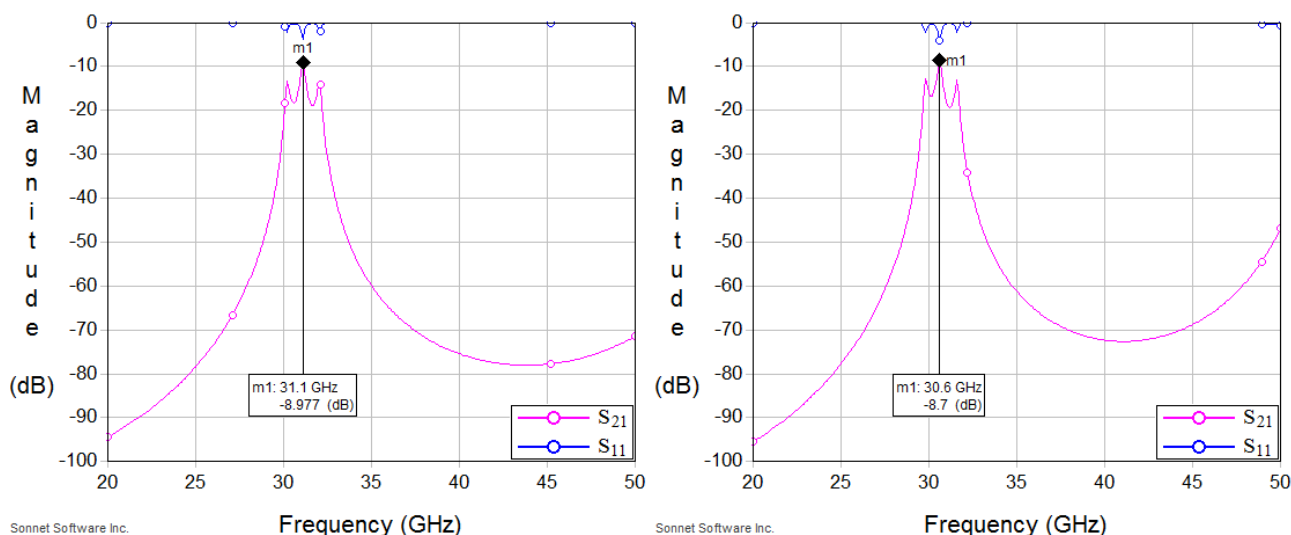
Pagal apskaičiuotus mikrojuostelės matmenis, kurie pateikti 3.3 lentelėje, „Sonnet“ EMB simulatoriumi sumodeliuoti filurai ir išmatuotos jų perdavimo ir atspindžio charakteristikos, jos pateiktos 3.12 pav. Filtrų, sumodeliuotų ant 1 mm ir 2 mm dielektrinių padėklų, centriniai dažniai pasislinko atitinkamai 1,6 % ir 0,5 % į aukštųjų dažnių pusę, praleidžiamų dažnių juosta išliko maždaug 3 % centrinio dažnio, Čebyševio filtrams būdingo perdavimo charakteristikos bangavimo praleidžiamų dažnių juostoje beveik nematyti.



3.12 pav. Sumodeliuotų BSPBIR konstrukcijos filtrų ant 1 mm (kairėje) ir 2 mm (dešinėje) storio feroelektrinių padėklų perdavimo (raudona) ir atspindžio (mėlyna) charakteristikos

3.3 lentelė. Feroelektriniam padėklui pritaikytų filtrų parametrai iki mastelio sumažinimo

	Filtras ant 1 μm storio padėklo	Filtras ant 2 μm storio padėklo
Centrinis dažnis	367 MHz	394 MHz
Praleidžiamų dažnių juostos plotis	3 %	3 %
Charakteristikos tipas	3 pakopos Čebyševio su 0,5 db bangele	3 pakopos Čebyševio su 0,5 db bangele
Charakteringasis impedansas	50 Ω	50 Ω
Padėklo storis	1 mm	2 mm
Padėklo dielektrinė skvarba	4	4
Padėklo nuostolių tangentas	0,005	0,005
Programa apskaičiuoti mikrojuostelės matmenys		
$l_1 = l_4$	126,712 mm	108,353 mm
$l_2 = l_3$	126,024 mm	107,782 mm
$s_1 = s_4$	0,125 mm	0,249 mm
$s_2 = s_3$	0,903 mm	1,805 mm
$w_1 = w_4$	2,165 mm	4,329 mm
$w_2 = w_3$	2,465 mm	4,929 mm



3.13 pav. Sumodeliuotų filtrų ant 1 μm (kairėje) ir 2 μm (dešinėje) storio feroelektrinių padėklų, perdavimo (raudona) ir atspindžio (mėlyna) charakteristikos

1000 kartų sumažinus filtrų matmenis keičiasi tik brėžinio mastelis – kas buvo apskaičiuota mikrometrais, dabar yra nanometrais (žr. 3.3 lentelę), todėl išlieka nepakitusi brėžinio proporcija, taip išvengiama mastelio keitimo ir apvalinimo paklaidų. Dielektrinės skvarbos vertės parinktos pagal

antrajame skyriuje aptartą ϵ_r priklausomybės nuo dielektriko storio charakteristiką (žr. 2.4 pav.). 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinių padėklų santykinės dielektrinės skvarbos atitinkamai lygios 600 ir 690. Pagal šiuos duomenis „Sonnet“ EMB simulatoriumi sumodeliuoti filtrai ir išmatuotos jų perdavimo charakteristikos, jos pateiktos 3.13 pav. Filtrų centriniai dažniai po matmenų korekcijos apskaičiuoti pagal 3.21 formules

$$f_{0b1\mu\text{m}} = f_{0d1\mu\text{m}} \frac{m}{\epsilon_{1\mu\text{m}}} = 0,373 \frac{1000}{12,2474} = 30,45 \text{ GHz},$$

$$f_{0b2\mu\text{m}} = f_{0d2\mu\text{m}} \frac{m}{\epsilon_{2\mu\text{m}}} = 0,396 \frac{1000}{13,134} = 30,15 \text{ GHz}.$$

Išmatuotų ir apskaičiuotų 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus naudojančių filtrų centrinių dažnių paklaidos atitinkamai 2,1 % ir 1,5 %. Pralaidumo juostos plotis išliko maždaug 3 % centrinio dažnio. Lyginant su filtro charakteristika iki mastelio korekcijos, dabar matyti labai aiškus Čebyševio filtrams būdingas perdavimo charakteristikos bangavimas praleidžiamųjų dažnių srityje, amplitudės pokytis siekia beveik 10 dB. Slopinimas rezonanso dažnyje yra maždaug 10 dB.

