UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
NOVI SAD

Slobodan Birgermajer

NOVE KONFIGURACIJE MIKROTALASNIH PASIVNIH KOLA U TEHNOLOGIJI MIKROSTRIP GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2018.

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА**

21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, **РБР**:	
Идентификациони број, **ИБР**:	
Тип документације, **ТД**:	Монографска документација
Тип записа, **ТЗ**:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, **ВР**:	Докторска дисертација
Аутор, **АУ**:	Слободан Биргермајер, истраживач сарадник
Ментор, **МН**:	Проф. др Горан Стојановић, редовни професор
Наслов рада, **НР**:	*Нове конфигурације микроталасних пасивних кола у технологији микрострип гребенастог таласовода на бази процепа*
Језик публикације, **ЈП**:	Српски
Језик извода, **ЈИ**:	Српски/Енглески
Земља публиковања, **ЗП**:	Србија
Уже географско подручје, **УГП**:	Аутономна покрајина Војводина
Година, **ГО**:	2018
Издавач, **ИЗ**:	Ауторски репринт
Место и адреса, **МА**:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, **ФО**: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9 поглавља/168 страна/98 цитата/10 табела/176 слика
Научна област, **НО**:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, **НД**:	Електроника
Предметна одредница/Кључне речи, **ПО**:	РФ и микроталаси, таласоводи на бази процепа, микрострип, *bandgap*
УДК	Монографска документација
Чува се, **ЧУ**:	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Важна напомена, **ВН**:	

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА**

21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Извод, **ИЗ**:		Убрзан развој бежичних комуникационих система поставља захтев за развојем нових компактних кола високих перформанси, на високим учестаностима у микроталасном и милиметарском опсегу, која ће задовољити потребу за већим брзинама за пренос велике количине података. У оквиру ове дисертације су представљена пасивна кола пројектована у технологији микрострип таласовода на бази процепа, која могу да задовоље захтеве постављене од комуникационих система. Представљено је шест филтарских топологија и један спрежник. Прве четири филтарске топологије засноване су на новим минијатурним резонантним шупљинама у технологији микрострип гребенастог таласовода на бази процепа. Филтри су пројектовани на централним учестаностима у околини 13,5 GHz и показали су одличне перформансе у поређењу са филтрима представљеним у литератури. Друге две филтарске топологије засноване су на дуал-мод резонаторима пројектованим за рад на милиметарском опсегу учестаности. Предложеним резонаторима пројектован је филтар са једним и са два пола, на учестаностима већим од 30 GHz, реализован у технологији микрострип гребенастог таласовода на бази процепа. Све филтарске топологије су фабриковане у стандардној технологији штампаних плоча. Такође, у дисертацији је предложен дирекциони спрежник са 0-dB одлазним таласом реализован у технологији микрострип гребенастог таласовода на бази процепа. Спрежник се одликује добрим особинама и поставио је основе за даља истраживања.	
Датум прихватања теме, **ДП**:			
Датум одбране, **ДО**:			
Чланови комисије, **КО**:	Председник:	Проф. др Вера В. Марковић	
	Члан:	Др Јелена Радић	
	Члан:	Др Наташа Самарџић	Потпис ментора
	Члан:	Др Југослав Јоковић	
	Члан, ментор:	Проф. др Горан Стојановић	

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА**

21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Accession number, **ANO**:	
Identification number, **INO**:	
Document type, **DT**:	Monograph documentation
Type of record, **TR**:	Textual printed material
Contents code, **CC**:	PhD thesis
Author, **AU**:	Slobodan Birgermajer, Research Associate
Mentor, **MN**:	Dr Goran Stojanović, Full Professor
Title, **TI**:	Novel configurations of microwave passive circuits in microstrip-ridge gap waveguide technology
Language of text, **LT**:	Serbian
Language of abstract, **LA**:	Serbian
Country of publication, **CP**:	Serbia
Locality of publication, **LP**:	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, **PY**:	2018
Publisher, **PB**:	Author reprint
Publication place, **PP**:	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, **PD**:	9 chapters/168 pages/98 references/10 tables/176 figures
Scientific field, **SF**:	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, **SD**:	Electronics
Subject/Key words, **S/KW**:	RF and microwave, gap waveguides, microstrip, bandgap
UC	
Holding data, **HD**:	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, **N**:	
Abstract, **A**:	The rapid changes in wireless communications systems establish the need for devices that operate at high frequencies in microwave and mm-wave region, provide higher performances and utilize higher frequency bands to deliver higher data rates. Within this thesis six bandpass filters have been developed and one forward-wave 0dB coupler has been designed. Firstly, bandpass filters have been designed based on novel cavity resonators with mushroom inclusions in microstrip-ridge gap waveguide technology (MS-RGW). Filters have been designed to operate at the frequencies around 13.5 GHz and have shown excellent performances. Next two bandpass filters have been designed to operate at frequencies above 30 GHz, based on dual-mode resonators designed in MS-RGW technology. The filters have been designed with two and four poles. All filter topologies have been fabricated in standard circuit board technology (PCB). Also, forward-wave 0-dB directional coupler has been designed with good performances.
Accepted by the Scientific Board on, **ASB**:	
Defended on, **DE**:	

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА**

21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Defended Board, **DB**:	President:	Vera V. Marković, PhD	
	Member:	Jelena Radić, PhD	
	Member:	Nataša Samardžić, PhD	Mentor's sign
	Member:	Jugoslav Joković, PhD	
	Member, Mentor:	Goran Stojanović, PhD	

Sadržaj

Glava 1. Uvod 1

Glava 2. Teorijske osnove tehnologije talasovoda na bazi procepa 5

2.1 Istorijat talasovoda na bazi procepa 6
2.1.1 Koncept talasovoda na bazi procepa 9

2.2 Realizacija i vrste talasovoda na bazi procepa 11
2.3 Analiza i projektovanje talasovoda na bazi procepa 16
2.3.1 Princip projektovanja osnovnih gradivnih elemenata 16

2.3.2 Analiza disperzione karakteristike kvazi-TEM moda kod grebenastih talasovoda na bazi procepa 19

2.3.3 Karakteristična impedansa grebenastog talasovoda na bazi procepa 25

2.3.4 Uticaj geometrijskih parametara jedinične ćelije na modove disp. dijagrama 27

2.4 Zaključak 33

Glava 3. Realizacije kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 34

3.1 Grebenasti talasovod na bazi procepa i talasovod na bazi procepa sa kanalom 35
3.2 Pobuda kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 40
3.2.1 Linijske tranzicije 41

3.2.2 Vertikalne tranzicije 52

3.2.3 Tranzicije zasnovane na spregama kroz otvore 63

3.3 Filtri u talasovodima na bazi procepa 71
3.3.1 Filtri realizovani u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa 72

3.3.2 Filtri realizovani u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom 76

3.3.3 Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 88

3.4 Realizacije sprežnika i delitelja snage u talasovodima na bazi procepa 94
3.5 Zaključak 103

Glava 4. Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa 105

4.1 Osnovni gradivni elementi mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 106
4.1.1 Projektovanje jedinične ćelije 106

4.1.2 Projektovanje super ćelije talasovoda 108

4.2 Projektovanje vertikalne koaksijalne tranzicije 110
4.3 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 111
4.4 Fabrikacija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i rezultati merenja 113
4.5 Zaključak 115

Glava 5. Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa zasnovani na modifikacijama uzemljenih peč rezonatora 116
5.1 Projektovanje super ćelije rezonatora 117
5.1.1 Poređenje rezonatora realizovanih u tehnologijama mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, mikrostrip voda i talasovoda integrisanim u podlogu (SIW) 119
5.2 Projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 121
5.2.1 Filtra prvog reda propusnika opsega 121
5.2.2 Filtar propusnik opsega drugog reda sa direktno spregnutim rezonatorima 122
5.2.3 Filtra propusnik opsega četvrtog reda sa direktno spregnutim rezonatorima 124
5.2.4 Filtra petog reda propusnik opsega sa unakrsno spregnutim rezonatorima 126
5.3 Fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara 128
5.4 Poređenje sa drugim filtrima fabrikovanim u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 131
5.5 Zaključak 133
Glava 6. Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti 135
6.1 Projektovanje gradivnih elemenata 137
6.1.1 Projektovanje super ćelije dual-mod rezonatora 138
6.2 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti 141
6.2.1 Fabrikacija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i rezultati merenja 142
6.3 Projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti 144
6.3.1 Filtar propusnik opsega učestanosti sa dva pola 145
6.3.2 Filtar propusnik opsega učestanosti sa četiri pola 147
6.4 Fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara 149
6.5 Zaključak 152
Glava 7. Direkcioni sprežnik sa 0-dB odlaznim talasom realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 153
7.1 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 154
7.2 Projektovanje sprežnika u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 156
7.3 Zaključak 159
8. Zaključak doktorske disertacije 160
9. Literatura 163

Spisak slika

Slika 2.1 Površine sa ispupčenjima: a) meke površine, b) tvrde površine 7
Slika 2.2 Ilustracija PEC/PMC površine 8
Slika 2.3 Konvencionalni talasovod sa izmenjenom donjom stranicom u PEC/PMC površinu, [8] 9
Slika 2.4 Teorijski koncept talasovoda na bazi procepa: a) formiranje oblasti odsecanja, b) PEC linija implementirana u oblast odsecanja 10
Slika 2.5 Izgled linearno polarizovanog tvrdog talasovoda, [11] 10
Slika 2.6 Izgled idealnog talasovoda unutar procepa, [11] 10
Slika 2.7 Poređenje talasovoda na bazi procepa sa invertovanim mikrostrip vodom: (a) idealni talasovod na bazi procepa, (b) invertovani mikrostrip vod, [12] 11
Slika 2.8 PMC periodične strukture (pogled od gore i sa strane): (a) sa provodnim stubićima, (b) sa uzemljenim peč rezonatorima 12
Slika 2.9 Ilustracije poprečnih preseka tri osnovna talasovoda na bazi procepa: (a) grebenasti talasovod, (b) talasovod sa kanalom, i (c) mikrostrip grebenasti talasovod 13
Slika 2.10 Primer grebenastog talasovoda na bazi procepa, [20] 14
Slika 2.11 Talasovodi na bazi procepa sa kanalom: a) vertikalno polarizovan, b) horizontalno polarizovan, [19] 14
Slika 2.12 Primer talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [21] 15
Slika 2.13 Primer mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [22] 15
Slika 2.14 Ilustracija grebenastog talasovod na bazi procepa sa gradivnim elementima, jediničnom ćelijom i super ćelijom talasovoda 17
Slika 2.15 Disperzioni dijagrami mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) jedinične ćelije, b) super ćelije talasovoda 18
Slika 2.16 Geometrija metalnih stubića: a) pogled iz perspektive, b) pogled odozgo, [15] 19
Slika 2.17 Metalni stubići nadkriveni provodnom pločom PEC: a) ilustracija, b) ekvivalentno redno rezonantno kolo disperzione jednačine metalnih stubića, [15] 21
Slika 2.18 Numeričko rešenje izraza (2.16) puna linija i (2.17) isprekidana linija, [15] 22
Slika 2.19 Disperzioni dijagram jedinične ćelije metalnih stubića sa slike 2.17, [15] 23
Slika 2.20 Grebenasti talasovod na bazi procepa: a) super ćelija sa definisanim graničnim uslovima, b) disperzioni dijagram sa upoređenim rezultatima numeričke analize i simulacija, [15] 24
Slika 2.21 Normalizovane amplitude E_y i H_x komponenti polja, za vrednosti dobijene numeričkom analizom i softverskim alatom, [15] 25
Slika 2.22 Konfiguracija striplajn voda, [20] 26
Slika 2.23 Poređenje karakterističnih impedansi idealnog i realnog grebenastog talasovoda, [20] 27
Slika 2.24 PMC površina sa metalnim stubićima u kvadratnoj rešetki, [18] 28

Slika 2.25 Granične učestanosti zabranjene zone u funkciji visine vazdušnog procepa, *h*, i različitih dimenzija perioda, p: a) donja učestanost, b) gornja učestanost, [18] 29
Slika 2.26 Trougaona rešetka: a) izgled rasporeda metalnih stubića, b) poređenje gornje i donje granične učestanosti sa kvadratnom rešetkom, [18] 30
Slika 2.27 Struktura sa uzemljenim peč rezonatorima sa kritičnim dimenzijama, [18] 30
Slika 2.28 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite prečnike vije *r* u funkciji visine procepa *h,* [18] 31
Slika 2.29 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite debljine podloge *d* u funkciji visine procepa *h,* [18] 31
Slika 2.30 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite pozicije vije ispod peč rezonatora: a) tri različit pozicije, b) poređenje gornje i donje granične učestanosti za različite pozicije vije u funkciji visine procepa *h,* [18] 32
Slika 2.31 Poređenje graničnih učestanosti zabranjene zone za različite visine procepa, *h*: a) strukture sa stubićima, b) strukture sa uzemljenim peč rezonatorima, [30] 32
Slika 3.1 Pogledi sa strane talasovoda na bazi procepa sa: a) grebenom, b) kanalom 36
Slika 3.2 Disperzioni dijagram super ćelija: a) grebenasti talasovod na bazi procepa, [20], b) talasovod na bazi procepa sa kanalom, [19] 36
Slika 3.3 Vertikalne komponente električnog polja normalnog na pravac prostiranja talasa kod talasovoda na bazi procepa: a) sa grebenom, [20], b) sa kanalom, [19] 38
Slika 3.4 Realizacija jednostavne linijske tranzicije sa SMA konektora na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, prikazan bez gornje provodne ploče, [22] 41
Slika 3.5 Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa slike 3.4, [22] 42
Slika 3.6 Raspodela električnog polja: a) mikrostrip voda, b) grebenastog talasovod na bazi procepa, [35] 43
Slika 3.7 Primer linijske tranzicije sa mikrostrip voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, [35] 43
Slika 3.8 Primer linijske tranzicije: a) izmereni *S* parametri, b) fabrikovan grebenasti talasovod na bazi procepa sa predloženom tranzicijom. [35] 44
Slika 3.9 Tranzicija sa mikrostrip voda na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) prikaz različitih nivoa tranzicije, b) pogled odozgo na mikrostrip grebenasti talasovod i na sužene sekcije tranzicije, [37] 45
Slika 3.10 Simulirani *S* parametri tranzicije sa mikrostrip voda na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procep, [37] 45
Slika 3.11 Model linijske tranzicije realizovan kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [38] 46

Slika 3.12 Simulirani *S* parametri linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [38] 47
Slika 3.13 Model linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, namenjena za korišćenje na milimetarskim učestanostima, [40] 48
Slika 3.14 Simulirani *S* parametri linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [40] 48
Slika 3.15 Ilustracija linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između koplanarnog talasovoda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [44] 49
Slika 3.16 *S* parametri dobijeni simulacijama tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između koplanarnog talasovoda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [44] 50
Slika 3.17 Modifikacija tranzicije dodavanjem nove PMC strukture ispod dielektrične podloge koplanarnog talasovoda, [44] 50
Slika 3.18 Simulirani *S* parametri dobijeni modifikacijom tranzicije dodavanjem nove PMC strukture ispod dielektrične podloge koplanarnog talasovoda, [44] 51
Slika 3.19 Ilustracija tranzicije sa koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, [20] .. 52
Slika 3.20 Realizovani grebenasti talasovod sa koaksijalnom vertikalnom tranzicijom: a) ilustracija, [47], b) realizovani prototip, [20] 53
Slika 3.21 Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara za grebenasti talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa koaksijalnog voda (SMA konektora), [20] 53
Slika 3.22 Ilustracija tranzicije sa koaksijalnog voda na pravolinijski grebenasti talasovod, [48] 54
Slika 3.23 Simulirani *S* parametri tranzicije sa koaksijalnog voda na pravolinijski grebenasti talasovod, [48] 54
Slika 3.24 Modifikacije tranzicija sa koaksijalnog voda na grebenasti talasovod: a) sa otvorenom vezom, b) sa kratkim spojem, [49] 55
Slika 3.25 Poređenje simuliranih rezultata *S* parametara grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa grebenima realizovanim kao otvoren i kratko spojen vod, [49] 55
Slika 3.26 Geometrija tranzicije koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, gde je SMA konektor postavljen sa donje strane talasovoda, [50] 57
Slika 3.27 Simulirani *S* parametri tranzicije koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa sa SMA konektorom postavljenim sa donje strane talasovoda, [50] 57
Slika 3.28 Ilustracija tranzicije sa talasovoda WR-28 na grebenasti talasovod, [51] 58
Slika 3.29 Poređenje simuliranih S_{11} parametara koaksijalne tranzicije sa 2.92 mm konektorom i predložene tranzicije iz [51] 58
Slika 3.30 Modifikacija tranzicije iz [51] 59

Slika 3.31 Poređenje simuliranih S_{11} parametara koaksijalne tranzicije na grebenasti talasovod na bazi procepa sa 2.92 mm konektorom, ne modifikovanom tranzicijom i modifikovanom tranzicijom, [51] 59
Slika 3.32 Talasovodni port iskorišćen za pobudu grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) ilustracija, b) simulirani *S* parametri, [49] 60
Slika 3.33 Predložena dvostruka tranzicija zasnovana na ideji talasovodnog porta: a) poprečni presek, b) pogled duž talasovoda, [49] 61
Slika 3.34 Model tranzicije u par perspektiva, [49] 61
Slika 3.35 Tranzicija iz dva dela: a) poređenje simuliranih i izmerenih rezultata *S* parametara, b) fabrikovana tranzicija spojena na krajeve grebenastog talasovoda, [49] 61
Slika 3.36 Ilustracija tranzicije na grebenasti talasovod na bazi procepa kroz defektni slot u uzemljenom sloju mikrostrip voda: a) model tranzicije, b) prikaz modifikovanih sekcija grebena, [57] 63
Slika 3.37 Mikrostrip vod: a) T vod, b) defektni slot unutar uzemljenog sloja, [57] 64
Slika 3.38 Tranzicija na grebenasti talasovod na bazi procepa kroz defektni slot u uzemljenom sloju mikrostrip voda: a) izmereni *S* parametri, b) fabrikovano kolo, [57] 64
Slika 3.39 Tranzicija sa mikrostrip voda putem defektnog H slota na grebenasti talasovod na bazi procepa, [58] 65
Slika 3.40 Simulirani *S* parametri tranzicije sa mikrostrip voda putem defektnog H slota na grebenasti talasovod na bazi procepa, [58] 65
Slika 3.41 Ilustracija tranzicije primenjena u mikrofluidičnom senzorskom kolu: a) pogled na nivoe tranzicije, b) tranzicija sa koplanarnog talasovoda na mikrostrip vod, [59] 66
Slika 3.42 Simulirani *S* parametri tranzicije primenjene u mikrofluidičnom senzorskom kolu, [59] ... 66
Slika 3.43 Tranzicija sa WR-15 na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) poprečni presek, b) otvor u donjem provodnom sloju mikrostrip grebenastog talasovoda, [31] 67
Slika 3.44 Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa WR-15 talasovodom: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikovano kolo, [31] 67
Slika 3.45 Invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa, [60] 68
Slika 3.46 Ilustracija tranzicije WR-15 talasovoda na invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa: a) pogled na nivoe tranzicije, b) poprečni presek, [60] 68
Slika 3.47 Invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa WR-15: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, b) fabrikovano kolo, [60] 69
Slika 3.48 Ilustracija super ćelije rezonatora kod koje je metalni stubić zamenjen stubićem od dielektričnog materijala, [61] 72
Slika 3.49 Promena rezonantne učestanosti super ćelije rezonatora sa stubićem od dielektričnog materijala: a) promenom permitivnosti, b) promenom dimenzije *w*, [61] 72
Slika 3.50 Ilustracija super ćelije rezonatora realizovanog kao sekcija grebena dužine $\lambda/2$, [62] 73