3.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas

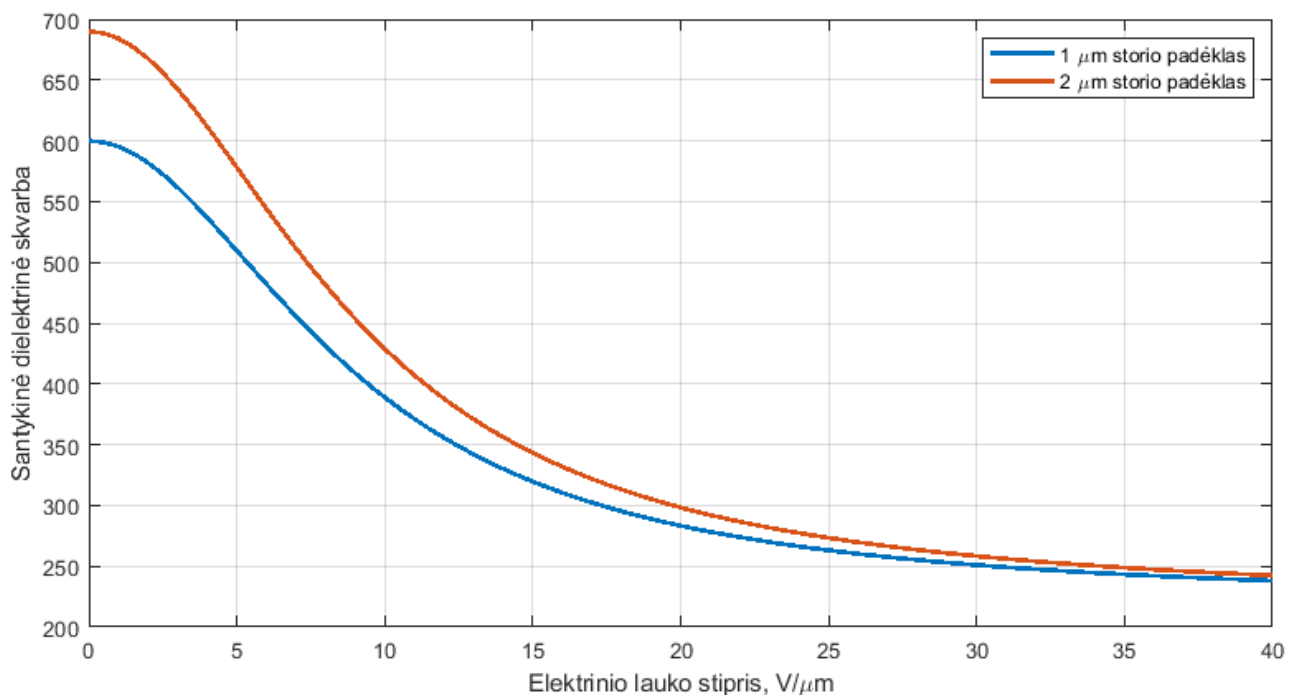
Skyriaus pirmajame poskyryje detalai paaiškintos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijos filtrų matmenų skaičiavimo lygtys bei sudarytos MATLAB terpėje dirbančios programos šių konstrukcijų filtrų matmenims skaičiuoti. Antrajame poskyryje šios programos išbandytos skaičiuojant įvairių parametru filtrus. Pastebėta, kad bandant šiomis programomis apskaičiuoti filtrus, kurių padėklas yra itin plonas (1 μm storio) arba didelė jo dielektrinė skvarba (600), gaunami filtro matmenys yra neteisingi, nes gaunamos didžiulės talpos, kokių nepavyktų pagaminti, arba apskaičiuotas mikrojuostelės plotis yra maždaug 10000 kartų mažesnis už tarpelio tarp mikrojuostelių ilgį, kas yra nelogiška. Kadangi proporcingai keičiant filtro matmenis filtro centrinio dažnio poslinkį galima lengvai apskaičiuoti, o filtro pralaidumo juostos plotis išlieka nepakitęs, nuspręsta filtrus modeliuoti dviem etapais. Pirmame etape apskaičiuojami filtro, kurio padėklas yra 1 mm storio ir $\epsilon_r = 4$, matmenys, o antrame šie matmenys atitinkamai sumažinami tiek kartų, kiek reikia paslinkti filtro centrinių dažnių į aukštųjų dažnių pusę. Tokiu būdu sumodeliuoti du BSPBIR konstrukcijos filtrai: vienas jų naudoja 1 μm , kitas – 2 μm storio padėklus. Taip pat buvo bandyta sumodeliuoti GSPBIR konstrukcijos filtrą, tačiau to nepavyko padaryti, nes ši konstrukcija nelabai tinka žemų dažnių (MHz eilės) filtrams projektuoti. Naudojant GSPBIR konstrukciją pavyko sumodeliuoti tik santykinai aukšto centrinio dažnio filtrą (3,75 GHz), todėl po mastelio sumažinimo filtro centrinis dažnis pasislinko net iki 300 GHz. Tokiame aukštame dažnyje pasireiškia labai stiprus signalų slopinimas, dėl kurio šis filtras nelabai galėtų būti praktiškai pritaikomas.

4. PERDAVIMO IR ATSPINDŽIO CHARAKTERISTIKŲ ANALIZĖ

Trečiajame skyriuje sumodeliuoti du BSPBIR konstrukcijos filtrai, kurių pralaidumo juostos plotis 3 % centrinio dažnio ir centrinis dažnis apytiksliai 30 GHz. Pasinaudojant antrajame skyriuje aptarta feroelektrikų savybe – ϵ_r priklausomybe nuo medžiagą veikiančio elektrinio lauko stiprio, bus atliktas tyrimas, kurio tikslas – išsiaiškinti šių filtrų centrinio dažnio derinimo galimybes. Skyrius užbaigiamas šiame darbe sumodeliuotų filtrų charakteristikų palyginimu su kitų autorių tyrimuose aprašytomis feroelektrinių filtrų charakteristikomis.

4.1. Sumodeliuotų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos

BST feroelektrinių 1 μm ir 2 μm storio padėklų, kurių sudėtyje yra 30 % strončio priemaišų, ϵ_r yra atitinkamai 600 ir 690 (žr. 2.4 pav.). Naudojant antrajame skyriuje parašytą programą (žr. 2.1 programos kodas) apskaičiuoti šių feroelektrinių padėklų dielektrinės skvarbos priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio grafikai (žr. 4.1 pav.), kai nustatymui naudojamas 0–40 V/ μm stiprio elektrinis laukas.



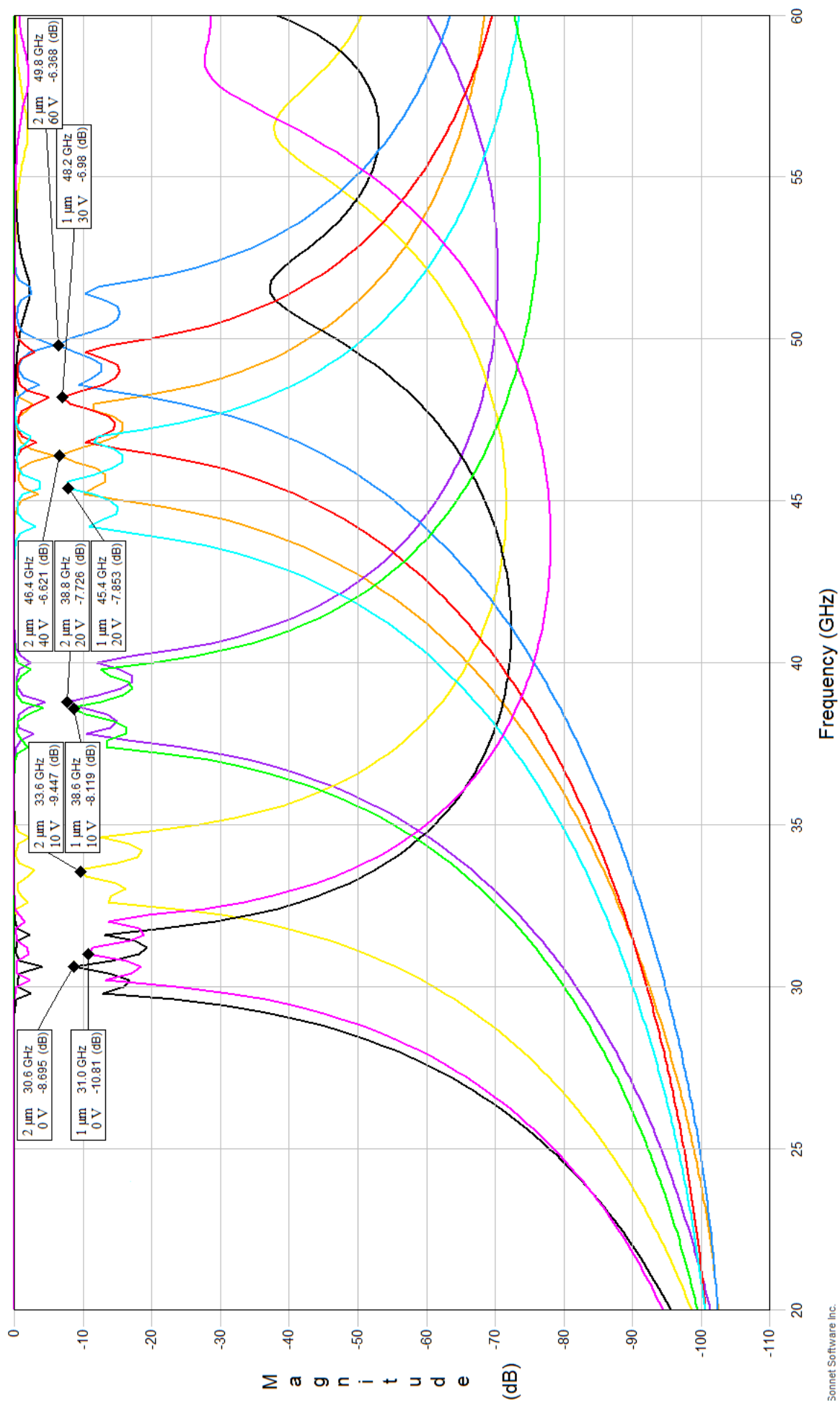
4.1 pav. 1 μm (mėlyna) ir 2 μm (raudona) storio feroelektrinių padėklų ϵ_r priklausomybė nuo medžiagą veikiančio elektrinio lauko stiprio

Grafiko horizontalioje ašyje pateiktas elektrinio lauko stipris voltais į mikrometrą. Įtampa, reikalinga feroelektrinio sluoksnio ϵ_r nustatyti apskaičiuojama elektrinį lauką padalinant iš feroelektrinio sluoksnio storio. Taigi, iš grafiko matyti, kad esant 10 V nustatymo įtampai 1 μm ir

2 μm storio feroelektrinių sluoksnių ϵ_r atitinkamai pakis nuo 600 iki 390 ir nuo 690 iki 575. Tai atitinka 35 % ir 16,66 % ϵ_r suderinamumą esant 10 V nustatymo įtampai. Akivaizdu, kad du kartus plonesnis feroelektrinis sluoksnis pasižymi du kartus aukštesniu ϵ_r suderinamumu. Esant 20 V nustatymo įtampai 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinių sluoksnių ϵ_r atitinkamai pakinta nuo 600 iki 280 ir nuo 690 iki 430. Tai atitinka 53,33 % ir 37,68 % ϵ_r suderinamumą esant 20 V nustatymo įtampai. Toliau didinant įtampą, 1 μm storio feroelektrinis sluoksnis pirmiau pasiekia įsisotinimą, o įtampai artėjant prie feroelektriko įsisotinio įtampos, ϵ_r beveik nustoja mažėti. Dvigubai storesniam feroelektriniam sluoksniui reikės dvigubai didesnės įtampos, kad pasiektų įsisotinimą. Naudojant labai aukštą įtampą būtų pasiektas taškas, kuriame šių filtrų ϵ_r charakteristikų grafikai „užliptų“ vienas ant kito, o tai reiškia, kad storesnio sluoksnio derinimo ribos yra platesnės, tačiau jam derinti reikalinga aukštesnė įtampa (Miller, 2012).

Tam, kad išmatuoti filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikas, bus keičiama EMB simulatoriumi „Sonnet“ sumodeliuotų filtrų feroelektrinio padėklo ϵ_r , taip imituojant filtrų darbą esant skirtingoms nustatymo įtampoms (jos pateiktos 4.1 pav.). Išmatuotos filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos pateiktos 4.2 pav. Čia kiekvieno matavimo rezultatas pateiktas skirtingos spalvos grafiku, o lentelėse prie grafikų nurodytas filtro storis (1 μm ar 2 μm), centrinio dažnio nustatymo įtampa, centrinis dažnis ir signalo stiprinimas šiame dažnyje. Perdavimo ir atspindžio charakteristikų grafikai pateikti tomis pačiomis spalvomis, kad būtų aišku, kurie perdavimo ir atspindžio grafikai yra poroje, akivaizdu, kad atspindžio grafikai yra viršuje, ties 0 dB riba.