Slika 3.51 Filtar trećeg reda realizovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani rezultati, b) ilustracija geometrije predloženog filtra sa kritičnim geometrijskim parametrima, [62] 73
Slika 3.52 Super ćelija predloženog rezonatora sa grebenom dužine $\lambda/2$: a) pogled odozgo, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra L_{res}, [64] 74
Slika 3.53 Ilustracija filtra propusnika opsega trećeg reda realizovanog u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa, dobijen slaganjem rezonatora jedan na drugi, [64] 74
Slika 3.54 Filtar propusnik opsega trećeg reda realizovan slaganjem rezonatora sa grebenom jedan na drugi: a) poređenje simuliranih i izmerenih S_{21} parametara, b) poređenje simuliranih i izmerenih S_{11} parametara, b) fabrikacija, [64] 75
Slika 3.55 Super ćelija rezonantne šupljine: a) pogled odozgo bez gornje provodne ploče, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra *w*, [48] 76
Slika 3.56 Ilustracija filtra četvrtog reda realizovan pomoću rezonantnih šupljina talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [48] 77
Slika 3.57 Filtar četvrtog reda realizovan pomoću rezonantnih šupljina talasovoda na bazi procepa sa kanalom: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, b) fabrikacija u aluminijumu pomoću CNC tehnologije, [48] 77
Slika 3.58 Super ćelija rezonantne šupljine: a) pogled odozgo, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra L_{res}, [64] 78
Slika 3.59 Ilustracija filtra propusnika opsega trećeg reda realizovanog u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom, dobijen slaganjem rezonantnih šupljina jedana na drugu, [64] 78
Slika 3.60 Filtar propusnik opsega trećeg reda realizovan u tehnologiji talasovod na bazi procepa, slaganjem rezonantnih šupljina jedna na drugu: a) poređenje simuliranih i izmerenih S_{21} parametara, b) poređenje simuliranih i izmerenih S_{11} parametara, b) fabrikacija, [64] 79
Slika 3.61 Super ćelija rezonantna šupljina sa velikim faktorom dobrote: a) pogled iz perspektive sa gornjim provodnim slojem, b) pogled odozgo, nije prikazan gornji provodni sloj, [65] 79
Slika 3.62 Rezonantne šupljine sa veliki *Q* faktorom, spregnute preko dva reda metalnih stubića, gde parametar s služi za podešavanje sprege, [65] 80
Slika 3.63 Ilustracija filtara dobijenih spregom rezonantnih šupljina: a) filtar trećeg reda, b) filtar petog reda, [65] 80
Slika 3.64 Filtar propusnik opsega trećeg i petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina kroz dva reda metalnih stubića.: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara za filtar trećeg reda, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara za filtar petog reda, c) fabrikacija gornje provodne površine, d) fabrikacija koja sadrži rezonantne šupljine, [65] 81
Slika 3.65 Super ćelija rezonantne šupljine, [67] 82
Slika 3.66 Sprega između dve rezonantne šupljine korišćenjem induktivnog otvora širine *w*, [67] 82

Slika 3.67 Filtar propusnik opsega petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem induktivnih otvora: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [67] 83
Slika 3.68 Filtar propusnik opsega četvrtog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem induktivnih otvora: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [68] 83
Slika 3.69 Ilustracija filtra petog reda projektovanog korišćenjem otvora u metalnim zidovima koji razdvajaju rezonantne šupljine, [69] 84
Slika 3.70 Filtra propusnik opsega petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem otvora u metalnim zidovima: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [69] 84
Slika 3.71 Tranzicija sa talasovoda WR-62 na talasovod na bazi procepa sa kanalom, [70] 85
Slika 3.72 Model filtra četvrtog reda realizovanog pomoću induktivnih otvora: a) pogled iz perspektive, b) pogled odozgo bez gornjeg provodnog sloja, [70] 85
Slika 3.73 Filtra propusnik opsega četvrtog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina: 85
a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [70] 85
Slika 3.74 Model predložene rezonantne šupljine u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [71] 86
Slika 3.75 Model filtra petog reda projektovan u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [71] 86
Slika 3.76 Simulirani *S* parametri filtra petog reda projektovanog u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [71] 87
Slika 3.77 Filtra propusnik opsega petog reda realizovan krajevima spregnutim $\lambda/2$ rezonatorima u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [72] 89
Slika 3.78 Projektovane sekcije tripleta filtra: a) prvi triplet sa transmisionom nulom sa leve strane propusnog opsega, b) simulirani *S* parametri prvog triplet filtra, c) drugi triplet sa transmisionom nulom sa desne strane propusnog opsega, d) simulirani *S* parametri drugog triplet filtra, [72] 89
Slika 3.79 Model projektovanog filtra u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [73] 90
Slika 3.80 Filtra propusnik opsega četvrtog reda realizovan krajevima spregnutim $\lambda/2$ rezonatorima u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [73] 90
Slika 3.81 Model kvadruplet filtra: a) različiti slojevi, b) sloj sa projektovanim rezonatorima, [74] ... 91
Slika 3.82 Kvadruplet filtar četvrtog reda: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametra, b) realizacija filtra po slojevima, [74] 92

Slika 3.83 Kvadratni sprežnik realizovan u grebenastom talasovodu na bazi procepa: a) model, b) raspodela električnog polja, [77] 94
Slika 3.84 Kvadratni sprežnik realizovan u grebenastom talasovodu na bazi procepa: a) simulirani i izmereni *S* parametri, b) izgled fabrikovanog kola, [77] 94
Slika 3.85 Direkcioni sprežnik projektovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani *S* parametri, b) model sprežnika, c) raspodela električnog polja, [77]..... 95
Slika 3.86 Hibridni sprežnik realizovan u tehnologiji talasovoda na bazi procep sa kanalom: a) simulirani i izmereni i parametri, b) fabrikacija, [78]..... 96
Slika 3.87 Model hibridnog 3-dB sprežnika, [79]..... 96
Slika 3.88 Hibridni 3-dB sprežnik: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, b) realizacija sprežnika sa tranzicijama i podešenim opterećenjem, [79]..... 97
Slika 3.89 Ilustracija sprežnika sa zakrivljenim otvorima,: a) cela struktura, b) deo strukture sa prikazanom zajedničkom provodnom pločom i zamenljivom sprežnom pločom, [80]..... 98
Slika 3.90 Sprežnika sa zakrivljenim otvorima: a) izmereni *S* parametri, b) fotografija fabrikacije, [80]..... 98
Slika 3.91 Ilustracija 3-dB 90˚ hibridnog sprežnika realizovanog u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [81]..... 99
Slika 3.92 3-dB 90˚ hibridni sprežnik realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda: a) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, b) fabrikacija, c) odziv faze na izlazu, [81] 100
Slika 3.93 Predložen delitelja snage: a) ilustracija strukture, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, [83] 101
Slika 4.1 Model jedinične ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa geometrijskim parametrima i definisanim graničnim uslovima..... 107
Slika 4.2 Disperzioni dijagram jedinične ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, za optimizovane geometrijske parametre: a = 3,5 mm, p = 3,75 mm, d = 0,6 mm i h = 0,5 mm..... 107
Slika 4.3 Model super ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa geometrijskim parametrima i definisanim graničnim uslovima..... 108
Slika 4.4 Disperzioni dijagram super ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procep, za optimizovane geometrijske parametre: w_r = 3,5 mm, p = 3,75 mm, h = 0,5 mm i $g = g_r$ = 0,25 mm 109
Slika 4.5 Normalna komponenta električnog polja moda prostiranja mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa na učestanosti od 11,6 GHz..... 109
Slika 4.6 Poprečni presek predložene vertikalne koaksijalne tranzicije, [84]..... 110
Slika 4.7 Mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek A-A’ 111

Slika 4.8 Rezultati *S* parametra simulacije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa predloženom tranzicijom, [84] 112
Slika 4.9 Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) fabrikovano kolo, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) sastavljeno kolo sa najlonskim vijcima i SMA konektorima (pogled sa leva na desno: donji deo kola i gornji deo kola), [84] 113
Slika 4.10 Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [84] 114
Slika 5.1 Super ćelija rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa; pogled od gore bez gornje PEC površine, [84] 117
Slika 5.2 Disperzioni dijagram super ćelije rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procep za rezonantni mod na 13,5 GHz, dobijen za dimenzije geometrijskog parametra a_r = 1,5 mm 118
Slika 5.3 Raspodela električnog polja rezonantnog moda super ćelije rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, na učestanosti od 13,5 GHz 118
Slika 5.4 Zavisnost rezonantne učestanosti od promene parametra a_r 119
Slika 5.5 Topologije peč rezonatora realizovanih u tehnologijama: a) mikrostrip, b) talasovoda integrisanih u podlogu, c) mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 120
Slika 5.6 Filtar prvog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani *S* parametri, [84] 122
Slika 5.7 Filtar drugog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani *S* parametri, [84] 123
Slika 5.8 Krive za projektovanje filtra drugog reda: a) koeficijent sprege K, b) spoljašnji faktor dobrote Q_e, [84] 124
Slika 5.9 Filtar četvrtog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani *S* parametri, [84] 125
Slika 5.10 Filtar petog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani *S* parametri, [84] 127
Slika 5.11 Filtar prvog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, [84] 128
Slika 5.12 Filtar drugog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, [84] 129

Slika 5.13 Filtar četvrtog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, [84] 130
Slika 5.14 Filtar petog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, [84] 130
Slika 6.1 Jedinična ćelija i super ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa kritičnim geometrijskim parametrima 137
Slika 6.2 Disperzioni dijagrami osnovnih gradivnih elemenata za optimizovane vrednosti geometrijskih parametara: a) jedinične ćelije, b) super ćelije talasovoda 137
Slika 6.3 Super ćelija predloženog dual-mod rezonatora, [92] 138
Slika 6.4 Disperzioni dijagram super ćelije dual-mod rezonatora, [92] 139
Slika 6.5 Raspodela električnog polja super ćelija dual-mod rezonatora: a) degenerativni mod TM_{10}, b) degenerativni mod TM_{01}, c) mod višeg reda TM_{11}, [92] 139
Slika 6.6 Raspodela električnog polja osnovnog moda u poprečnom preseku dual-mod rezonatora, [92] 140
Slika 6.7 Zavisnost rezonantne učestanosti degenerativnih modova od geometrijskog parametra a_r, [92] 140
Slika 6.8 Projektovani mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek, [92] 141
Slika 6.9 Simulirani i parametri projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu, [92] 142
Slika 6.10 Fabrikovani mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na sastavljeni talasovod sa donje strane sa 2.92 konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92] 143
Slika 6.11 Poređenje simuliranih i izmerenih odziva *S* parametra mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92] 143
Slika 6.12 Princip ostvarivanja perturbacije kod predloženog dual-mod rezonatora 144
Slika 6.13 Promena rezonantne učestanosti degenerativnih modova u funkciji geometrijskog parametra d_v 145
Slika 6.14 Projektovani filtar sa dva pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92] 146
Slika 6.15 Rezultati *S* parametra simulacija projektovanog filtra sa dva pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92] 146
Slika 6.16 Projektovani filtar sa četiri pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92] 148

Slika 6.17 Rezultati *S* parametara simulacija projektovanog filtar sa četiri pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92]..... 148
Slika 6.18 Fotografije filtra sa dva pola fabrikovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na montirani filtar sa donje strane sa 2.92 mm konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92]..... 149
Slika 6.19 Fotografije filtra sa četiri pola fabrikovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na montirani filtar sa donje strane sa 2.92 mm konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92]..... 149
Slika 6.20 Poređenje simuliranih i izmerenih rezultata *S* parametara fabrikovanog filtra sa dva pola, [92]..... 151
Slika 6.21 Poređenje simuliranih i izmerenih rezultata *S* parametara fabrikovanog filtra sa četiri pola, [92] 151
Slika 7.1 Projektovani mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek A-A', [98]..... 155
Slika 7.2 Simulirani odziv projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [98] 155
Slika 7.3 Projektovan 0-dB direkcioni sprežnika odlaznog talasa, pogled od gore i poprečni presek, [98] 156
Slika 7.4 Super ćelija sprežnika, pogled od gore i poprečni presek, A-A', [98]..... 156
Slika 7.5 Disperzioni dijagram super ćelije sprežnika..... 157
Slika 7.6 Razlika fazne konstante parnog i neparnog moda predloženog sprežnika, za dužinu uvećanog peča l_p = 6 mm, [98]..... 157
Slika 7.7 Odziv projektovanog 0-dB direkcionog sprežnika sa odlaznim talasom, [98]..... 158

Spisak tabela

Tabela 3.1 Poređenje osnovnih karakteristika grebenastog talasovoda na bazi procepa, talasovoda na bazi procepa sa kanalom i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 39
Tabela 3.2 Performanse linijskih tranzicija u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 51
Tabela 3.3 Performanse vertikalnih tranzicija u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 62
Tabela 3.4 Performanse tranzicija kroz otvore u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 70
Tabela 3.5 Karakteristike filtara realizovanih u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa 75
Tabela 3.6 Karakteristike filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom 87
Tabela 3.7 Karakteristike filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa ... 92
Tabela 4.1 Poređenje performansi predložene tranzicija i ostalih relevantnih tranzicija iz literature 114
Tabela 5.1 Poređenje neopterećenih faktora dobrote peč rezonatora u tehnologijama mikrostrip voda, talasovoda integrisanog u podlogu i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa 120
Tabela 5.2 Poređenje karakteristika predloženih filtara i ostalih publikovanih filtarskih rešenja u tehnologiji talasovoda na bazi procepa 131

Spisak skraćenica

PEC	*Perfect Electric Conductor*
PMC	*Perfect Magnetic Conductor*
AMC	*Artificial Magnetic Conductor*
RGW	*Ridge Gap Waveguide*
GGW	*Groove Gap Waveguide*
MS-RGW	*Microstrip Ridge Gap Waveguide*
FWDC	*Forward-Wave Directional Coupler*
PCB	*Printed Circuit Board*
CAD	*Computer Aided Design*
LTCC	*Low Temperature Co-fired Ceramics*

Glava 1. Uvod

Ubrzan razvoj bežičnih komunikacionih sistema u poslednjoj deceniji, doveo je do pojave novih servisa, tehnologija i standarda kod kojih postoji trend pomeranja radnih učestanosti ka milimetarskom i mikrotalasnom opsegu kako bi se postigle još veće brzine za prenos velike količine podataka. Naime, kako bi se povećao protok i količina podataka, koriste se opsezi učestanosti u okolini 15 GHz, i u okolini 30 GHz i 60 GHz, što su preporučeni radni opsezi učestanosti za nadolazeće uređaje 5G komunikacionih sistema.

Za rad uređaja bežičnih komunikacionih sistema na visokim učestanostima u mikrotalasnom i milimetarskom opsegu, postavljaju se sve veći zahtevi za kompaktnim rešenjima visokih performansi, koji uz to imaju niske cene, male gubitke, kompaktne dimenzije i kompatibilnost sa ostalim RF kolima, pogodni za jednostavniju integraciju.

Mikrotalasna kola, poput talasovoda i filtara, predstavljaju suštinske komponente čije su performanse od kritične važnosti za sveobuhvatan rad komunikacionih sistema. Talasovodna tehnologija tradicionalno je korišćena pošto nudi male gubitke, odnosno velike faktore dobrote (*Q* faktore), mada složeni fabrikacioni proces rezultuje velikim strukturama, kao i višim cenama na višim učestanostima. Sa druge strane, planarne talasovode kao što su mikrostrip i striplajn, karakterišu značajni dielektrični gubici na visokim učestanostima, kao i neželjeni gubici usled zračenja.

Prema tome, iako su talasovodna i mikrostrip tehnologija široko korišćene za realizaciju mikrotalasnih filtara na učestanostima ispod 30 GHz, ove tehnologije ne mogu da podrže zahteve koje postavljaju savremeni 5G komunikacioni sistemi.

Relativno nova talasovodna tehnologija, tzv. talasovodi na bazi procepa (engl. *gap waveguide*), ponuđena je kao alternativa konvencionalnim tehnologijama, prevazilazeći njihove nedostatke. Naime, idealan talasovod na bazi procepa zasnovan je na talasovodima sa paralelnim pločama. Stoga, fabrikacija kola u talasovodima na bazi procepa omogućena je bez provodnog kontakta između paralelnih ploča, čime je ostvaren jeftiniji proces fabrikacije i dobijene su strukture sa otvorenim bočnim stranama, koje omogućavaju bolje hlađenje. Kako je uobičajeno u praksi, prostor između paralelnih ploča ispunjen je vazduhom, pa shodno tome nema dielektričnih gubitaka, čime su ostvareni veći faktori dobrote u odnosu na kola izrađena u standardnoj mikrostrip tehnologiji.

Istraživanje u ovoj disertaciji obuhvata upoznavanje sa načinom i vrstama prostiranja elektromagnetskih talasa u talasovodima na bazi procepa kao i njihovom manipulacijom. Detaljno su razmatrana do sada predložena rešenja talasovoda na bazi procepa iz literature, sa akcentom na sagledavanju rešenja predloženih u jednoj vrsti talasovoda na bazi procepa, tzv. *mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa*, sa ciljem da se pronađu nova i kompaktnija rešenja kola visokih performansi u ovoj tehnologiji, koja će svojim osobinama prevazići postojeća mikrotalasna pasivna kola izvedena u drugim tehnologijama.