Iš perdavimo charakteristikų (žr. 4.2 pav.) matyti, kad naudojant 10 V įtampą, 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus naudojančių filtrų centrinis dažnis pasislenka atitinkamai nuo 31 GHz iki 38,6 GHz ir nuo 30,6 GHz iki 33,6 GHz, tai atitinka 19,7 % ir 8,93 % centrinio dažnio suderinamumą esant 10 V nustatymo įtampai. Esant 20 V nustatymo įtampai, 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus naudojančių filtrų centrinis dažnis pasislenka atitinkamai nuo 31 GHz iki 45,4 GHz ir nuo 30,6 GHz iki 38,8 GHz, tai atitinka 31,7 % ir 11,14 % centrinio dažnio suderinamumą esant 20 V nustatymo įtampai. Filtrų suderinamumai yra maždaug lygūs tada, kai filtras su plonesniu padėklu apkrautas 10 V nustatymo įtampa, o su storesniu padėklu – 20 V nustatymo įtampa (žalias ir violetinis grafikai). Šiame dažnio taške filtras su plonesniu padėklu yra du kartus suderinesnis, nes jam reikia du kartus žemesnės įtampos tam pačiam rezultatui pasiekti. Tačiau toliau didinant nustatymo įtampą (raudonas ir mėlynas grafikai), kai filtrams, naudojamiems 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus, nustatomos atitinkamai 30 V ir 60 V įtampos, filtrų centriniai dažniai nebėra apylygiai – storą padėklą naudojančio filtro dažnis pasislinko daugiau. Taip yra todėl, kad plonesnis feroelektrinis padėklas esant 30 V nustatymo įtampai jau beveik pasiekė įsisotinimą. Feroelektrikų įsisotinio reiškinys yra detalai aprašytas (Chase, 2005) straipsnyje.



4.2 pav. Sumodeliuotų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikos

Filtro pralaidumo juostoje matyti labai aiškus (daugiau negu 5 dB siekiantis) Čebyšovo perdavimo charakteristikai būdingas signalo amplitudės bangavimas, kurio nesimatė iki sumažinant filtro matmenis (žr. 3.10 pav.).

Tiriant signalo nuostolius šiuose filtruose pastebėta, kad kai filtro padėklo ε_r didelė (esant silpnam elektriniam laukui), filtras pasižymi didesniais signalo nuostoliais negu tuomet, kai ε_r yra maža. Šaltiniuose (Corredores 2014) ir (Cisse, 2018) nagrinėjamas šis reiškinys ir nuostolių dydis siejamas su ε_r dydžiu, taip pat siūlomas metodas lazeriu išnaikinti feroelektrinį sluoksnį vietose, kuriose netrasuojama mikrojuostelė arba į feroelektriką įterpti mangano oksido priemaišų. Iš atspindžio charakteristikų matyti, kad mažinant ε_r (didinant nustatymo įtampą) atspindžių amplitudė taip pat mažėja. Taip yra todėl, kad mažėjant ε_r didėja filtro pralaidumas, dėl to mažesnė dalis signalo galios atsispindi ir didesnė pereina į filtro išėjimą.

4.2. Sumodeliuotų filtrų charakteristikų palyginimas su kitų autorių tyrimuose aprašytais feroelektrinių filtrų charakteristikomis

Pirmajame poskyryje apžvelgtos šiame darbe sumodeliuotų filtrų charakteristikos. Šiame poskyryje jos palygintos su kitų autorių darbuose aprašytų feroelektrinių filtrų charakteristikomis. Filtrų charakteristikų palyginimai pateikti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Darbe sumodeliuotų filtrų charakteristikų palyginimas su kitų autorių darbuose aprašytų feroelektrinių filtrų charakteristikomis

Feroelektrikas	Centrinis dažnis, kai $E=0$, GHz	Feroelektrinio sluoksnio storis, nm	Maks. nustatymo įtampa, V	Suderinamumas, %	Įneštiniai nuostoliai, kai $E=0$, dB	Įneštiniai nuostoliai, kai $E=max$, dB	Atspindžių slopinimas kai $E=0$, dB	Atspindžių slopinimas kai $E=max$, dB	Šaltinis
BST 70	3,5	350	30	10,25	6,8	6,2	22	31	(Ghalem, 2013)
BST 55	33,6	250	30	6,7	6,2	4	25	34	(Jiang, 2011)
BST 55	48,1	250	30	7,7	7,6	4,9	22	39	(Jiang, 2011)
BST 40	0,71	4000	400	22,8	9	5	14	19	(Schuster, 2016)
BST 30	1	200	10	45,5	4,4	3,8	>14	>14	(Paolis, 2015)
BST 30	31	1000	20	31,7	10,8	7,8	3	4	Šis darbas
BST 30	30,6	2000	20	21,15	8,7	7,7	4	6	Šis darbas

čia „BST 70“ reiškia, kad bario strončio titanatas sudarytas iš 70 % strončio, o likę 30 % bario, logika visur ta pati.

Šiame darbe sumodeliuoti santykinai aukšto suderinamumo filtrai ir šis suderinamumas pasiekiamas naudojant santykinai žemą nustatymo įtampą. Toks suderinamumas pasiekiamas dėka didelio feroelektrinio padėklo storio ir paviršiaus ploto, pasižyminčio aukšta dielektrine skvarba. Tokio padėklo trūkumas – dideli signalo nuostoliai ir aukšta atspindžių amplitudė, tai matosi iš 4.1 lentelės.

4.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Pirmajame poskyryje atlikta sumodeliuotų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikų analizė. Jos metu pastebėta, kad, naudojant žemą nustatymo įtampą (iki 20 V), plonesnį feroelektrinį padėklą naudojantis filtras pasižymi geresniu centrinio dažnio suderinamumu (šiuo atveju suderinamumas skiriasi 3 kartus). Naudojant labai aukštą nustatymo įtampą (> 60 V), storesnį feroelektrinį padėklą naudojantis filtras pasižymi geresniu suderinamumu, nes, esant tokiai aukštai įtampai, plonasis feroelektrinis sluoksnis yra beveik įsisotinęs, todėl įtampos didinimas turi nedaug įtakos jo ε_r pokyčiui. Taip pat pastebėta, kad padėklo ε_r yra tiesiogiai sietina su signalo nuostoliais, todėl didinant feroelektriką veikiantį elektrinį lauką mažėja signalo nuostoliai.