Naučni doprinos ove disertacije predstavljaju šest novih topologija filtara i jedna nova topologija 0-dB direkcionog sprežnika snage, realizovane u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Takođe, doprinos disertacije se ogleda u tome da su svi filtri i sprežnik zasnovani na prethodno projektovanom mikrostrip grebenastom talasovodu na bazi procepa, koji je dobijen projektovanjem i analizom predloženih tzv. gradivnih elemenata talasovoda na bazi procepa. Potrebno je napomenuti da su pomoćni gradivni elementi projektovani i analizirani za svaki predloženi rezonator i za sprežnik.

Prve četiri topologije filtara propusnika opsega učestanosti zasnovane su na predloženom minijaturnom rezonatoru koji je projektovan za rad na učestanosti u okolini 15 GHz. Pomoću predloženog rezonatora realizovani su filtar prvog, drugog, četvrtog i petog reda, dobijeni direktnom ili unakrsnom spregom predloženog rezonatora.

Naredne dve filtarske topologije zasnovane su na realizovanom rezonatoru sa ortogonalnim modovima (engl. *Dual-mode*). Rezonator je projektovan za rad u milimetarskom opsegu učestanosti. I razdvajanjem degenerativnih modova predloženog rezonatora u spektru realizovan je filtar sa dva pola. Drugi filtar sa četiri pola, realizovan je spregom dva dual-mod rezonatora.

Na kraju disertacije, predložen je direkcioni sprežnik sa 0-dB odlaznim talasom, projektovan za rad na učestanostima u okolini 15 GHz.

Disertacija obuhvata korišćenje softverskih alata za projektovanje kola pomoću računara (CAD), analizu i optimizaciju predloženih rezonatora, filtara i sprežnika. Takođe, istraživanja u okviru disertacije obuhvataju fabrikaciju predloženih struktura, merenje njihovog odziva i poređenje rezultata dobijenih softverskim alatima i merenjima.

Za projektovanje gradivnih elemenata, iskorišćen je softverski alat *CST Microwave Studio, Eigenmode Solver*, dok su za projektovanje talasovoda na bazi procepa, filtara i sprežnika, iskorišćeni softverski alati *CST Microwave Studio, Transient Solver* i *CST Microwave Studio, Frequency Domain Solver*. Sva predložena kola fabrikovana su korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča (engl. *Printed Circuit Board* - PCB).

Disertacije je organizovana na sledeći način:

Posle uvoda sledi druga glava u kojoj je prikazana teorijska osnova talasovoda na bazi procepa. U prvom delu glave dat je istorijat talasovoda na bazi procepa, od mekih i tvrdih površina iz akustike odakle je proistekla ideja, pa zatim razvojem idealnih struktura talasovoda, dobijanje PEC/PMC površine i na kraju tehnologije talasovoda na bazi procepa. Drugi deo druge glave posvećen je predstavljanju najzastupljenijih vrsta talasovoda na bazi procepa u literaturi; grebenastom talasovodu na bazi procepa, talasovodu na bazi procepa sa kanalom i mikrostrip grebenastom talasovodu na bazi procepa. Treći deo posvećen je analizi i projektovanju talasovoda na bazi procepa, sa osvrtom na modelovanje disperzione karakteristike grebenastog talasovoda na bazi procepa. Takođe, u trećem delu data je analiza karakteristične impedanse grebenastog talasovoda na bazi pocepa i uticaj geometrijskih parametara na modove jedinične ćelije grebenastog talasovoda.

Treća glava ove disertacije daje detaljan pregled kola realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. U prvom delu predstavljene su osnovne razlike grebenastog talasovoda i talasovoda na bazi procepa sa kanalom i navedene su njihove modifikacije. Takođe, razmatrana je sličnost između grebenastog talasovoda i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Drugi deo detaljno opisuje sve do sada realizovane pobudne strukture talasovoda na bazi procepa, tzv. *tranzicije*. Radi lakšeg razmatranja tranzicije su podeljene u tri grupe; linijske, vertikalne i tranzicije kroz otvore. Treći deo ove glave daje detaljan pregled filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Predstavljeni su filtri realizovani u svim tehnologijama i modifikacijama tehnologija talasovoda na bazi procepa. U poslednjem delu ove glave predstavljene su realizacije sprežnika i delitelja snage, do danas realizovane u tehnologiji talasovoda na bazi procepa.

U naredne tri glave predstavljeni su najvažniji naučni doprinosi ove doktorske disertacije.

U prvom delu četvrte glave detaljno je predstavljena analiza projektovanja osnovnih gradivnih elemenata mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa; jedinične ćelije i super ćelije talasovoda. Zatim u drugom delu predstavljeno je projektovanje nove tranzicije za pobudu mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Mikrostrip grebenasti talasovod je projektovan korišćenjem osnovnih gradivnih elemenata iz prvog dela ove glave. U poslednjem delu ove glave prikazani su fabrikacija i rezultati merenja projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

Na početku pete glave dat je način projektovanja novog rezonatora u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Rezonator je analiziran korišćenjem nove predložene super ćelije rezonatora. Takođe, u prvom delu dato je poređenje sa stanovišta gubitaka predloženog rezonatora sa rezonatorima realizovanim u drugim tehnologija; mikrostripa i talasovoda integrisanih u podlogu. U drugom delu predstavljen je način projektovanja filtara prvog, drugog, četvrtog i petog reda, realizovanih direktnim ili unakrsnim sprezanjem predloženih rezonatora. Za pobudu filtara korišćen je mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, projektovan u četvrtoj glavi ove disertacije. Treći deo prikazuje fabrikaciju predloženih filtara korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča i rezultate merenja. Poređenje predloženih filtara sa drugim filtrima realizovanim u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, dato je u četvrtom delu ove glave.

U prvom delu šeste glave predstavljeni su osnovni gradivni elementi mikrostrip grebenastog talasovoda projektovani za rad u milimetarskom opsegu učestanosti. Takođe, u prvom delu predstavljeno je projektovanje super ćelije dual-mod rezonator za milimetarski opseg učestanosti. Drugi deo predstavlja projektovanje i fabrikaciju mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa za rad u milimetarskom opsegu učestanosti. U ovom delu razmatrana je modifikacija tranzicije iz četvrte glave za korišćenje na milimetarskim učestanostima. U trećem delu šeste glave predstavljeno je projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti. Korišćenjem predloženih rezonatora projektovani su filtar sa dva pola i filtar sa četiri pola.

U poslednjem delu ove glave dati su fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara sa dual-mod rezonatorima.

U sedmoj glavi ove disertacije predstavljen je direkcioni sprežnik sa 0-dB odlaznim talasom, projektovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. U prvom delu projektovan je mikrostrip grebenasti talasovod koji će se koristiti u sprežniku. Drugi deo glave posvećen je projektovanju 0-dB sprežnika, korišćenjem talasovoda iz prvog dela. Takođe, za analizu spregnutih talasovoda projektovana je nova super ćelija, tzv. super ćelija sprežnika, koja daje uvid u ponašanje modova sprežnika. Na kraju drugog dela predstavljeni su rezultati simulacija projektovanog 0-dB direkcionog sprežnika sa odlaznim talasom.

U osmoj glavi dat je opšti zaključak disertacije.

Na kraju disertacije dat je pregled literature koja prati ovaj rad.

Glava 2. Teorijske osnove tehnologije talasovoda na bazi procepa

U mikrotalasnoj elektronici tehnologija konvencionalnih talasovoda i mikrostrip vodova, predstavljaju dobro poznate i široko primenjivane tehnologije. Tehnologija talasovoda predstavlja strukture koje nude male gubitke, odnosno velike *Q* faktore, koje se uobičajeno koriste na učestanostima do 30 GHz za realizaciju različitih sistema i komponenti koje karakterišu zanemarljivo mali gubici i velike snage, na primer u antenskim sistemima, kao što su radari. Sa druge strane, mikrostrip tehnologija, kao i tehnologije koje se oslanjaju na korišćenje dielektričnih podloga (striplajn, ko-planarni talasovodi, itd.) koriste se na uobičajeno na nižim učestanostima do 10 GHz, za izradu kola male snage, filtara, antena, itd.

Na visokim učestanostima iznad 30 GHz, javlja se problem i kod konvencionalnih talasovoda i kod mikrostrip tehnologije. Naime, realizacija talasovoda na učestanostima iznad 30 GHz zahteva vrlo male otvore šupljina, pri čemu cena izrade raste kao i tolerancije dimenzija na visokim učestanostima. Pristup izrade talasovoda iz dva dela koji se naknadno spajaju, rešava delimično problem malih otvora šupljina, a otvara pitanje ostvarivanja dobrog električnog kontakta na spojevima i pozicije na kojima se spojevi nalaze. Što se tiče mikrostrip tehnologije, kao što je rečeno, ona nije namenjena za izradu kola na visokim učestanostima, pošto sa porastom učestanosti rastu i dielektrični gubici, kao i smanjenje mogućnosti korišćenja u primenama koje zahtevaju prenos velikih snaga.

Tehnologija koja prevazilazi delimično nedostatke konvencionalnih talasovoda i mikrostrip vodova, a omogućava primenu na visokim učestanostima su talasovodi integrisani u podlogu (engl. *Surface Integrated Waveguides* - SIW). SIW kola su izrađena pomoću jeftine tehnologije štampanih ploča (engl. *Printed Circuit Board*), kod koje su talasovodi integrisani u dielektričnu podlogu okruženi zidovima koji su načinjeni od niza vija raspoređenih na odgovarajućim rastojanjima. Usled prisustva dielektrika i korišćenje vija, ni SIW nisu idealni za korišćenje na visokim učestanostima, zbog dielektričnih gubitaka i složenog procesa izrade vija na visokim učestanostima, zbog vrlo malih dimenzija, čime se povećava cena izrade.

Prema tome, postoji potreba za novim talasovodnim tehnologijama koje rade na visokim učestanostima iznad 30 GHz, i koje će prevazići nedostatke konvencionalnih talasovoda, mikrostrip vodova i SIW-a.

Tehnologija talasovoda na bazi procepa pojavljuje se kao alternativa konvencionalnim tehnologijama u prevazilaženju njihovih nedostataka. Talasovodi na bazi procepa omogućuju realizacije bez provodnog kontakta između paralelnih ploča, manje gubitke na učestanostima iznad 30 GHz, jeftinije procese izrade i otvorene strukture radi boljeg hlađenja.

U prvom delu ove glave dat je istorijat talasovoda na bazi procepa, počevši od mekih i tvrdih površina iz akustike, evolucijom kroz razne idealne strukture, PEC/PMC površine, do struktura koje danas nazivamo tehnologijom talasovoda na bazi procepa.

Vrste talasovoda na bazi procepa, kao i različiti načini njihove realizacije uz primere pojedinih fabrikovanih talasovoda na bazi procepa, dati su u drugom delu.

Treći deo ove glave posvećen je analizi i projektovanju talasovoda na bazi procepa, sa osvrtom na modelovanje disperzione karakteristike kod grebenastih talasovoda na bazi procepa, gde su upoređeni disperzioni dijagrami dobijeni numeričkom metodom i softverskim alatima pokazali odlično podudaranje. Takođe, aproksimacija karakteristične impedanse grebenastog talasovoda na bazi procepa i prikaz uticaja geometrijskih parametara talasovoda na bazi procepa na disperzioni dijagram i konačne performanse talasovoda na bazi procepa, dati su u trećem delu ove glave.

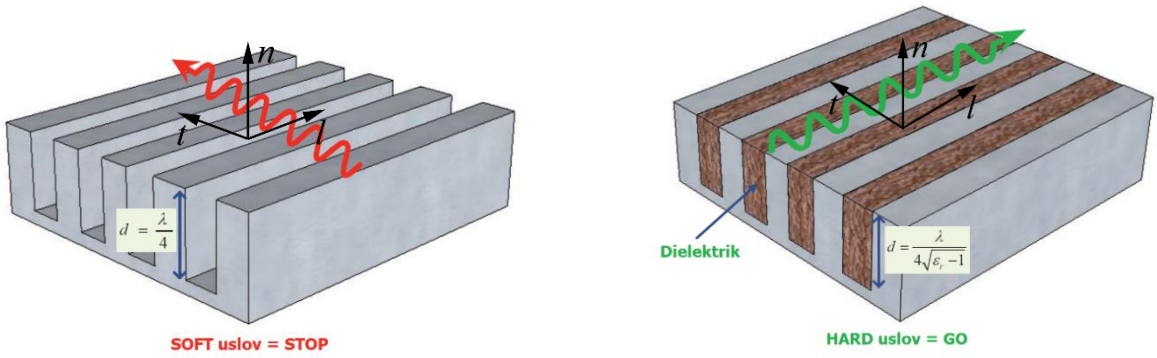
2.1 Istorijat talasovoda na bazi procepa

U poslednjim decenijama istraživačima su postali interesantni veštački elektromagnetski materijali sa karakteristikama kakve se ne mogu naći u prirodi. Takve materijale, nazivamo metamaterijalima (engl. *Metamaterials*), [1]. Metamaterijali se sastoje od višestrukih elemenata uobičajeno dobijenih od kompozitnih materijala plastike ili metala raspoređenih po odgovarajućem šablonu, i dimenzija manjih od talasnih dužina fenomena na koji utiču. Osobine metamaterijala ne potiču od osnovnih materijala od kojih su sastavljeni, već od odgovarajućeg dizajna strukture. Naime, njihov oblik, geometrija, veličina, orijentacija i raspored određuju osobine koji omogućuju manipulaciju elektromagnetskim ili akustičkim talasima. Dakle, apsorpcijom, pojačanjem ili skretanjem talasa, mogu se postići korisne osobine koje ne postoje kod današnjih materijala.

Jedna od karakteristika koja se može postići je osobina magnetske provodnosti (engl. *Magnetic Conductivity*), koja ne postoji u prirodi. Materijali, odnosno površine koje poseduju ove osobine u literaturi se nazivaju idealni magnetski provodnici (engl. *Perfect Magnetic Conductor* - PMC) ili veštači magnetski provodnici (*Artificial Magneti Conductor* - AMC). Termini AMC i PMC koriste se uporedo i imaju isto značenje.

Prvi konceptualni pokušaj dobijanja magnetske provodnosti, u obliku površina visoke impedanse, bili su meke (engl. *Soft*) i tvrde (engl. *Hard*) površine, [2], [3].

Koncept mekih i tvrdih površina u elektromagnetici definisan je na osnovu graničnih uslova električnog polja, po analogiji sa mekim i tvrdim površinama iz akustike. Uobičajeno, meke i tvrde površine realizovane su kao transverzalna ili longitudinalna ispupčenja dobijena pravljenjem pravolinijskih kanala u metalu. Kanali se prave da budu odgovarajućih dubina d. Kod mekih površina ispunjeni su vazduhom dok su kod tvrdih površina ispunjeni dielektrikom permitivnosti ε_r. Ilustracije meke i tvrde površine, prikazane su na slici 2.1.



(a) *(b)*

Slika 2.1 Površine sa ispupčenjima: a) meke površine, b) tvrde površine

Meke i tvrde površine razlikujemo u zavisnosti od ponašanja toka gustine energije elektromagnetskog polja (Pointingov vektor) duž površine. Kod mekih površina amplituda električnog polja na površini biće jednaka nuli, dok će kod tvrdih površina imati maksimalnu vrednost. Meke i tvrde površine karakteriše anizotropno ponašanje, što znači da je uslov visoke impedanse vezan samo za jednu polarizaciju i jedan smer prostiranja, [2].

Za površine sa slike 2.1, razlikujemo tri pravca određena jediničnim vektorima: longitudinalni (l), transverzalni (t) i normalni pravac (n).

Meke i tvrde površine mogu biti predstavljene preko njihovih anizotropnih površinskih impedansi, u različitim pravcima tangencijalnim na površine. Prema tome, razlikujemo longitudinalnu i transverzalnu površinsku impedansu, [2]:

$$Z_l = -\frac{E_l}{H_l}, \tag{2.1}$$

$$Z_t = \frac{E_t}{H_t}, \tag{2.2}$$

kao odnos električnog E i magnetskog H polja, za odgovarajući longitudinalni (E_l i H_l) i transverzalni (E_t i H_t) pravac.

Meka površina za longitudinalne polarizacije ponaša se kao kratko spojeni vod koji transformiše kratak spoj na dnu kanala u beskonačno veliku impedansu koja se vidi na površini, pod uslovom da je dubina kanala, [2]:

$$d = \frac{\lambda}{4}, \tag{2.3}$$

i da se površina sastoji od najmanje dva uzastopna ispupčenja. Prema tome, talas koji se prostire duž meke površine u longitudinalnom pravcu l, slika 1(a), kada naiđe na kanal videće beskonačno veliku impedansu ($Z_l = \infty$), dok je impedansa za transverzalni pravac jednaka nuli ($Z_t = 0$), [2].

Kada uzmemo u obzir Pointingov vektor duž longitudinalnog pravca meke površine, od interesa su nam komponente električnog polja, transverzalna komponenta E_t i normalna komponenta E_n. Pošto znamo da je impedansa za transverzalni pravac jednaka nuli ($Z_t = 0$), iz toga sledi da su električne komponente od interesa na mekoj površini ili vrlo blizu meke površine jednake nuli, [2]:

$$E_t \approx E_n \approx 0. \tag{2.4}$$

Prema tome, na mekoj površini ili vrlo blizu meke površine Pointingov vektor za longitudinalni pravac jednak je nuli, [2].

Meke površine su široko korišćene u antenskim primenama za poboljšavanje oblika snopa zračenja, smanjenje neželjene uzajamne sprege i za snižavanje nivoa sekundarnog zračenja (engl. *Sidelobe level*), [4], [5].