Antrajame poskyryje palyginti šiame darbe sumodeliuoti filtrai su kitų autorių darbuose aprašytais feroelektriniais filtrais. Pastebėta, kad šiame darbe sumodeliuoti filtrai pasižymi aukštu suderinamumu, bet taip pat ir dideliais signalo nuostoliais.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Baigiamojo magistro darbo tikslas – ištirti mikrojuostelinių mikrobangų filtrų perdavimo ir atspindžio charakteristikas ir nustatyti šių filtrų centrinio dažnio valdymo galimybes. Siekiant šio tikslo buvo:

- Atlikta literatūros šaltinių apie mikrojuostelinius filtrus analizė. Iš jos pastebėta, kad dažniausiai tiriami galais sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (GSPBIR) ir briaunomis sujungtų pusės bangos ilgio rezonatorių (BSPBIR) konstrukcijų mikrojuosteliniai filtrai.
- Aptartos feroelektrinių medžiagų būsenos ir atlikta ϵ_r parametro priklausomybės nuo pasirinkto feroelektriko, jame esančių priemaišų koncentracijos, temperatūros ir feroelektrinio sluoksnio storio analizė.
- Pastebėta, kad ploni feroelektriniai sluoksniai (mikrometrų eilės) pasižymi labai silpna ϵ_r priklausomybe nuo temperatūros. Dėl šios savybės jų ϵ_r išlieka labai stabili plačiame temperatūrų diapazone, o tai leidžia nenaudoti temperatūros įtakos kompensavimo schemas, kas sumažina filtro matmenis, suvartojamą galią ir savikainą.
- Pastebėta, kad plonų feroelektrinių sluoksnių (mikrometrų eilės) centriniam dažniui nustatyti pakanka neaukštų įtampų (10–20 V). Dėl šios savybės tokie filtrai galėtų būti taikomi mobiliuosiuose įrenginiuose.
- Sukurtas algoritmas ir MATLAB terpėje parašyta programa dielektrinei skvarbai skaičiuoti pagal feroelektrinio sluoksnio storį ir feroelektriką veikiančio elektrinio lauko stiprį.
- Aptarta GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų matmenų skaičiavimo metodika.
- Sukurti algoritmai ir MATLAB kalba parašytos programos GSPBIR ir BSPBIR konstrukcijos mikrojuostelinių filtrų matmenų skaičiavimams automatizuoti.
- Modeliuojant GSPBIR konstrukcijos filtrą pastebėta, kad dėl šiems filtrams būdingos žemos nuoseklaus jungimo talpos, naudojant šią konstrukciją sunku sumodeliuoti žemo centrinio dažnio (šimtų megahercų) filtrus. Dėl šios priežasties šia konstrukcija buvo sumodeliuotas labai aukšto centrinio dažnio (311 GHz) filtras. Esant tokiam aukštam dažniui signalo nuostoliai siekė 145 dB, todėl tolimesni šio filtro tyrimai buvo nutraukti.
- Sumodeliuoti du BSPBIR konstrukcijos mikrojuosteliniai filtrai, naudojantys atitinkamai 1 μm ir 2 μm storio feroelektrinius padėklus. Po to buvo tiriamos šių filtrų centrinio dažnio nustatymo galimybės.

- Pastebėta, kad plonesnį feroelektrinį padėklą naudojantis filtras esant žemai centrinio dažnio nustatymo įtampai pasižymi didesniu suderinamumu, tačiau prie aukštų įtampų, storesnį padėklą naudojančio filtro suderinamumas yra nežymiai didesnis. Taip yra todėl, kad plonesnis feroelektrikas įsisotina esant žemesnei nustatymo įtampai.
- Pastebėta, kad storesnį feroelektrinį padėklą naudojančio filtro perdavimo nuostoliai yra truputį (maždaug 1 dB) mažesni.

LITERATŪRA

1. ABOMOSTAFA, H.; ELLAMEY, M. 2018. Studying the Mechanical Properties of Barium Strontium Titanate Ceramics by an Ultrasonic Pulse Echo Technique, *Journal of Ovonic Research* 14(4): 307–316.
2. CHASE, D.; CHEN, L.; YORK, R. 2005. Modeling the capacitive nonlinearity in thin-film BST varactors, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 53(10): 3215–3220.
3. CHEN, C.; ZHU, X.; ZHANG, D.; YAN, H. 2015. Effect of Ca substitution sites on dielectric properties and relaxor behavior of Ca doped barium strontium titanate ceramics, *Journal of Materials Science Materials in Electronics* 26(4): 2486–2492.
4. CISSE, F.; CASTEL, X.; SAULEAU, R.; BENZERGA, R.; DEPUTIER, S. 2018. A Twofold Approach in Loss Reduction of KTa_{0.5}Nb_{0.5}O₃ Ferroelectric Layers for Low-Loss Tunable Devices at Microwaves, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 65(4): 665–671.
5. CORREDORES, Y.; SIMON, Q.; BENZERGA, R.; CASTEL, X.; SAULEAU, R. 2014. Loss Reduction Technique in Ferroelectric Tunable Devices by Laser Microetching. Application to a CPW Stub Resonator in X-Band, *IEEE Transactions on Electron Devices* 61(12): 4166–4170.
6. CUNNINGHAM, G.; BLENKINSOP, P.; PALMER, J. 1989. Microstrip End-Coupled Filter Design at mm-Wave Frequencies, *1989 19th European Microwave Conference* :1210–1213.
7. Ferro [interaktyvus]. 2019. Ferro Corporation [žiūrėta 2019 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.ferro.com/-/media/files/resources/electronic-materials/ferro-electronic-materials-barium-strontium-titanate-powder-products.pdf>>
8. GHALEM, A.; PONCHEL, F.; REMIENS, D.; LASRI, T. 2013. A 3.8 GHz tunable filter based on ferroelectric interdigitated capacitors, *Joint IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectric and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM)*: 252–255.
9. GlobalSino [interaktyvus]. 2018. Yougui Liao [žiūrėta 2019 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.globalsino.com/EM/page2382.html>>
10. GUPTA, K.; SINGH, N.; KUMAR, A. 2015. Design and Analysis of End- Coupler, Half Wavelength Resonator Microstrip Line Band Pass Filter, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering* 3(7): 88–91.
11. HONG, J.; LANCASTER, M. 1976. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*: mokslinė literatūra. New York: John Wiley & Sons. 204–205 p.
12. HORNEBECQ, V.; HUBER, C.; MAGLIONE, M.; ANTONIETTI, M.; ELISSALDE, C. 2004. Dielectric Properties of Pure (BaSr)TiO₃ and Composites with Different Grain Sizes Ranging from the Nanometer to the Micrometer, *Advanced Functional Materials* 14(9): 899–904.
13. Huawei Technologies Co [interaktyvus]. 2017. 5G Spectrum Public Policy Position [žiūrėta 2019 m. gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf>

14. *Indian institute of science education and research Kolkata* [interaktyvus]. 2000. IISER Kolkata [žiūrėta 2019 m. balandžio 21 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.iiserkol.ac.in/~ph324/ExptManuals/DielectricConstant.pdf>>
15. JIANG, H.; LACROIX, B.; CHOI, K.; WANG, Y.; HUNT, A.; PAPAPOLYMEROU, J. 2011. Ka - and U-Band Tunable Bandpass Filters Using Ferroelectric Capacitors, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 59(12): 3068–3075.
16. JIMENEZ, R.; RINO, J.; EIRAS, J. 2015. Modeling ferroelectric permittivity dependence on electric field and estimation of the intrinsic and extrinsic contributions, *Journal of Physics D Applied Physics* 48(3): 1–6.
17. KAO, K. 2004. *Dielectric Phenomena in Solids*: mokslinė literatūra. Amsterdamas: Elsevier academic press 213–279 p.
18. KATHAIT, G.; ROHILLA, V.; THAPLIYAL, P.; BISWAS, D.; SINGH, S. 2017. Effect of Different Strontium Content on Dielectric Properties of Barium Strontium Titanate Ceramic, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science* 6(6): 75–78.
19. KHAN, Z.; HUILING, Z.; MEHDI, G.; MADNI, M. 2015. Design and measurement of cavity enclosed microstrip edge-coupled bandpass filter at Ku band, *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*: 1–4.
20. KUMAR, A.; NAITHANI, U.; SEMWAL B. 2002. Dielectric Behaviour of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ Perovskites, *Sri Lankan Journal of Physics* 3(2002): 63–73.
21. LINDO, A.; MATHEWS, A.; GOPIKRISHNA, M.; OSMAN, N. 2009. Parallel and end coupled microstrip band pass filters at W-band, *Asia Pacific Microwave Journal* 4(3): 345–348.
22. LIOU, J.; CHIOU, B. 1998. Dielectric tunability of barium strontium titanate/silicone-rubber composite, *Journal of Physics: Condensed Matter* 10(12): 2773–2786.
23. MEHDI, G.; ANYONG, H.; JUNGANG, M. 2012. Millimetre-wave all symmetric edge-coupled bandpass filter, *ISAPE2012*: 1271–1274.
24. MILLER, A. 2012. *Electronically Reconfigurable Wideband Microwave Filters* [interaktyvus]. Edinburgas: Heriot Watt Universitetas [žiūrėta 2019 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.849.4183&rep=rep1&type=pdf>>.
25. NATH, J. 2006. *Design and Characterization of Frequency Agile RF and Microwave Devices using Ferroelectrics* [interaktyvus]. Raleighas: North California State University [žiūrėta 2019 m. balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <<https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/4532>>.
26. PAOLIS, R.; PAYAN, S.; MAGLIONE, M.; GUEGAN, G.; COCCETTI, F. 2015. Ferroelectric MIM capacitors for compact high tunable filters, *2015 IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems* : 70–72.
27. QIN, W.; YANG, W.; CHEN, J.; LU, Q.; SHI, J.; XUE, Q. 2016. Comparisons of via-coupling and gap-coupling for end-coupled bandpass filters, *2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*: 253–255.

28. *RF cafe* [interaktyvus]. 2019. RF cafe [žiūrėta 2019 m. balandžio 27 d.]. Prieiga per internetą: <
<http://www.rfcafe.com/references/electrical/cheby-proto-values.htm>>
29. SCHUSTER, C.; WIENS, A.; SCHUBLER, M.; KOHLER, C.; BINDER, J.; JAKOBY, R. 2016. Hairpin bandpass filter with tunable center frequency and tunable bandwidth based on screen printed ferroelectric varactors, *2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*: 1425–1428.
30. SHARMA, G.; DUA, R. 2013. Half-wavelength parallel edge coupled filter simulation using matlab, *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering* 1(2): 1–6.
31. SINGH, I.; BHATT, P.; YADAV, A. 2015. Merits of Parallel Coupled Bandpass Filter over End Coupled Bandpass Filter in X Band, *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication* 3(5): 1–6.
32. *SkedSoft* [interaktyvus]. 2017. SkedSoft [žiūrėta 2019 m. gegužės 2 d.]. Prieiga per internetą: <
<https://www.skedsoft.com/books/physics-for-engineers-2/ferroelectricity>>
33. STEER, M.; PALMER, W. 2009. *Multifunctional Adaptive Microwave Circuits and Systems*: mokslinė literatūra. Kalifornija: Scitech Publishing. 1–44 p.
34. TIGGELMAN, M. P. J. 2009. *Thin Film Barium Strontium Titanate Capacitors for Tunable RF Front-end Applications*: mokslinė literatūra. Nyderlandai: Technical University of Eindhoven. 20–132 p.
35. VOSOOGH, A.; BRAZALEZ, A.; KILDAL, P. 2016. A V-Band Inverted Microstrip Gap Waveguide End-Coupled Bandpass Filter, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 26(4): 261–263.

PRIEDAI

A priedas. Skaityto pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma



XXII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Lukas Smičius

Vaizdų technologijų (T111), Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120), Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų (T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

ELEKTRIŠKAI DERINAMO MIKROBANGŲ FILTRO MODELIAVIMAS IR TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

dr. Tomyslav Sledevič

2019 m. kovo 15 d.
Vilnius

B priedas. Pranešimo XXII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRIŠKAI DERINAMO MIKROBANGŲ FILTRO (EDMF) PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

22-OJI JAUNŲJŲ MOKSLININKŲ KONFERENCIJA
„MOKSLAS – LIETUVOS ĄTĖITIS: ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA“

Lukas SMIČIUS, haroldas-lukas.smicius@stud.vgtu.lt

Vadovas: doc. dr. Darius PLONIS

Elektroninių sistemų katedra

Vilnius, 2019



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Lukas SMIČIUS

2019-03-15

Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika“

Turiny

- Įvadas
- Mikrojuosteliniai filtrai
- EDMF naudojami dažnio keitimo metodai
- Feroelektrinių medžiagų (FEM) dielektrinė skvarba
- Dielektrinės skvarbos skaičiavimas
- EDMF projektavimas
- Suprojektuoto filtro perdavimo charakteristika
- Rezultatų aptarimas