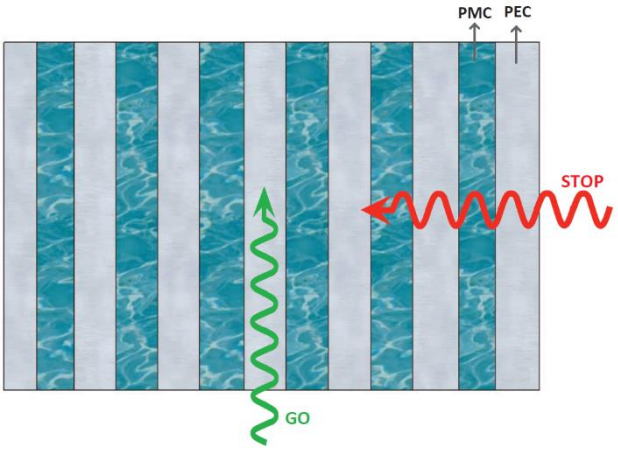
Tvrda površina za transverzalne polarizacije ponaša se kao kratko spojeni vod koji transformiše kratak spoj na dnu kanala u beskonačno veliku impedansu koja se vidi na površini, pod uslovom da je dubina kanala, [2]:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon_r - 1}}. \tag{2.5}$$

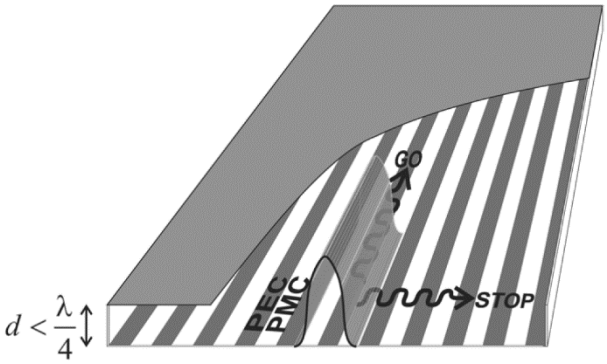
Prema tome, talas koji se prostire duž tvrde površine u transverzalnom pravcu vidi visoku impedansu ($Z_t = \infty$), koja kao kod mekih površina onemogućava njegovo prostiranje. Međutim, prostiranje je omogućeno za talas koji se prostire u longitudinalnom pravcu l, slika 1(b), duž metalnih ispupčenja, gde je impedansa jednaka nuli ($Z_l = 0$), [1]. U ovom slučaju, transverzalna i normalna komponenta električnog polja različite su od nule (E_t, E_n), dok je je longitudinalna komponenta električnog polja (E_l) jednaka nuli, što nam govori da ravanski talas može da postoji u longitudinalnom pravcu duž tvrde površine, [2].

Tvrde površine korišćene su često u *horn* antenama za povećanje ukupne direktivnosti za odgovarajuće veličine otvora, čime mogu da se dobiju kompaktne *horn* antene sa visokim pojačanjem (engl. *Gain*), [6].

Idealne meke i tvrde površine mogu se posmatrati kao PEC/PMC mreža linija [7], odnosno kao anizotropna površina koja poseduje električnu i magnetsku provodnost u jednoj strukturi, samo u jednom pravcu. Naime, PEC/PMC mrežom linija može se predstaviti meka ili tvrda površina u zavisnosti od orijentacije linija u odnosnu na pravac prostiranja talasa. Ilustracija PEC/PMC površine prikazan je na slici 2.2, gde je svaka druga linija realizovana kao PEC ili PMC, [3].



Slika 2.2 Ilustracija PEC/PMC površine



Slika 2.3 Konvencionalni talasovod sa izmenjenom donjom stranicom u PEC/PMC površinu, [8]

PEC/PMC linije postavljene longitudinalno na pravac prostiranja talasa oponašaju tvrde površine, dok PEC/PMC linije postavljene transverzalno na pravac prostiranja talasa oponašaju meke površine, [3].

Kada se donji zid konvencionalnih talasovoda zameni PEC/PMC površinom, kao što je prikazano na slici 2.3, duž jedne PEC linije omogućeno je prostiranje talasa kvazi-TEM moda (engl. *Quasi-Transverse Electomagnetic*), kvazi-transverzalnog elektromagnetskog moda, pod uslovom da je udaljenost PEC/PMC površine od gornje PEC ploče talasovoda manja od $\lambda/4$, [8]. Kvazi-TEM mod je karakterističan kod mikrostrip vodova, sličan je klasičnom TEM modu, ali sa tom razlikom da, pošto se talas prostire istovremeno u različitim sredinama (dielektrik/vazduh), dolazi do rasipanja polja i stvaranja longitudinalnih komponenti, mnogo manjih od transverzalnih.

Konfiguracija sa slike 2.3, ponaša se kao tvrda površina, kod koje je prostiranje jednog talasa kvazi-TEM moda lokalizovano između gornje PEC ploče i jedne PEC linije PEC/PMC površine, dok su svi viši modovi potisnuti, [9]. U praksi, tvrde površine su realizovane kao metalne trake na dielektričnoj podlozi, uzemljene pomoću vija, [8].

Struktura dobijena sintezom konvencionalnih talasovoda i PEC/PMC površine, [8], uslovila je pojavu novog koncepta vođenja talasa. Novi koncept predstavlja uvod u nove talasovodne strukture koje rade na visokim učestanostima i zasnivaju rad na prostiranju talasa između dve paralelne ploče, tzv. tehnologija talasovoda na bazi procepa (engl. *Gap Waveguide*), [10]. Paralelne ploče definisane su graničnim uslovima idealnog magnetskog provodnika i idealnog električnog provodnika.

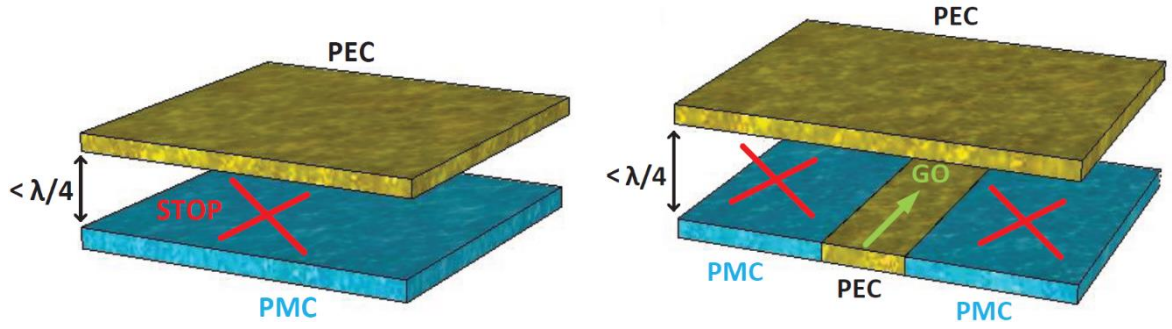
2.1.1 Koncept talasovoda na bazi procepa

Teorijski koncept talasovoda na bazi procepa zasnovan je na oblasti odsecanja elektromagnetskih (EM) talasa (engl. *Cutt-off*), koja nastaje kada se PEC i PMC ploče postave na udaljenost koja je manja od $\lambda_0/4$, gde je λ_0 talasna dužina u slobodnom prostoru. Granični uslovi uspostavljeni od strane PEC-PMC ploča zabranjuju prostiranje talasa u vazdušnom procepu između ploča, slika 2.4(a). Prostiranje je zabranjeno u određenom opsegu učestanosti koji se naziva *bandgap* ili zabranjena zona.

Kada se u oblast visoke impedanse (PMC) implementira provodna linija (PEC), ostvaruje se prostiranje lokalnog moda duž PEC linije. Mod koji se prostire duž PEC linije bočno je ograničen sa oblašću odsecanja EM talasa, dok je sa gornje strane ograničen PEC pločom, [10], slika 2.4(b).

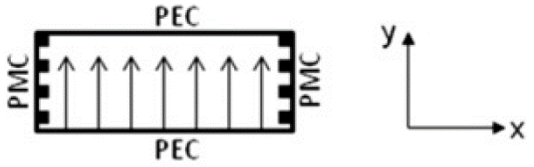
Talasovodi na bazi procepa poseduju sličnosti sa konvencionalnim i široko korišćenim talasovodnim strukturama. Naime, ponašanje talasovoda na bazi procepa slično je ponašanju linearno polarizovanog tvrdog talasovoda (engl. *Linearly Polarized Rectangular Hard Waveguide*) [10], [11], koji je prikazan na slici 2.5. Talasovod se sastoji od dve paralelne horizontalne PEC površine sa strana zatvoren vertikalnim PMC površinama, i podržava prostiranje uniformnog TEM talasa.

Takođe, talasovod na bazi procepa može se predstaviti pomoću idealnog talasovoda unutar procepa, koji je prikazan na slici 2.6. Idealni talasovod unutar procepa sastoji se od dve paralelne ploče, PEC i PMC, sa PEC talasovodom ugrađenim unutar PMC površine. Pošto u prostoru između PEC i PMC površina postoji oblast odsecanja, pod uslovom da je rastojanje između ploča manje od $\lambda/4$, prostiranje talasa je moguće samo duž PEC talasovoda širine w. Bočno talas vidi oblast odsecanja paralelnih ploča PEC-PMC, koje će ga eksponencijalno slabiti sa rastojanjem od PEC talasovoda. Ovo slabljenje je slično kao i kod linearno polarizovanih tvrdih talasovoda, sa slike 2.5, gde u zavisnosti od realizacije PMC vertikalnih zidova slabljenje zavisi od materijala od kojeg su zidovi napravljeni, i takođe od dubine prodiranja talasa u PMC zidove, [11].

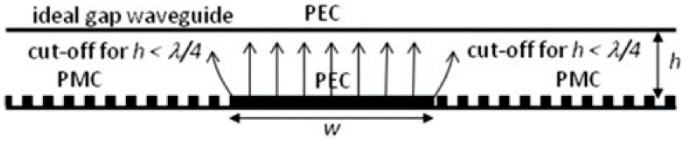


(a) *(b)*

Slika 2.4 Teorijski koncept talasovoda na bazi procepa: a) formiranje oblasti odsecanja, b) PEC linija implementirana u oblast odsecanja



Slika 2.5 Izgled linearno polarizovanog tvrdog talasovoda, [11]



Slika 2.6 Izgled idealnog talasovoda unutar procepa, [11]



(a) *(b)*

Slika 2.7 Poređenje talasovoda na bazi procepa sa invertovanim mikrostrip vodom: (a) idealni talasovod na bazi procepa, (b) invertovani mikrostrip vod, [12]

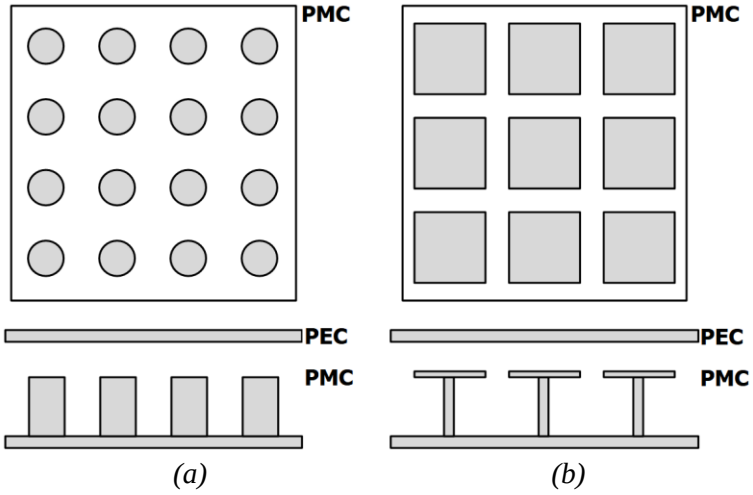
Talasovod na bazi procepa poseduje takođe sličnost sa konfiguracijom invertovanog mikrostrip voda [13], [14]. Poređenje talasovoda na bazi procepa i invertovanog mikrostrip voda ilustrovano je na slici 2.7, [12]. Mikrostrip linija u invertovanoj konfiguraciji kod koje ravan uzemljenja "*visi*" iznad mikrostrip linije polegnute na dielektričnoj podlozi, omogućava prostiranje talasa u vazduhu između mikrostrip linije i ravni uzemljenja, slika 2.7(b).

Naime sličnost kod dve konfiguracije sa slike 2.7, može se uočiti posmatranjem njihovih vektora elektromagnetskog polja koji ispunjavaju prostor između gornje provodne ploče i PEC voda ili mikrostrip voda. Vektori EM polja pokazuju da su talasi lokalizovani u oblasti iznad provodnika duž kog se prostiru, ograničeni sa bočnih strana oblašću odsecanja (PEC-PMC) ili dielektričnom podlogom.

2.2 Realizacija i vrste talasovoda na bazi procepa

Kao što je navedeno, talasovodi na bazi procepa zasnovani su na dve paralelne ploče PEC-PMC između kojih je zabranjeno prostiranje talasa, u određenom opsegu učestanosti. Prostiranje je onemogućeno u procepu između ploča koji je uobičajeno ispunjen vazduhom, ali može da bude ispunjen i drugim dielektričnim materijalom.

Ploče PEC i PMC predstavljaju slučajeve graničnih uslova idealnog električnog i idealnog magnetskog provodnika. Prema tome, u praksi je potrebno realizovati PEC-PMC ploče tako da zadovolje idealne uslove u što širem smislu. Naime, dobra aproksimacija PEC ploče jeste provodni materijal; bakar ili aluminijum. U pojedinim slučajevima, kada je potrebno da se smanje gubici provodnog materijala, koriste se tanki slojevi zlata ili platine, naneseni na osnovni provodni materijal. Sa druge strane, PMC ploča treba da bude projektovana kao dvodimenzionalna površina koja zabranjuje prostiranje talasa poput meke površine, ali za obe orijentacije. Tačnije, PMC ploča treba da bude okarakterisana visokom površinskom impedansom za sve polarizacije talasa. Uobičajeno, PMC ploča realizovana je periodično raspoređenim provodnim stubićima (engl. *Bed of nails*) [15], [16], ili sa periodično raspoređenim uzemljenim peč rezonatorima sa vijama (engl. *Mushroom inclusions*), [17], slika 2.8. Razlika između ove dve strukture je u tome da se struktura sa stubićima izrađuje od metala, dok je za strukturu sa uzemljenim peč rezonatorima potrebna dielektrična podloga. Na slici 2.8, prikazan je pogled odozgo i sa strane za dve najčešće korišćene periodične strukture u realizaciji PMC ploča, zajedno sa pripadajućom PEC pločom.



Slika 2.8 PMC periodične strukture (pogled od gore i sa strane): (a) sa provodnim stubićima, (b) sa uzemljenim peč rezonatorima

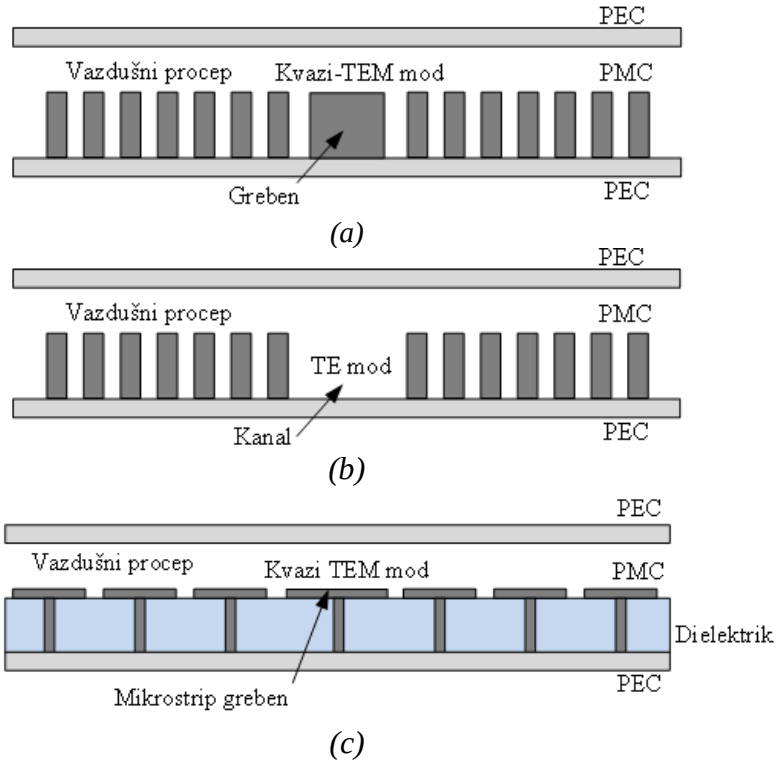
U oblasti odsecanja koja se dobija kada je rastojanje između PEC-PMC ploča manje od četvrtini talasne dužine ($\lambda/4$), onemogućeno je prostiranje modova strukture sa paralelnim pločama u opsegu učestanosti zabranjene zone. Opseg učestanosti zabranjene zone određen je geometrijom metalnih stubića, odnosno uzemljenih peč rezonatora, i razmakom između PEC-PMC ploča, [18].

Kako bi se dobila mogućnost prostiranja talasa, u prostor između PEC-PMC ploča uvode se provodne konvencionalne strukture u obliku metalnog grebena (engl. *Ridge*), kanala (engl. *Groove*) ili mikrostrip linije. Nakon implementacije jedne od ovih struktura, EM talas sa učestanošću u opsegu zabranjene zone, može da se prostire u procepu između uvedene provodne strukture i PEC ploče, vezan za provodnu strukturu i ograničen sa bočnih strana oblašću odsecanja (PEC-PMC). Talasovodi na bazi procepa, na osnovu uvedenih provodnih struktura, mogu se svrstati u tri grupe, [10]:

1) Grebenasti talasovodi na bazi procepa (engl. *Ridge Gap Waveguides* – RGW),
2) Talasovodi na bazi procepa sa kanalom (engl. *Groove Gap Waveguides* – GGW),
3) Mikrostrip grebenasti talasovodi na bazi procepa (engl. *Microstrip-Ridge Gap Waveguides* – MSRGW).

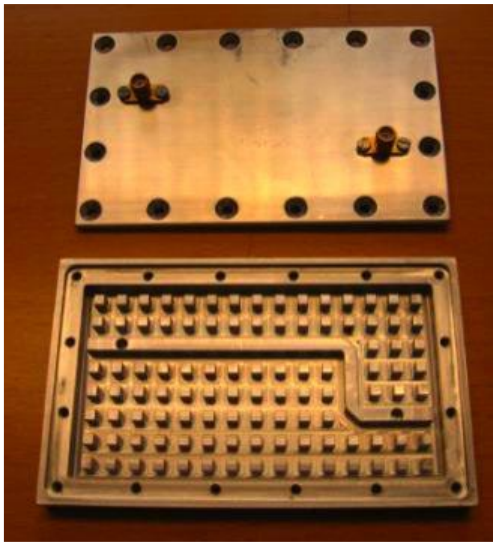
Karakteristično za talasovode na bazi procepa je da provodni kontakt između gornjeg i donjeg dela strukture nije potreban, što predstavlja prednost u odnosu na mikrostrip i striplajn tehnologije, kod kojih postoji dielektrik između dva provodnika, provodne linije i uzemljenja, kao i u odnosu na konvencionalne talasovode kod kojih postoje provodni metalni zidovi. Grebenasti talasovod, kao i mikrostrip grebenasti talasovod, podržavaju prostiranje kvazi-TEM moda, dok talasovod sa kanalom podržava prostiranje TE moda, vertikalne i horizontalne polarizacije [19].