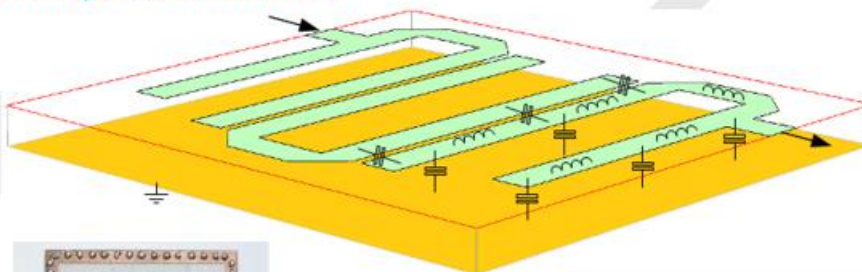
Įvadas

Darbo tikslas – suprojektuoti bei ištirti elektriškai derinamą mikrobangų filtrą (EDMF), kurio dažnio nustatymui naudojamas feroelektrinės medžiagos (FEM) padėklas.

Toks padėklas pasižymi dielektrinės skvarbos priklausomybe nuo jį veikiančio elektrinio lauko bei temperatūros, taigi keisdami šiuos parametrus galime keisti filtro pralaidumo juostos dažnį.

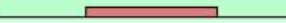
3 14

Mikrojuosteliniai filtrai



Nuotrauka prieinama
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4813713>

Viršutinis dielektrinis sluoksnis

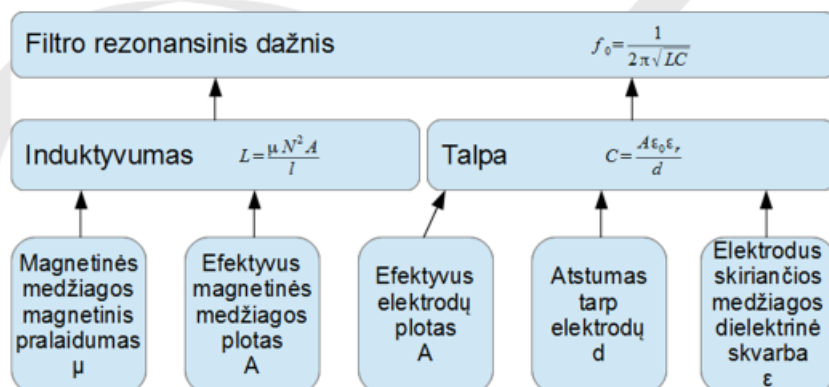


Apatinis dielektrinis sluoksnis



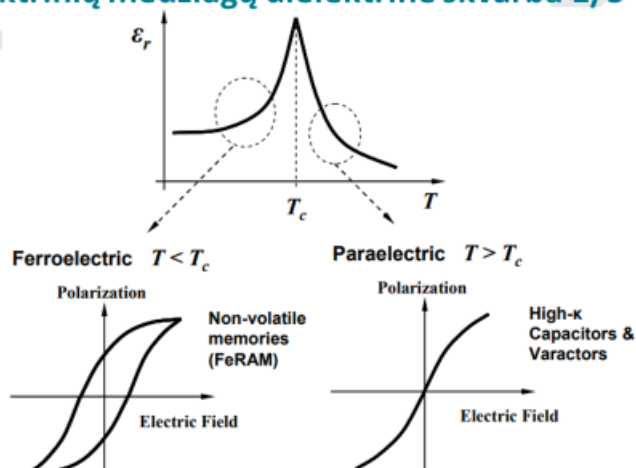
4 14

EDMF naudojami dažnio keitimo metodai



5 14

Feroelektrinių medžiagų dielektrinė skvarba 1/3

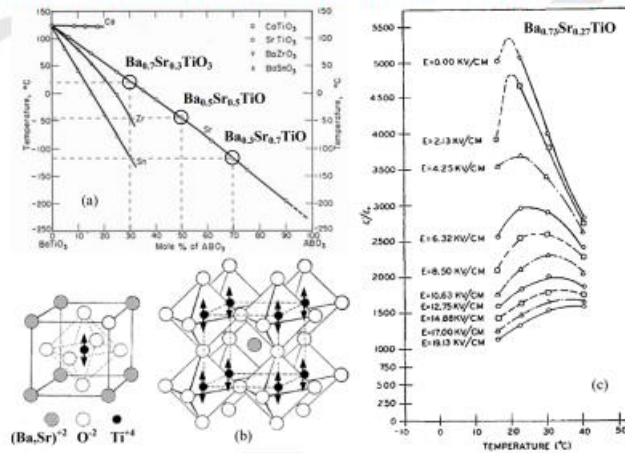


Paveikslas prieinamas

<http://my.ece.ucsb.edu/York/Yorklab/Publications/BioBib/218%20-%20Chap%20Tunable%20Dielectrics.pdf>

6 14

Feroelektrinių medžiagų dielektrinė skvarba 2/3

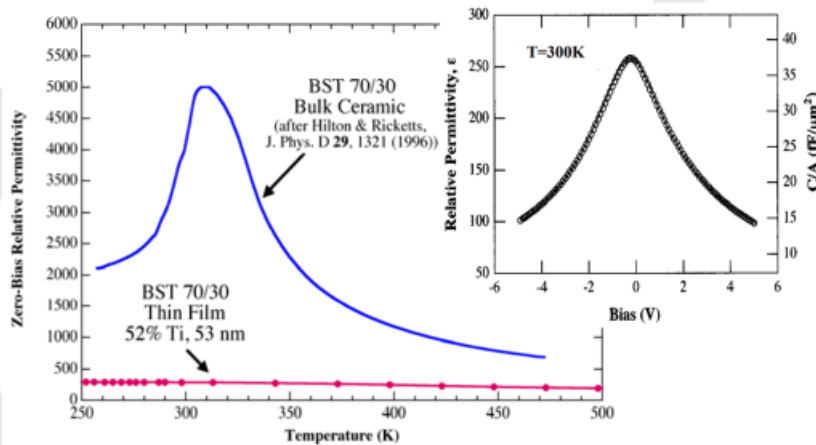


Paveikslas prieinamas

<http://my.ece.ucsb.edu/York/Yorklab/Publications/BioBib/218%20-%20Chap%20Tunable%20Dielectrics.pdf>