Na slici 2.9 prikazane su ilustracije poprečnih preseka tri osnovna talasovoda na bazi procepa.



Slika 2.9 Ilustracije poprečnih preseka tri osnovna talasovoda na bazi procepa: (a) grebenasti talasovod, (b) talasovod sa kanalom, i (c) mikrostrip grebenasti talasovod

Grebenasti talasovodi na bazi procepa izrađuju se samo od metala i predstavljaju prvi tip talasovoda za koji nije potrebno korišćenje dielektrika, ne računajući tu i vazduh. Sastoje se od metalnog provodnika, grebena (engl. *Ridge*), koji je okružen metalnim stubićima uobičajeno istih visina kao greben. Metalni stubići i greben su sa donje strane kratko spojeni metalnom pločom, PEC, kao što je prikazano na slici 2.9(a). Proces izrade grebenastog talasovoda unutar procepa pomoću tehnologije CNC (engl. *Computer Numerical Control*) glodanjem omogućava da se deo kola koji sadrži greben i stubiće izradi iz jednog komada metala, bakra ili aluminijuma, čime je direktno ostvarena veza između grebena i stubića sa jedne strane. Takođe, proces izrade nudi mogućnost ostvarivanja različitih visina grebena i stubića, pa samim tim i više stepeni slobode prilikom projektovanja. Sa gornje strane, na odgovarajućoj visini *h*, iznad grebenastog talasovoda i stubića postavljena je ravna metalna ploča (PEC). Primer fabrikovanog grebenastog talasovoda unutar procepa, kod kojeg su razdvojene PMC i PEC ploča, prikazan je na slici 2.10, [20].



Slika 2.10 Primer grebenastog talasovoda na bazi procepa, [20]



(a) *(b)*

Slika 2.11 Talasovodi na bazi procepa sa kanalom: a) vertikalno polarizovan, b) horizontalno polarizovan, [19]

Talasovodi na bazi procepa sa kanalom predstavljaju drugu vrstu talasovoda na bazi procepa načinjeni samo od metala, bez dielektrika. Sličnost sa grebenastim talasovoda na bazi procepa je u postojanju PMC površine, uobičajeno realizovane metalnim stubićima, sa razlikom da je provodna struktura realizovana uklanjanjem većeg broja metalnih stubića, čime je dobijen prostor u kojem EM talas može slobodno da se prostire, slika 2.9(b). Sa gornje strane, na odgovarajućoj visini *h*, iznad kanala i stubića postavljena je ravna metalna ploča (PEC).

Talasovodi unutar procepa sa kanalom, u zavisnosti od polarizacije mogu se podeliti na vertikalno i horizontalno polarizovane talasovode, [19]. Na slici 2.11, prikazana je ilustracija poprečnih preseka talasovoda sa kanalom, za različite vrste polarizacija.

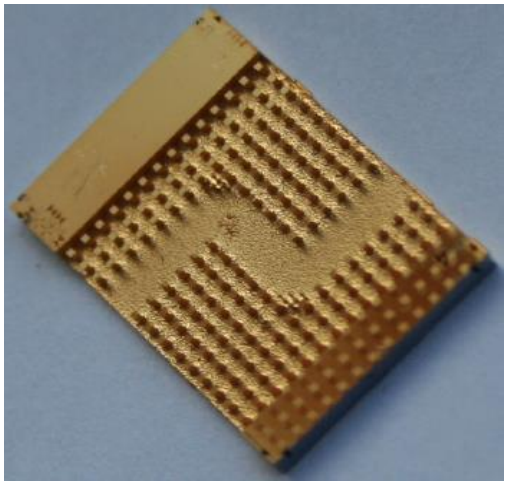
Razlika između vertikalno i horizontalno polarizovanih talasovoda na bazi procepa sa kanalom, pored orijentacije polarizacije talasa, postoji i u geometriji strukture. Naime, kod horizontalno polarizovanog talasovoda kanal je dublji i jednim delom sa potpuno zatvorenim zidovima, slika 2.11(b). Oba tipa talasovoda podržavaju prostiranje TE_{10} moda, koji je dominantni mod u oba slučaja . Sa gornje strane, na odgovarajućoj visini *h*, iznad kanala i stubića postavljena je ravna metalna ploča (PEC). Primer fabrikovanog talasovoda unutar procepa sa kanalom prikazan je na slici 2.12, bez gornje PEC ploče, [21].

Mikrostrip grebenasti talasovodi na bazi procepa zasnovani su na dielektričnim podlogama sa periodično raspoređenim uzemljenim peč rezonatorima, koji formiraju PMC površinu i okružuju uzemljeni mikrostrip vod, koji nazivamo mikrostrip greben, slika 2.9(c). Sa gornje strane, na odgovarajućoj visini *h*, iznad mikrostrip grebena i uzemljenih peč rezonatora postavljena je ravna metalna ploča (PEC). Na slici 2.13, prikazan je primer izrađenog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [22].

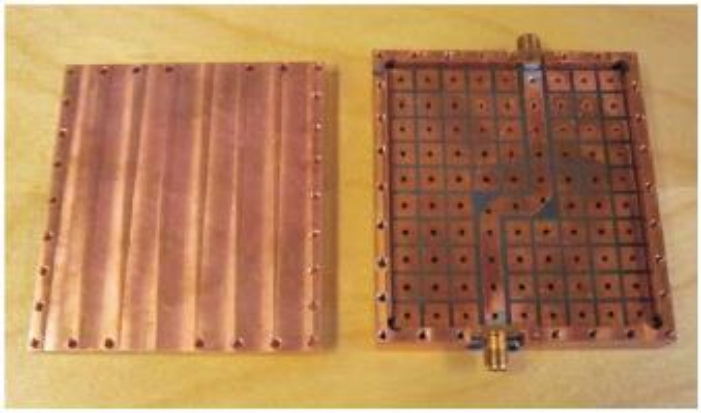
Strukture poput uzemljenih peč rezonatora (engl. *Mushroom structures*) [17], [18], [23], često se koriste u mikrostrip tehnologiji na nižim učestanostima. Izrađeni su standardnom tehnologijom štampanih ploča (PCB) i kompaktniji su u poređenju sa metalnim stubićima.

Treba napomenuti da je ponašanje mikrostrip grebenastog talasovoda slično ponašanju grebenastog talasovoda, pošto oba talasovoda podržavaju kvazi-TEM mod prostiranja talasa.

U literaturi, pored tri osnovne grupe talasovoda na bazi procepa, postoje i strukture projektovane u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [23], [24] . Naime, ova tehnologija u suštini predstavlja sintezu PMC strukture sa metalnim stubićima na koje je postavljen invertovani mikrostrip vod.



Slika 2.12 Primer talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [21]



Slika 2.13 Primer mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [22]

2.3 Analiza i projektovanje talasovoda na bazi procepa

U prvom delu ovog potpoglavlja dat je generalni pregled projektovanja osnovnih gradivnih elemenata talasovoda na bazi procepa, jedinične ćelije i super ćelije talasovoda. U delu 2.3.2 data je analiza disperzione karakteristike kvazi-TEM moda grebenastih talasovoda na bazi procepa. Prvo je analizirana geometrija metalnih stubića, potom geometrija metalnih stubića nadkrivenih provodnom pločom i na kraju, analizirana je struktura sa uvedenim grebenom unutar oblasti metalnih stubića.

Analiza karakteristične impedanse grebenastog talasovoda na bazi procepa data je u delu poglavlja 2.3.3. Približni rezultati karakteristične impedanse mogu se dobiti aproksimacijama karakterističnih impedansi mikrostrip i striplajn voda. Na kraju ovog poglavlja, u delu 2.3.4, pokazano je kako kritični geometrijski parametri jedinične ćelije utiču na modove disperzionog dijagrama.

2.3.1 Princip projektovanja osnovnih gradivnih elemenata

Pre početka projektovanja kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, potrebno je pored izbora tipa talasovoda odrediti radni opseg talasovoda, odnosno opseg učestanosti zabranjene zone, i učestanost odsecanja talasovodnog elementa (grebena, kanala ili mikrostrip grebena), koji omogućava prostiranje unutar zabranjene zone. Opseg učestanosti zabranjene zone definisana je oblašću odsecanja između dve paralelne ploče, odnosno projektovanim dimenzijama PMC površine, dok je učestanost odsecanja talasovodnog elementa određena širinom samog elementa i njegovog rastojanja od PMC površine.

Pošto se oblast visoke impedanse u talasovodima na bazi procepa, tačnije PMC površina, uobičajeno sastoji od periodično raspoređenih metalnih stubića, odnosno uzemljenih peč rezonatora, određivanje opsega učestanosti zabranjene zone svodi se na analizu *jedinične ćelije* od koje je periodična oblast načinjena. Jedinična ćelija predstavlja prvi gradivni element u analizi talasovoda na bazi procepa.

Uvođenjem talasovodnog elementa unutar oblasti visoke impedanse, dobijamo prostiranje modova unutar zabranjene zone. Kako bismo analizirali ponašanje moda prostiranja unutar zabranjene zone, koristimo drugi gradivni element talasovoda na bazi procepa tzv. *super ćeliju* talasovoda.

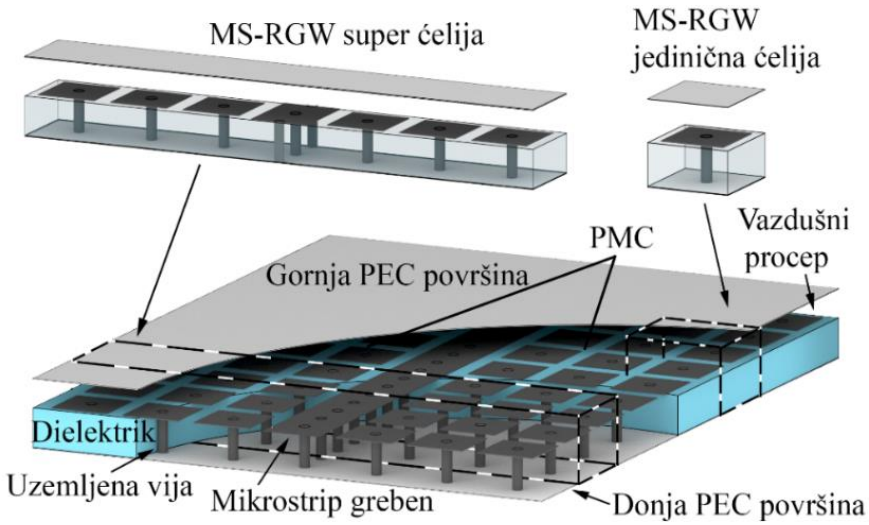
Na slici 2.14, prikazan je primer mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i pripadajućih gradivnih elemenata; jedinične ćelije i super ćelije talasovoda.

Jedinična ćelija, sa slike 2.14, kao prvi gradivni element talasovoda na bazi procepa, sastoji se od uzemljenog peča (ili metalnog stubića) sa okolnim prostorom, od dela donje PEC i gornje PEC površine i pripadajućeg dela vazdušnog procepa. Analizom jedinične ćelije u softverskom alatu koji daje mogućnost definisanja konfiguracije jedinične ćelije sa odgovarajućim graničnim uslovima, ostvaruje se uvid u ponašanje cele oblasti visoke impedanse sa aspekta opsega učestanosti zabranjene zone. Kao rezultat analize dobijamo disperzioni dijagram jedinične ćelije, prikazan na slici 2.15(a). Disperzioni dijagram jedinične ćelije prikazuje modove strukture sa paralelnim pločama, koji se prostiru unutar vazdušnog procepa. Između prvog i drugog moda postoji opseg učestanosti u kojem nema prostiranja modova strukture sa paralelnim pločama. Taj opseg od frekvencijskog maksimuma prvog moda do

frekvencijskog minimuma drugog moda predstavlja opseg učestanosti zabranjene zone, odnosno *bandgap*. Promenom dimenzija jedinične ćelije utičemo na promenu distribucije modova između PEC i PMC ploča, čime utičemo i na pomeranje zabranjene zone u spektru.

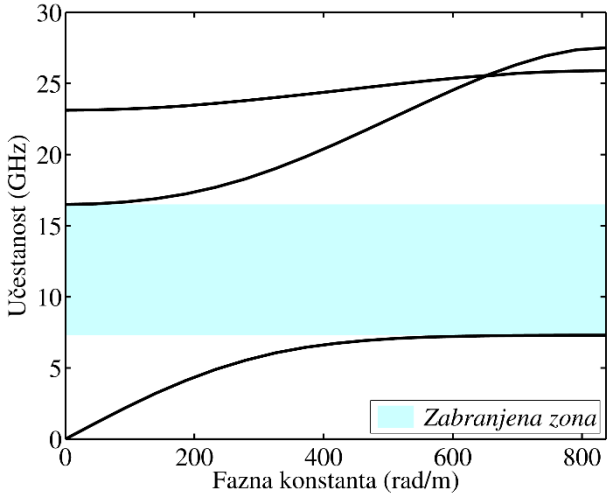
Super ćelija talasovoda, slika 2.14, sastoji se od talasovodnog elementa, određenog broja bočnih jediničnih ćelija sa okolnim prostorom, od dela donje PEC i gornje PEC površine i pripadajućeg dela vazdušnog procepa. Iz prakse je ustanovljeno da je broj od tri bočne jedinične ćelije sa obe strane talasovodnog elementa dovoljan da dobro definiše oblast odsecanja paralelnih PEC-PMC ploča, čime je omogućeno da talas sa većinom energije ostane lokalizovan u prostor između talasovodnog elementa i gornje PEC ploče. Kao i kod jedinične ćelije, analizom super ćelije talasovoda pomoću softverskog alata koji nudi mogućnost definisanja odgovarajućih graničnih uslova, ostvarujemo uvid u ponašanje moda koji se prostire unutar zabranjene zone, dobijenog postavljanjem talasovodnog elementa unutar PMC površine. Kao rezultat analize super ćelije dobija se disperzioni dijagram, prikazan na slici 2.15(b). Disperzioni dijagram super ćelije prikazuje modove koji se prostiru unutar opsega učestanosti zabranjene zone. Uobičajeno je to samo jedan mod, mada više modova može da se pobudi unutar zabranjene zone. Na promenu učestanosti odsecanja i disperzionih karakteristika modova koji se prostiru unutar zabranjene zone može se uticati menjanjem širine talasovodnog elementa i rastojanja elementa od prvog reda ćelija PMC površine.

Modovi ispod i iznad zabranjene zone, prikazani crnim linijama na disperzionom dijagramu super ćelije, slika 2.15(b), predstavljaju modove koji potiču od broja jediničnih ćelija unutar strukture i nisu od interesa u analizi ponašanja talasovoda na bazi procepa.

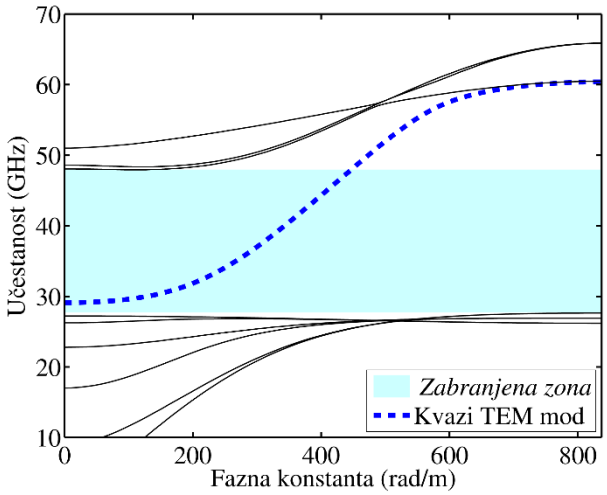


Slika 2.14 Ilustracija grebenastog talasovod na bazi procepa sa gradivnim elementima, jediničnom ćelijom i super ćelijom talasovoda

Pored dva osnovna gradivna elementa talasovoda na bazi procepa, razlikujemo još dva dodatna gradivna elementa, koji su od velike pomoći prilikom projektovanja filtara i sprežnika snage, *super ćelija rezonatora* i *super ćelija sprežnika*, a koje su bitne imajući u vidu ishode ove doktorske disertacije. Naime, super ćelija rezonatora daje nam uvid u ponašanje i broj rezonantnih modova koji se pobuđuju na različitim učestanostima unutar zabranjene zone, kada se u PMC površinu unese defekt, odnosno kada se periodična PMC površina poremeti odgovarajućom nepravilnošću. Sa druge strane, super ćelija sprežnika snage primenjuje se kako bi se odredile učestanosti parnog i neparnog moda, na osnovu kojeg je moguće dobiti dijagram fazne razlike, koji služi za određivanje dužine sprezanja dva talasovoda. Analiza svih navedenih gradivnih jedinica biće detaljno razmatrana kasnije u disertaciji.



(a)



(b)

Slika 2.15 Disperzioni dijagrami mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) jedinične ćelije, b) super ćelije talasovoda

2.3.2 Analiza disperzione karakteristike kvazi-TEM moda kod grebenastih talasovoda na bazi procepa

Kvazi-TEM mod okarakterisan je komponentama elektromagnetskog polja (EM) koje su dominantno transverzalne na pravac prostiranja talasa, ali postoje i manje komponente EM polja koje su longitudinalne. Elektromagnetsko polje eksponencijalno slabi bočno od grebena talasovoda na bazi procepa, u oblasti iznad metalnih stubića, koji mogu biti predstavljeni kao prostorno disperzivan anizotropni homogeni medijum okarakterisan ekvivalentnim homogenim koeficijentom refleksije [16]. Prvobitno, potrebno je posmatrati strukturu metalnih stubića izloženu upadnom talasu sa talasnim vektorom, k_i, kao što je prikazano na slici 2.16, [16]. Kako bi se odredio koeficijent refleksije (Γ), analiziran je fenomen povezan sa metalnim stubićima visine *d*, prečnika *2b* i razmakom *a* između stubića u *xz* ravni, koji su postavljeni unutar dielektričnog materijala permitivnosti ε_h, slika 2.16. Metalni stubići se mogu posmatrati kao prostorno i frekventno disperzivan anizotropni medijum čija je permitivnost okarakterisana tenzorom, [15, (1)], sa primitivnošću u pravcu *y* ose, normalnom na površinu metalnih stubića:

$$\varepsilon_{yy}(\omega, k_y) = \frac{1-k_p^2}{k_h^2-k_y^2}\,. \tag{2.6}$$

Talasni broj dielektričnog materijala k_h, dat je izrazom, [15]:

$$k_h = k\sqrt{\varepsilon_h}\,, \tag{2.7}$$

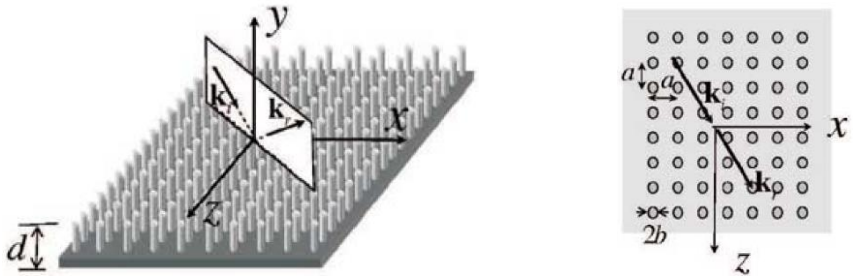
gde je *k* talasni broj u slobodnom prostoru. Talasni broj plazme, k_p, odgovoran za lokalnu prostornu disperzivnost, koji je zavisan samo od geometrijskih parametara *a* i *b*, dat je izrazom, [15]:

$$k_p = \frac{1}{a}\sqrt{\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a}{2\pi b}\right)+0.5275}}\,. \tag{2.8}$$

Izrazi (2.6), (2.7) i tenzorska permitivnost [15, (1)], validni su samo kada su ispunjeni sledeći uslovi:

$$\frac{a}{d} \ll 1\,, \tag{2.9}$$

$$\frac{a}{\lambda} \ll 1\,. \tag{2.10}$$



(a) *(b)*

Slika 2.16 Geometrija metalnih stubića: a) pogled iz perspektive, b) pogled odozgo, [15]

Primenom teorije homogenizacije [25]–[27], metalni stubići se mogu smatrati neprekidnim homogenim medijumom, čije osobine ne potiču od rezonantne prirode rešetke, već su rezultat velike koncentracije metalnih stubića, posebno kada je ispunjen uslov (2.10).

U [16] je pokazano da homogeni medijum poput metalnih stubića, može da podrži prostiranje tri različita moda: TE-*y* (engl. *Transverse Electric*) transverzalnog električnog, TM-*y* (engl. *Transverse Magnetic*) transverzalnog magnetskog, i TEM moda.

Za upadni talas sa TE polarizacijom, čije je električno polje paralelno sa ravni uzemljenja strukture sa slike 2.16, talas neće imati interakciju sa metalnim stubićima i videće medijum kao dielektrik sa PEC uzemljenim slojem. Pošto nema interakcije između talasa i metalnih stubića, koeficijent refleksije na razdelnoj površi vazduh–medijum biće određen refleksijom od uzemljenog sloja, [15].

Upadni talas sa TM polarizacijom sa komponentom magnetskog polja koja je horizontalna sa ravni uzemljenja, može prouzrokovati električnu struju duž metalnih stubića, i pri tome može da pobudi TM i TEM mod unutar dielektričnog medijuma sa metalnim stubićima, [16]. Koeficijent refleksije TM moda (Γ^{TM}) na razdelnoj površi vazduh–medijum rezultuje prodiranjem talasa TM moda unutar medijuma, sa konstantom slabljenja γ_{TM}, [15]:

$$\gamma^{TM} = \sqrt{k_p^2 + k_{\parallel}^2 - k^2}\,. \tag{2.11}$$

gde je $k_{\parallel}$ talasni vektor paralelan sa razdelnom površi vazduh–medijum. Konstanta slabljenja γ_{TM} teži beskonačnosti za gusto raspoređene metalne stubiće, [15]. Koeficijenti refleksije za TE i TM polarizaciju, pod uslovom da je $d = \lambda_h/4$, predstavljeni su kao, [15]:

$$\Gamma^{TM} = -1\,, \tag{2.12}$$

$$\Gamma^{TE} = 1\,. \tag{2.13}$$

Za gusto raspoređene metalne stubiće, ispunjen uslov (2.10), imamo da je $\gamma_{TM} \to k_p \to 1/a \to \infty$, iz čega dobijamo rešenje koeficijenta refleksije za TEM mod, [15]:

$$\Gamma^{TM}(k_y) \simeq \Gamma = -\frac{k_h \tan(k_h d) + \varepsilon_h \gamma_0}{k_h \tan(k_h d) - \varepsilon_h \gamma_0}\,. \tag{2.14}$$

Medijum se ponaša kao anizotropni materijal, za gusto raspoređene stubiće, sa permitivnosti u *xz* ravni jednakoj permitivnosti dielektričnog materijala ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_h$), i permitivnosti u pravcu *y* koja je beskonačna ($\varepsilon_{yy} = \infty$). Ekvivalentna impedansa ovog medijuma data je izrazom, [15]:

$$Z_s = j\frac{\xi}{\sqrt{\varepsilon_h}}\tan(k_h d), \tag{2.15}$$

gde je ξ karakteristična impedansa slobodnog prostora. Ekvivalentna impedansa Z_s ima induktivno ponašanje za $d \leq \lambda_h/4$ i kapacitivno ponašanje za $\lambda_h/4 < d \leq \lambda_h/2$, dok za $d = \lambda_h/4$, ekvivalentna impedansa medijuma opisuje PMC površinu, [15].

Određivanje disperzione karakteristike metalnih stubića natkrivenih provodnom pločom, PEC, za strukturu prikazanu na slici 2.17(a), predstavlja sledeći korak u analizi grebenastih talasovoda na bazi

procepa. Za dati slučaj, radi pojednostavljenja analize, smatramo da su metalni stubići u vazduhu ($\varepsilon_h = 1$).

Talas koji se odbija u procepu između gornje provodne ploče i metalnih stubića, može se takođe opisati pomoću koeficijenata refleksije TE moda ($\Gamma^{TE}(k_y)$) i TM moda ($\Gamma^{TM}(k_y)$), gde sada k_y predstavlja rešenje problema svojstvene vrednosti (engl. *Eigenvalue*) određen nultom vrednošću tangencijalne komponente električnog polja stojećeg talasa na površini gornje provodne ploče.

Struktura sa slike 2.17(a), gradi talasovod paralelnih ploča, PEC-PMC, kod kojeg se rešenje TE moda svodi na rezonantni efekat između PEC i PMC ploče. Rešenje TM moda može se posmatrati kao jednačina ekvivalentnog rednog rezonantnog kola, prikazanog na slici 2.17(b):

$$Z_{0,TM}^{sc}(k_y) + \left[1 - \eta(k_y)\right] Z_{TEM}^{sc} + \eta(k_y) Z_{TM}^{sc}(k_y) = 0\,, \tag{2.16}$$

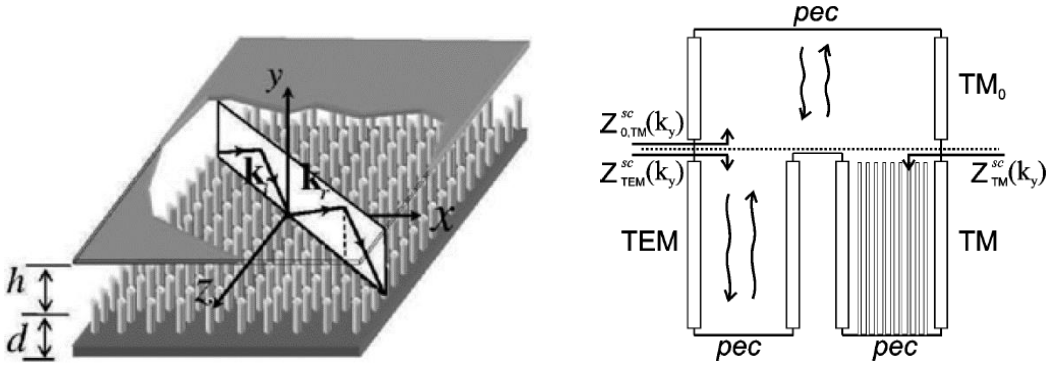
gde su impedanse redom sa leva na desno, TM modalna impedansa koja se vidi na površini metalnih stubića u smeru ka gornjoj PEC ploči, TEM modalna impedansa koja se vidi na površini metalnih stubića ka donjoj PEC ploči za slučaj bez metalnih stubića i TM modalna impedansa koja se vidi na površini metalnih stubića ka donjoj PEC ploči za slučaj sa metalnim stubićima. Parametar $\eta(k_y)$ daje značaj TM modu u odnosu na TEM mod unutar oblasti metalnih stubića, koji može jednostavno da se izvede iz uslova kontinuiteta magnetskog polja na razdelnoj površi metalnih stubića i vazduha, ili kao ekvivalent struji rednog rezonantnog kola, [15].

Za rezonantni uslov za gusto raspoređene metalne stubiće, imamo da $\eta(k_y) \to 0$. Tada se jednačina ekvivalentnog rednog rezonantnog kola može napisati, [15]:

$$Z_{0,TM}^{sc}(k_y) + Z_{TEM}^{sc} = 0\,, \tag{2.17}$$

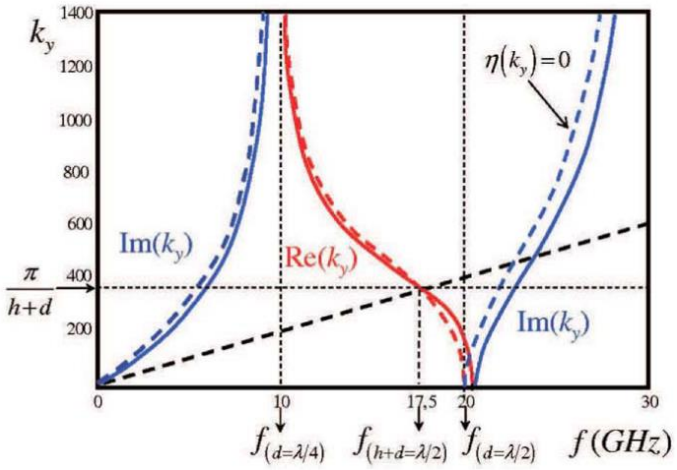
što vodi ka konvencionalnoj disperzionoj jednačini, pri čemu je samo TEM mod prisutan unutra oblasti metalnih stubića.

Za rešavanje izraza (2.16) i (2.17) koriste se numeričke metode i u primeru u [14] iskorišćeno je Matlab *FSOLVE* rutina. Rezultati su prikazani na slici 2.18, za referentnu geometriju predloženu u [14, slika 3].



(a) (b)

Slika 2.17 Metalni stubići nadkriveni provodnom pločom PEC: a) ilustracija, b) ekvivalentno redno rezonantno kolo disperzione jednačine metalnih stubića, [15]



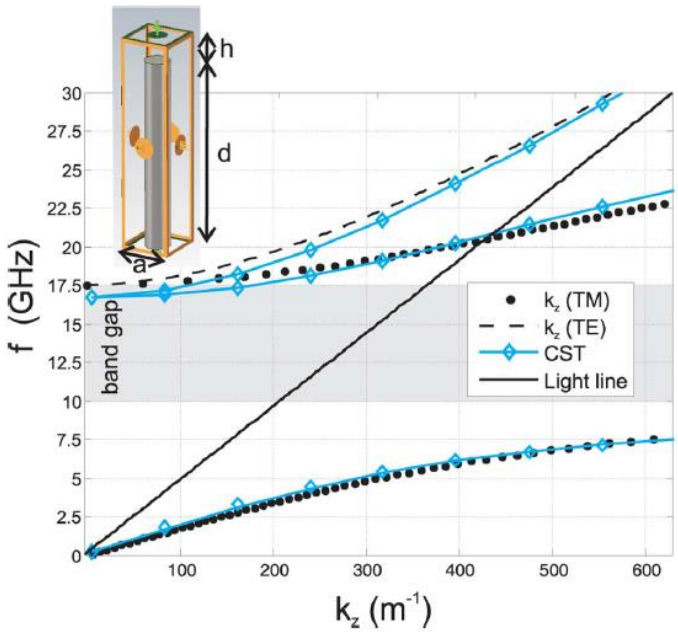
Slika 2.18 Numeričko rešenje izraza (2.16) puna linija i (2.17) isprekidana linija, [15]

Na slici 2.18 data su rešenja svojstvene vrednosti k_y za TM i TEM rezonance, izrazi (2.16) i (2.17), prikazani punom i isprekidanom linijom, respektivno. Svojstvene vrednosti k_y za TE rezonance su takođe prikazane na slici 2.18, $k_y = \pi/(h+d)$. Rezonance TE su konstante u učestanosti, pošto su određene rezonancom između gornje i donje PEC ploče, [15].

Za različite oblasti učestanosti na slici 2.18, prikazane vertikalnim isprekidanim linijama, imamo različita ponašanja svojstvene vrednosti k_y. Najpre, za učestanosti ispod $f_{(d=\lambda/4)}$ svojstvene vrednosti k_y su čisto imaginarne, predstavljene TM talasom koji se prostire na interfejsu metalnih stubića i vazduha, i na koje značajno ne utiče gornja PEC ploča. U opsegu učestanosti između $f_{(d=\lambda/4)}$ i $f_{(d=\lambda/2)}$, k_y je realan i predstavljen stojećim talasom između dve paralelne ploče. U ovom opsegu učestanosti razlikujemo dva podopsega. Prvi podopseg od $f_{(d=\lambda/4)}$ do $f_{(d+h=\lambda/2)}$ gde je k_y realno i veće od k (iznad linije svetlosti), što znači da talas slabi u svim pravcima na površini. Za drugi podopseg od $f_{(d+h=\lambda/2)}$ do $f_{(d=\lambda/2)}$, gde je k_y manje od k (ispod linije svetlosti) prostiranje je dopušteno unutar strukture. Za učestanost iznad 20 GHz, odnosno iznad $f_{(d=\lambda/2)}$, k_y je dominantno imaginarno sa prostiranjem TM talasa na interfejsu metalnih stubića i vazduha, [15].

Opseg učestanosti od $f_{(d=\lambda/4)}$ do $f_{(d+h=\lambda/2)}$ predstavlja nepropusni opseg strukture, odnosno opseg učestanosti zabranjene zone. Učestanost odsecanja prvog TE moda na 17.5 GHz ($f_{(d+h=\lambda/2)}$) određuje gornju graničnu učestanost zabranjene zone, dok je donja granična učestanost zabranjene zone određena visinom metalnih stubića d ($f_{(d=\lambda/4)}$), kada k_y postaje realno.

Analizom jedinične ćelije metalnih stubića dobijen je disperzioni dijagram promene realnog dela talasnog vektora k_z sa učestanošću f, prikazan na slici 2.19. Na disperzionom dijagramu prikazani su TE i TM modovi, dobijeni numeričkim proračunavanjem i simulacijama softverskim alatom *CST Microwave Studio*, [28]. Jedinična ćelija ograničena je periodičnim graničnim uslovima sa definisanim promenama faza u x i z pravcima, dok je sa gornje i donje strane definisan granični uslov idealnog električnog provodnika, PEC.



Slika 2.19 Disperzioni dijagram jedinične ćelije metalnih stubića sa slike 2.17, [15]

Na slici 2.19, površinski talas (TM mod) prostire se od nižih učestanosti do 10 GHz, što odgovara oblasti učestanosti ispod $f_{(d=\lambda/4)}$, sa slike 2.18. Nepropusni opseg, odnosno zabranjena zona, prikazana sivom oblasti, proteže se od 10 GHz do početka prostiranja drugog TM moda na 17.5 GHz, odnosno prvog TE moda, [15].

Uvođenjem talasovodnog elementa, na primer grebena širine *w*, unutar oblasti metalnih stubića, dobija se grebenasti talasovod na bazi procepa. U ovakvoj strukturi, očekivana je pojava prostiranja kvazi-TEM moda duž grebena, u opsegu učestanosti zabranjene zone.

Kako bi se postiglo ograničavanje polja u oblasti između grebena i gornje PEC ploče, potrebno je da modovi odsecanja opadaju eksponencijalno u oblasti iznad metalnih stubića, što je dokazano rezultatima simulacija datim u [14, slika 7. i slika 8.], gde je prikazana raspodela normalizovane amplitude vertikalnog električnog polja u pravcu *y* ose, i normalizovana raspodela amplitude horizontalnog magnetskog polja u pravcu *x* ose, za pojedine učestanosti izvan i unutar zabranjene zone, [28]. Rezultati pokazuju da metalni stubići onemogućavaju prostiranje talasa bočno od grebena i ograničavaju komponentu električnog polja E_y na oblast grebena za učestanosti između 10 i 17.5 GHz. Komponenta magnetskog polja H_x slabije je lokalizovana za iste odabrane učestanosti, [15].

Takođe, u [15] dati su izrazi za električna i magnetska evanescentna polja TM*y* moda iznad metalnih stubića [14, (11)], evanescentna polja za TE*y* mod unutar oblasti metalnih stubića [14, (13)] i izrazi za polja kvazi-TEM moda u oblasti iznad grebena [14, (15)].

Dati izrazi čine sistem od šest jednačina sa šest nepoznatih, od kojih su prve tri jednačine dobijene putem disperzionih uslova iz tri oblasti; iznad metalnih stubića, unutar metalnih stubića i iznad grebena [14, (16)], dok su preostale tri jednačine dobijene primenom kontinuiteta tri komponente polja duž definisane granice razdvajanja, $x = \pm w/2$. U obzir su uzete komponente polja koje pripadaju kvazi-TEM modu, E_y, H_x i H_z [14, (17)], dok komponente polja E_x, E_z i H_y koja postoje samo u oblasti iznad ili

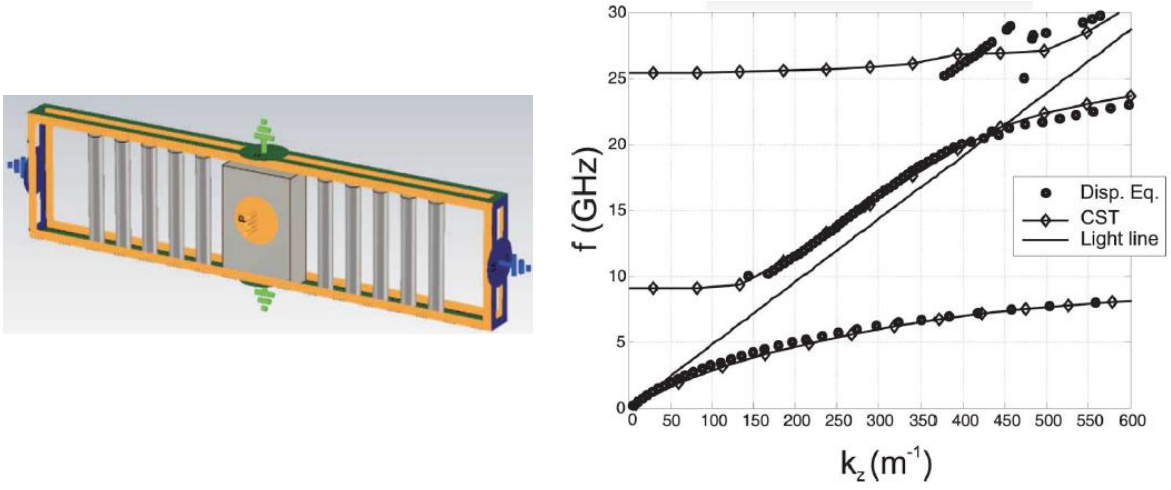
unutar metalnih stubića nisu uzeta u obzir, pošto su veoma slabe i nestaju na gornjoj provodnoj ploči, [15].