7 14

Feroelektrinių medžiagų dielektrinė skvarba 3/3

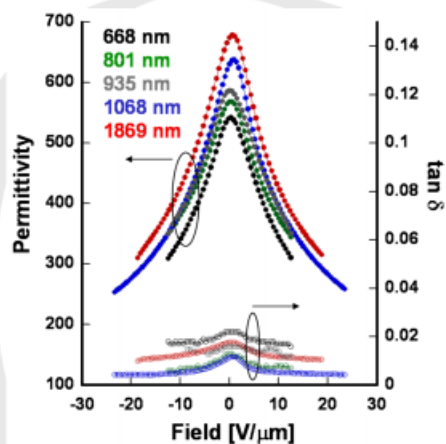


Paveikslas prieinamas

<http://my.ece.ucsb.edu/York/Yorklab/Publications/BioBib/218%20-%20Chap%20Tunable%20Dielectrics.pdf>

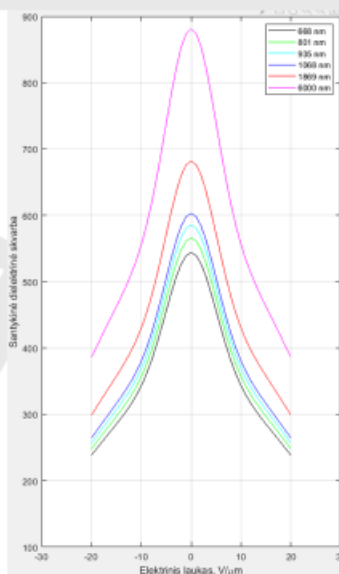
8 14

Dielektrinės skvarbos skaičiavimas



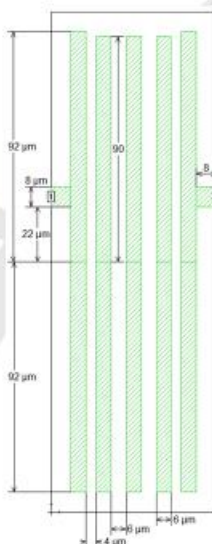
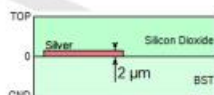
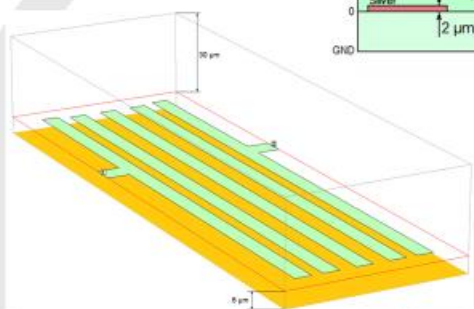
Paveikslas prieinamas

<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a509697.pdf>



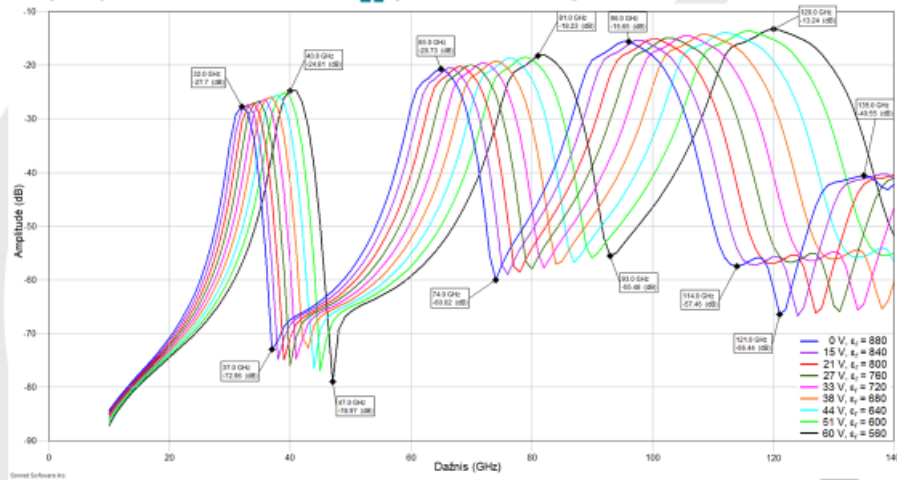
9 14

EDMF projektavimas



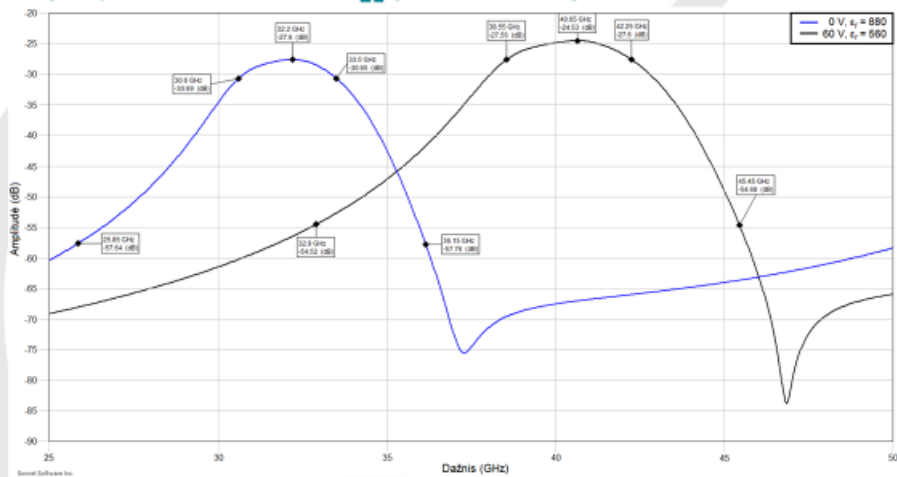
10 14

Suprojektuoto EDMF S_{21} parametro grafikas 1/2



11 14

Suprojektuoto EDMF S_{21} parametro grafikas 2/2



12 14



Darbo rezultatai

- Analizuojant literatūrą apie EDMF, kurių derinimui naudojamas feroelektrinės medžiagos (FEM) padėklas pastebėjome, kad FEM dielektrinė skvarba priklauso nuo medžiagos storio, ją veikiančio elektrinio lauko ir nežymiai nuo temperatūros. Remiantis analizuotuose tyrimuose gautomis filtrų dielektrinės skvarbos priklausomybėmis sudarėme matematinę lygtį FEM dielektrinei skvarba skaičiuoti ir aprašėme ją MATLAB aplinkoje.
- SONNET simulatoriumi sumodeliavome mikrojuostelinį filtrą ant FEM padėklo ir keisdami padėklo dielektrinę skvarbą ištyrėme filtro dažnines charakteristikas.

13 14



Ačiū už dėmesį

14 14