Na osnovu navedenih uslova dobijena je disperziona jednačina [14, (18)] koja pokazuje promenu talasnog broja talasnog moda koji propagira duž grebena, za odgovarajuće učestanosti, [15].

Na slici 2.20, prikazan je disperzioni dijagram modela super ćelije grebenastog talasovoda, na kojem su upoređeni modovi dobijeni numeričkom analizom, korišćenjem *Matlab FSOLVE* rutine, i simulirani rezultati dobijeni pomoću softverskog alata *CST Microwave Studio*, [27]. Model super ćelije (slika 2.20(a)) zatvoren je periodičnim graničnim uslovima u pravcu prostiranja talasa duž grebena, sa definisanim uslovima promene faze. Sa bočnih strana super ćelija je zatvorena idealnim magnetskim graničnim uslovima, PMC, kako bi se apsorbovale vertikalne komponente električnog polja na krajevima stubića, dok je sa gornje i donje strane zatvorena idealnim električnim graničnim uslovima, PEC.

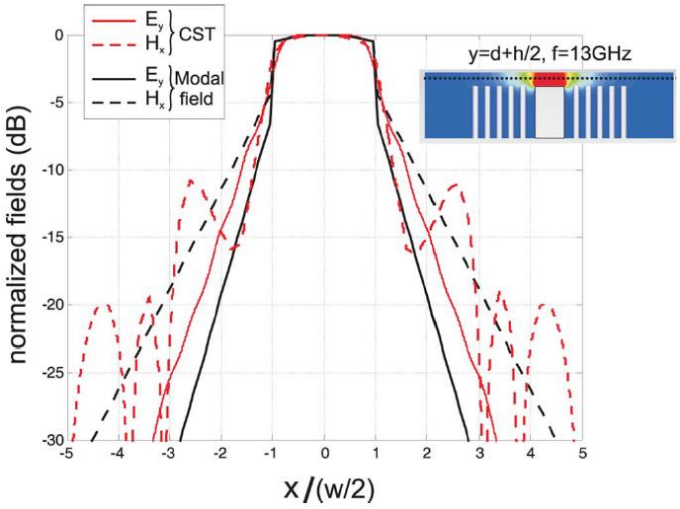
Na osnovu upoređenih rezultata sa slike 2.20, numeričko rešenje dobro odgovara učestanostima unutar zabranjene zone od 10 do 20 GHz, odnosno aproksimaciji kvazi-TEM moda koji se prostire na površini grebena, kao i za učestanosti ispod zabranjene zone. Na višim učestanostima, iznad zabranjene zone, numeričko rešenje ne daje odgovarajuće rezultate pošto je za svaku oblast prilikom proračunavanja uzet samo osnovni mod, dok modovi višeg reda nisu razmatrani, [15].

Na slici 2.21, prikazani su normalizovane amplitude E_y i H_x komponenti polja, za vrednosti dobijene numeričkom analizom i softverskim alatom, na polovini vazdušnog procepa između dve paralelne ploče, $y = d + h/2$, na učestanosti od 13 GHz.



(a) *(b)*

Slika 2.20 Grebenasti talasovod na bazi procepa: a) super ćelija sa definisanim graničnim uslovima, b) disperzioni dijagram sa upoređenim rezultatima numeričke analize i simulacija, [15]



Slika 2.21 Normalizovane amplitude E_y i H_x komponenti polja, za vrednosti dobijene numeričkom analizom i softverskim alatom, [15]

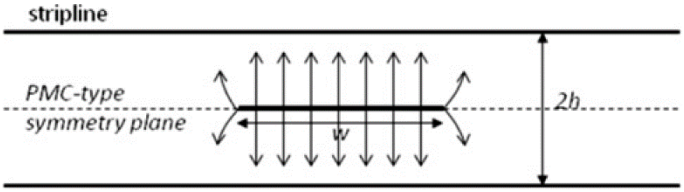
Sa slike 2.21, može se primetiti znatno slabljenje komponenti polja udaljavanjem od oblasti grebena, s time da komponente polja E_y i H_x pokazuju različite stepene slabljenja. Naime, komponenta H_x manje slabi što proizilazi iz činjenice da je konstanta slabljenja koja utiče na ovu komponentu skoro konstantna u opsegu učestanosti zabranjene zone, dok je konstanta slabljenja koja utiče na komponentu E_y značajno zavisna od učestanosti sa promenom vrednosti od 100 dB/λ_0 u opsegu zabranjene zone, [14, slika 13]. Takođe, ako se uporede komponente H_x dobijene numeričkom analizom i simulacijama, vidi se uticaj periodičnosti metalnih stubića kod simulacionih rezultata u vidu oscilacija, što nije slučaj kod numeričkih rezultata, pošto periodičnost metalnih stubića nije uzeta u obzir u površinskom modelu. Međutim, komponenta E_y ne prikazuje oscilacije, pošto ova komponenta mnogo jače slabi u pravcu x ose, za razliku od komponente H_x, usled čega periodičnost metalnih stubića nema uticaj, [15].

2.3.3 Karakteristična impedansa grebenastog talasovoda na bazi procepa

Kao dobra aproksimacija za proračunavanje karakteristične impedanse grebenastog talasovoda na bazi procepa, mogu se primeniti jednačine mikrostrip i striplajn vodova, samo u opsegu učestanosti zabranjene zone. Aproksimacija karakteristične impedanse talasovoda unutar procepa može se predstaviti karakterističnom impedansom mikrostrip linije:

$$Z_k = \frac{Z_0 h}{w} \tag{2.18}$$

gde je Z_k talasna impedansa u vazduhu, w je širina grebena i h je visina procepa između grebena i gornje PEC površine. Ovaj izraz je validan kao aproksimacija kada je $w >> h$, što isto važi i za mikrostrip liniju. Smatra se da je konstanta prostiranja jednaka konstanti prostiranja u vazduhu. Ova pojednostavljena teorija važi u opsegu učestanosti u kojem realizacija PMC površine radi dovoljno blizu idealnog PMC-a. Metalni provodnik je u većini slučajeva dobra aproksimacija PEC površine u dosta širokom opsegu učestanosti.



Slika 2.22 Konfiguracija striplajn voda, *[20]*

Takođe, grebenasti talasovod unutar procepa može se posmatrati kao polovina striplajn konfiguracije, prikazana na slici 2.22, koja se sastoji od dve paralelne ploče PEC tipa, na udaljenosti od 2*h*, razdvojene dielektričnom podlogom, između kojih je na polovini, odnosno na udaljenosti *h* od obe PEC metalne ploče, umetnut striplajn vod, [20].

Kao što se može videti sa slike 2.22, na sredini striplajn konfiguracije u liniji sa striplajn vodom postoji ravan simetrije PMC tipa, pa sa tog aspekta polovina striplajna podseća na idealan grebenasti talasovod, odnosno dve polovine grebenastog talasovoda koji su PMC površinama naslonjene jedna na drugu. Prema tome, za proračunavanje karakteristične impedanse idealnog grebenastog talasovoda mogu se iskoristiti jednačine striplajn voda. Takođe, ove jednačine mogu se iskoristiti kao aproksimacije za realne grebenaste talasovode na bazi procepa. Karakteristična impedanse idealnog grebenastog talasovoda na bazi procepa data je izrazom, [20]:

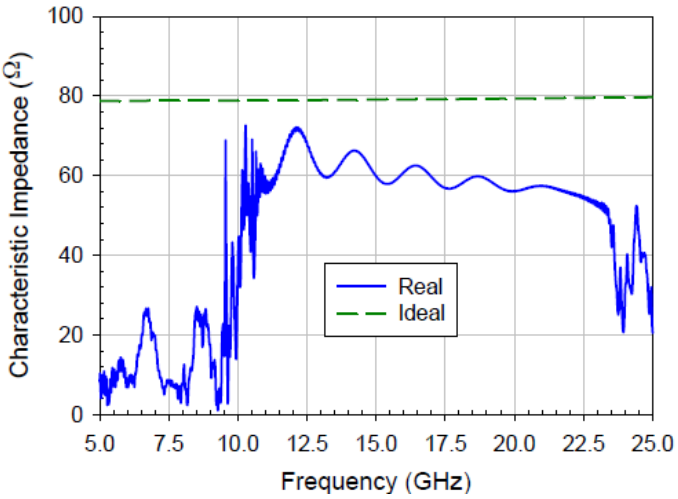
$$Z = 2Z_{stripline}\,, \tag{2.19}$$

gde je $Z_{striplajn}$ [29]:

$$Z_{stripline} = \frac{\eta}{4}\left(\frac{W_e}{2h} + 0.441\right)^{-1}, \tag{2.20}$$

$$\frac{W_e}{2h} = \frac{W}{2h} - \begin{cases} 0 & , \frac{W_e}{2h} > 0.35 \\ \left(0.35 - \frac{W_e}{2h}\right)^2 & , \frac{W_e}{2h} < 0.35 \end{cases} \tag{2.21}$$

Jednačine za striplajn primenjene na realni grebenasti talasovod daju brzu procenu njegove karakteristične impedanse. Na slici 2.23, prikazano je poređenje karakterističnih impedansi idealnog i realnog grebenastog talasovoda, dobijenih pomoću softvera za analizu RF i mikrotalasnih kola. Može se primetiti da aproksimacija nije veoma precizna u slučaju realnog grebenastog talasovoda, usled talasanja njegove karakteristične impedanse u frekvencijskom domenu, što je uslovljeno periodom PMC površine. Promena širine grebena realnog grebenastog talasovoda može se iskoristiti za podešavanje 50 Ω-ske impedanse, bez uticaja na korisni opseg talasovoda.



Slika 2.23 Poređenje karakterističnih impedansi idealnog i realnog grebenastog talasovoda, [20]

2.3.4 Uticaj geometrijskih parametara jedinične ćelije na modove disperzionog dijagrama

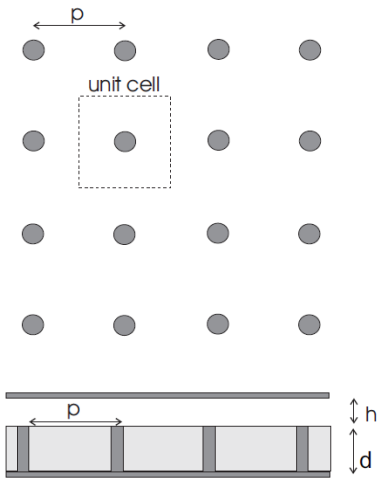
Svi geometrijski parametri jediničnih ćelija imaju manji ili veći uticaj na opseg učestanosti zabranjene zone. Zabranjena zona je određena donjom i gornjom graničnom učestanošću, odnosno početnom učestanošću na kojoj talasi prestaju da se prostiru unutar procepa i krajnjom učestanošću na kojoj talasi počinju opet da se prostiru.

Do formiranja zabranjene zone dolazi kada oblast između PEC i PMC površina prestaje da se ponaša induktivno i počinje da se ponaša dominantno kapacitivno, i taj prelazak određuje donju graničnu učestanost zabranjene zone, pri čemu površina načinjena od stubića ili uzemljenih pečeva, ostvaruje značajan porast impedanse. Na donju graničnu učestanost zabranjene zone deluje debljina podloge ($d = \lambda_0/4$), odnosno visina metalnih stubića ili dužina vija.

Gornja granična učestanost zabranjene zone predstavlja tačku u kojoj impedansa značajno opadne, i površina prestaje da se ponaša kapacitivno, već postaje dominantno induktivna ($d + h = \lambda_0/2$), [18].

Parametar koji dominantno utiče na širinu zabranjene zone je visina vazdušnog procepa između dve paralelne ploče, h. To je zajednički parametar za sve talasovode na bazi procepa, nezavisno od PMC površine.

Za PMC površine načinjene od metalnih stubića, prikazane na slici 2.24, za slučaj kada su metalni stubići gusto raspoređeni, odnosno manjih perioda p, dobijamo šire opsege učestanosti zabranjene zone, i obrnuto.



Slika 2.24 PMC površina sa metalnim stubićima u kvadratnoj rešetki, [18]

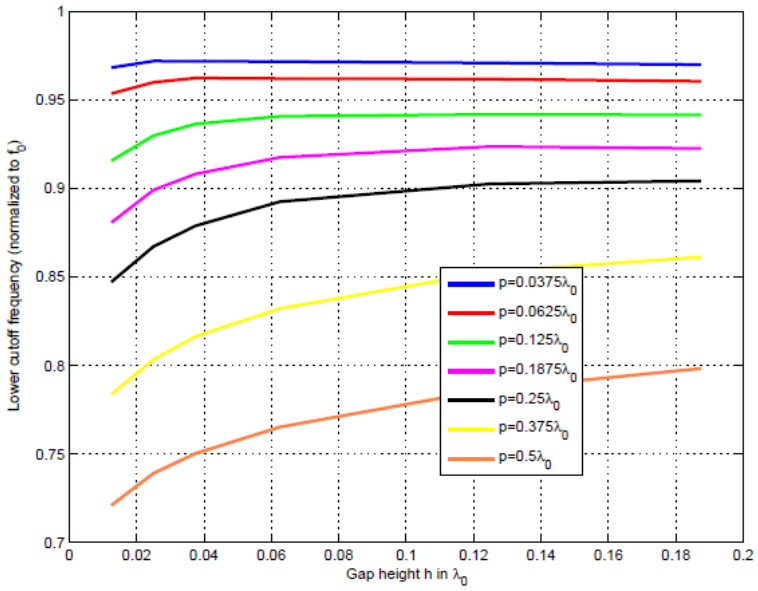
Na slici 2.25, prikazano je ponašanje gornje i donje granične učestanosti zabranjene zone, u funkciji promene visine vazdušnog procepa *h*, za različite vrednosti periode *p*. Sve vrednosti su normalizovane sa učestanošću f_0 = 3.75 GHz, [18].

Na donju graničnu učestanost zabranjene zone značajno utiče perioda stubića, naime povećanjem periode smanjuje se učestanost, što pripisujemo povećanju efektivne električne dužine stubića, slika 2.25(a). Gornja granična učestanost se za manje periode ne menja značajno i uglavnom je konstantna za različite visine vazdušnog procepa, slika 2.25(b). Međutim, za veće periode gornja granična učestanost se dramatično smanjuje, što možemo pripisati prostiranju novih modova u prostoru između metalnih stubića. Sa slike 2.25(b), može se primetiti da se za periode veće od $\lambda_0/4$, gornja granična učestanost ne menja značajno sa promenom visine vazdušnog procepa. Mada, opseg učestanosti zabranjene zone postaje širi, pošto se donja granična učestanost značajno smanjuje za veće periode, slika 2.25(a), [18].

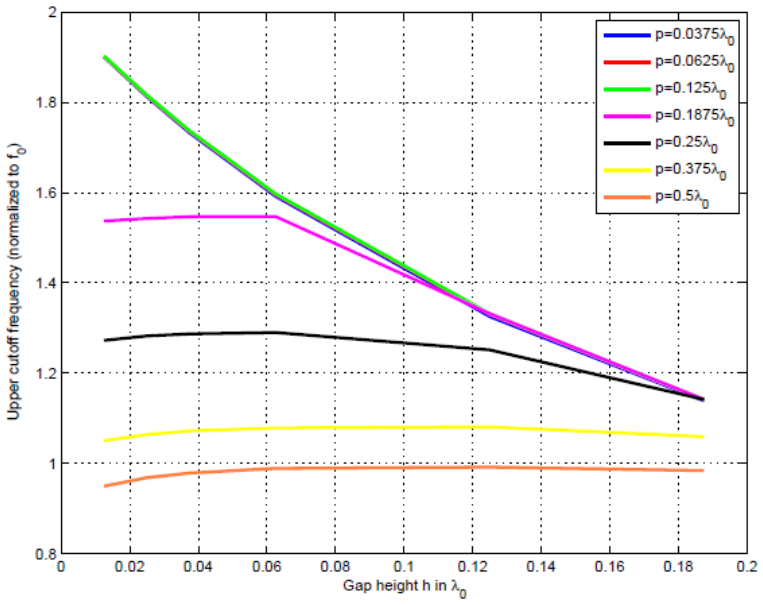
Zavisnost dimenzija periode i visine vazdušnog procepa, proizilazi iz činjenice da ako su metalni stubići zbijeni, usled čega imamo vrlo male periode, gornja granična učestanost zabranjene zone određena je učestanošću odsecanja moda između paralelnih ploča, koji počinje da se prostire kada je zbir visine vazdušnog procepa i visine stubića jednak $\lambda_0/2$, ($d + h = \lambda_0/2$), [18] (prvi TE mod).

Iz navedenog, možemo zaključiti da kada su nam potrebni široki opsezi učestanosti zabranjenih zona, potrebno je koristiti što manje periode stubića i manje visine procepa.

Kada poredimo odnos prečnika stubića i periode (r/p) sa visinom vazdušnog procepa *h*, najširi opsezi zabranjene zone dobijaju se za male visine procepa i male periode. Kada su prečnici stubića značajno manji od perioda, strukture sa manjim periodama daju najšire opsege, dok za veće prečnike, strukture sa većim periodama daju šire opsege, [18]. Kada se umesto stubića kružnog poprečnog preseka koriste stubići kvadratnog poprečnog preseka, sa dimenzijama $2r = a$, dobijaju se vrlo slični rezultati za širine zabranjene zone, [18].



(a)

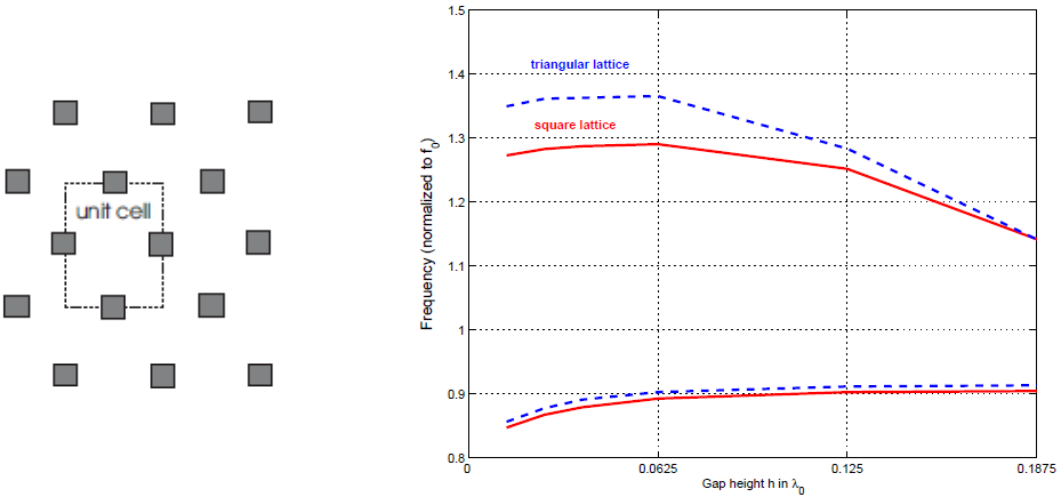


(b)

Slika 2.25 Granične učestanosti zabranjene zone u funkciji visine vazdušnog procepa, h, i različitih dimenzija perioda, p: a) donja učestanost, b) gornja učestanost, [18]

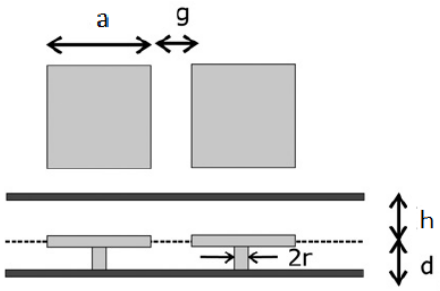
Uobičajeno, raspored metalnih stubića može se definisati za slučajeve kvadratne rešetke (slika 2.24) ili trougaone rešetke (slika 2.26(a).

Na slici 2.26, prikazane su gornje i donje granične učestanosti za slučajeve kvadratne i trougaone rešetke, u funkciji visine procepa. Možemo primetiti da su donje granične učestanosti kod obe rešetke vrlo slične, dok trougaona rešetka nudi više gornje granične učestanosti zabranjene zone za manje vrednosti visine procepa, *h*.



(a) *(b)*

Slika 2.26 Trougaona rešetka: a) izgled rasporeda metalnih stubića, b) poređenje gornje i donje granične učestanosti sa kvadratnom rešetkom, [18]



Slika 2.27 Struktura sa uzemljenim peč rezonatorima sa kritičnim dimenzijama, [18]

Struktura sa uzemljenim peč rezonatorima za razliku od metalnih stubića, pronalazi primenu u kolima na nižim učestanostima, usled prisustva dielektrične podloge potrebne za polaganje peč rezonatora. Sa druge strane, kola realizovana sa uzemljenim peč rezonatorima, nude značajno tanje strukture, niskog profila, za razliku od kola sa metalnim stubićima. Na slici 2.27 prikazana je struktura uzemljenog peč rezonatora sa kritičnim dimenzijama.

Uticaj razmaka između pečeva *g*, na opseg učestanosti zabranjene zone nije značajan, osim za male visine procepa, *h*. Promena prečnika uzemljene vije *r*, utiče istovremeno na promenu donje i gornje granične učestanosti, što za posledicu ima pomeranje zabranjene zone u spektru. Za veće prečnike vije imamo pomeranje zabranjene zone ka višim učestanostima, kao što je prikazano na slici 2.28, [18].

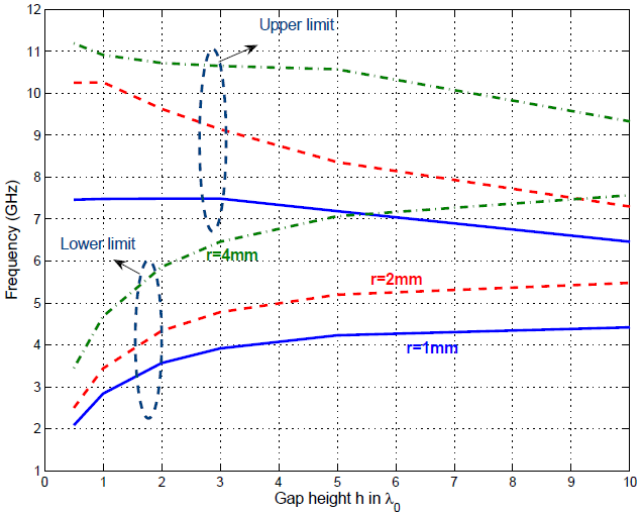
Pomeranje graničnih učestanosti u spektru promenom prečnika vije, nastaje usled promene rezonanci unutar strukture. Naime, povećavanjem prečnika vije induktivnost u petlji se smanjuje što sa sobom nosi povećanje učestanosti, [18].

Debljina dielektrične podloge *d*, odnosno udaljenost peča od donje provodne površine, značajno utiče na donju graničnu učestanost zabranjene zone, koja naglo opada ka nižim vrednostima kada se debljina dielektrika povećava, slika 2.29. Ova promena ne utiče na gornju graničnu učestanost za male

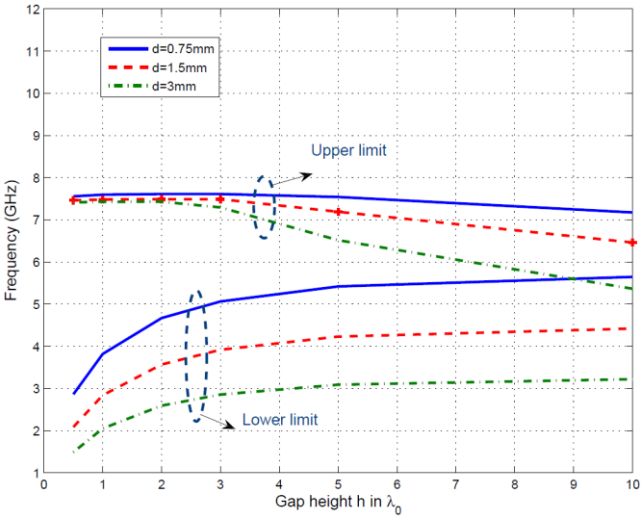
visine procepa, dok za srednje i veće visine procepa *h*, gornja granična učestanost počinje da prati trend donje granične učestanosti, [18].

Pozicija vije ispod peča takođe utiče na širinu opsega zabranjene zone. Naime, najširi opseg dobijamo za viju pozicioniranu u sredini peča, dok se opseg smanjuje kada se vija pomera ka krajevima peča, slika 2.30. Pomeranje vije najznačajanije utiče na smanjenje gornje granične učestanosti zabranjene zone, [18].

Poslednji parametar od značaja kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorom je permitivnost dielektrične podloge. Povećanje permitivnosti najviše utiče na pomeranje donje granice zabranjene zone ka višim učestanostima, što rezultuje smanjenjem opsega zabranjene zone, [18].



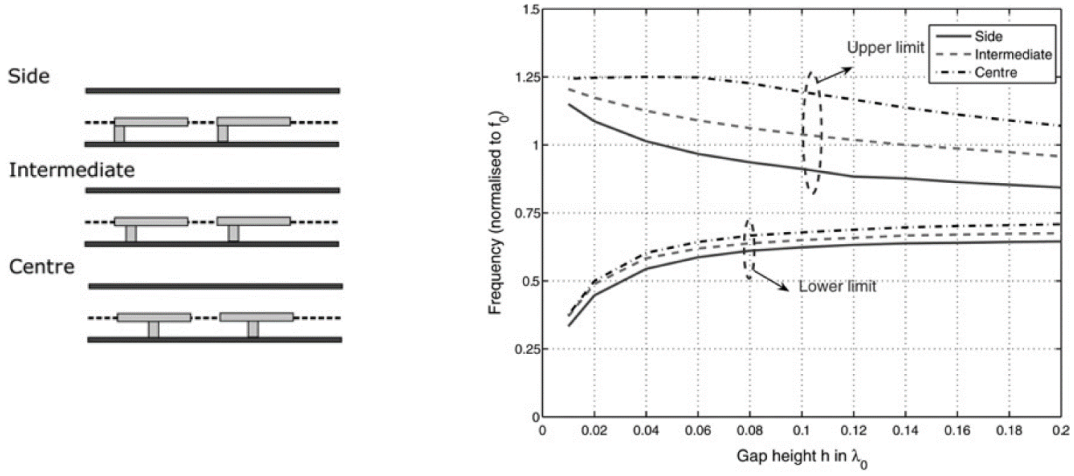
Slika 2.28 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite prečnike vije r, u funkciji visine procepa h, [18]



Slika 2.29 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite debljine podloge d, u funkciji visine procepa h, [18]

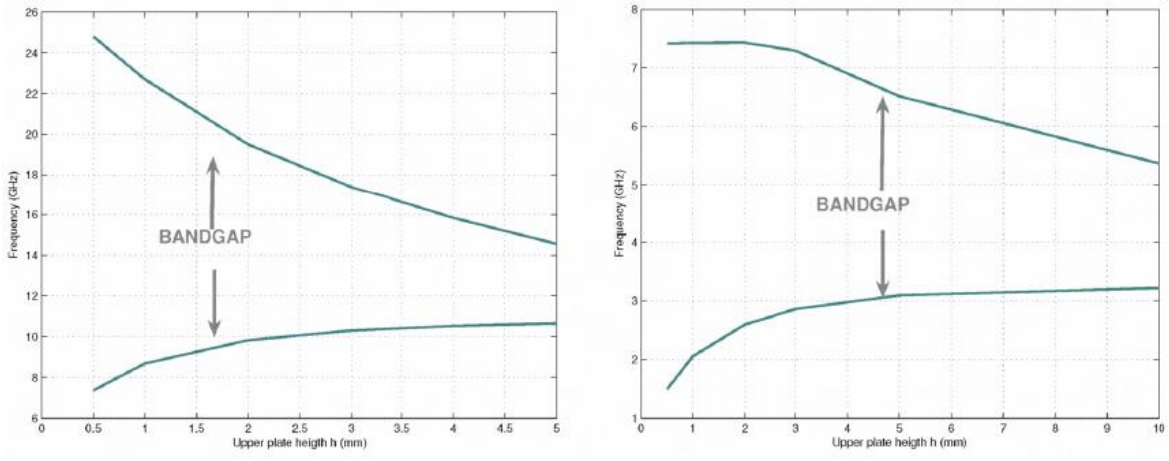
Poređenje strukture sa metalnim stubićima i uzemljenim peč rezonatorima, daje nam uvid da je najvažniji parametar za dobijanje širokog opsega zabranjene zone, visina procepa *h*, koja treba da bude što manja. Na slici 2.31, prikazano je poređenje disperzionih dijagrama struktura sa metalnim stubićima i uzemljenim peč rezonatorima, za različite visine procepa *h*, [30].

Sa slike 2.31, može se primetiti da su odzivi struktura sa metalnim stubićima i uzemljenim peč rezonatorima dosta slični. Naime, kod metalnih stubića mogu se postići širine opsega od tri oktave, dok strukture sa uzemljenim peč rezonatorima, sa najnižim vrednostima visine procepa, postižu širine opsega zabranjene zone od skoro četiri oktave, [30].



(a) *(b)*

Slika 2.30 Promene graničnih učestanosti zabranjene zone kod struktura sa uzemljenim peč rezonatorima, za različite pozicije vije ispod peč rezonatora: a) tri različit pozicije, b) poređenje gornje i donje granične učestanosti za različite pozicije vije u funkciji visine procepa h, [18]



(a) *(b)*

Slika 2.31 Poređenje graničnih učestanosti zabranjene zone za različite visine procepa, h: a) strukture sa stubićima, b) strukture sa uzemljenim peč rezonatorima, [30]

2.4 Zaključak

U ovoj glavi prikazane su teorijske osnove tehnologije talasovoda na bazi procepa. Obrazložen je razlog zbog kojeg talasovodi na bazi procepa predstavljaju alternativnu tehnologiju za izradu kola, i koje ih to karakteristike čine boljim izborom za projektovanje mikrotalasnih kola, u poređenju sa konvencionalnim talasovodima ili mikrostrip vodovima.

U prvom delu predstavljen je koncept tehnologije talasovoda na bazi procepa, preko mekih i tvrdih površina iz akustike, koje su zatim realizovane metalnim kanalima i udubljenjima u elektromagnetici. Prikazan je princip dobijanja lokalizovanih talasa kvazi-TEM modova, postavljanjem provodne ploče na rastojanju $\lambda_0/4$ od tvrdih površina, realizovanih longitudinalnim kanalima i ispupčenjima u metalu. Ovakve strukture su prve realizacije koje su se ponašale vrlo slično današnjim talasovodima na bazi procepa. Takođe, u prvom delu predstavljen je i objašnjen termin *zabranjene zone*.

U drugom delu ove glave predstavljen je način ostvarivanja prostiranja unutar zabranjene zone uvođenjem talasovodnih elemenata, poput grebena, kanala ili mikrostrip grebena. Takođe su date realizacije i vrste talasovoda na bazi procepa, zajedno sa primerima fabrikacije.

Predstavljanje osnovnih gradivnih elemenata na primeru mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa dato je u trećem delu ove glave. Grebenasti talasovod na bazi procepa je detaljno analiziran, počevši od koeficijenta refleksije površine metalnih stubića postavljenih unutar dielektričnog materijala, zatim disperzionih karakteristika površine metalnih stubića nadkrivenih provodnom pločom na rastojanju manjem od $\lambda_0/4$, što predstavlja uslov dobijanja zabranjene zone u željenom opsegu učestanosti. Takođe, analizirane su disperzione karakteristike kada se unutar oblasti metalnih stubića postavi metalni greben širine w. Dobijeni numerički rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim softverskim alatima i ustanovljeno je odgovarajuće podudaranje, posebno za učestanosti unutar zabranjene zone. Dodatno, razmatrano je slabljenje koje se vidi bočno od grebena, u oblasti između metalnih stubića i gornje provodne ploče.

U nastavku trećeg dela ove glave data je aproksimacija karakteristične impedanse grebenastog talasovoda na bazi procepa korišćenjem jednačina za mikrostrip i striplajn konfiguracije. Karakteristična impedansa idealnog grebenastog talasovoda na bazi procepa dva puta je veća od karakteristične impedanse striplajn konfiguracije. Ovakva aproksimacija dovoljno je dobra i za utvrđivanje približne impedanse realnog grebenastog talasovoda na bazi procepa, mada u realnom slučaju periodičnost same strukture prouzrokuje talasanje karakteristične impedanse.

Uticaj geometrijskih parametara na širinu zabranjene zone i njihova analiza dati su u na kraju ove glave. Predstavljeni su slučajevi za metalne stubiće i uzemljene peč rezonatore, za kružne i kvadratne poprečne preseke metalnih stubića i različite rasporede metalnih stubića, u kvadratne ili trougaone rešetke. Došlo se od zaključka da visina vazdušnog procepa između dve paralelne ploče dominantno utiče na širinu opsega učestanosti zabranjene zone, kod svih predloženih realizacija, gde se za manje razmake dobijaju veći opsezi zabranjene zone, i obrnuto.

Glava 3. Realizacije kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa

Mikrotalasni talasovodi, filtri i sprežnici snage predstavljaju osnovne komponente komunikacionih sistema čije su performanse od kritične važnosti za njihov rad. Talasovodna tehnologija tradicionalno je korišćena pošto nudi male gubitke, odnosno velike faktore dobrote, mada složeni fabrikacioni proces rezultuje velikim strukturama, kao i visokim cenama na višim učestanostima. Sa druge strane, planarne vodove kao što su mikrostrip i striplajn, karakterišu značajni dielektrični gubici na visokim učestanostima, kao i neželjeni gubici usled zračenja.

Tehnologija talasovoda na bazi procepa, predložena je kao alternativa konvencionalnim tehnologijama u prevazilaženju njihovih nedostataka. Naime, usled geometrije zasnovane na dve paralelne ploče, PEC-PMC, talasovodi na bazi procepa nude mogućnost fabrikacije bez provodnog kontakta između dve ploče. Time je ostvaren jeftiniji proces fabrikacije i dobijene su strukture sa otvorenim bočnim stranama, koje mogu da posluže za hlađenje kola. Takođe, tehnologije talasovoda na bazi procepa omogućavaju prostiranje talasa bez ili sa zanemarljivo malim dielektričnim gubicima.

Integracija aktivnih RF komponenti, pasivnih komponenti i antena u jedan te isti talasovod na bazi procepa predstavlja konačan cilj primene talasovoda na bazi procepa. Integracija zahteva kompatibilnost planarnih struktura i konvencionalnih talasovoda, kako bi mogli biti iskorišćeni u monolitnim mikrotalasnim integrisanim kolima (engl. *Monolithic Microwave Integrated Circuits* - MMIC), čiji su izlazi i ulazi uobičajeno realizovani 50-omskim transmisionim linijama.

Do danas u literaturi, u tehnologiji talasovoda na bazi procepa realizovana su različita filtarska kola, sprežnici i delitelji snage, antenska kola, kola za potiskivanje viših modova, kao i primena u kućištima za pakovanje kola koja zasnivaju rad na visokim učestanostima. Pošto kola realizovana u tehnologiji talasovoda na bazi procepa zahtevaju mala visine vazdušnog procepa, odnosno mala rastojanja između paralelnih ploča, poseban značaj u realizaciji posvećen je način uvođenja elektromagnetskog talasa unutar tih procepa. Strukture koje se koriste za pobude kola realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, u literaturi se nazivaju *tranzicije*.

U prvom delu ove glave dato je uopšteno poređenje i razlika između dve osnovne realizacije talasovoda na bazi procepa, grebenastog talasovoda na bazi procepa i talasovoda na bazi procepa sa kanalom, sa osvrtom na pojedine modifikacije ovih tehnologija. S obzirom na isti dominantni mod prostiranja kod grebenastog talasovoda i mikrostrip grebenastog talasovoda, ponašanje ovih talasovoda na bazi procepa možemo smatrati istim, sa razlikom da su fabrikovani u različitim tehnologijama.

U drugom delu detaljno su opisane sve do sada realizovane tranzicije talasovoda na bazi procepa iz literature. Radi lakšeg predstavljanja, tranzicije su podeljene u tri grupe; linijske, vertikalne i tranzicije kroz otvore.

Filtri realizovani u tehnologiji talasovoda na bazi procepa detaljno su razmatrani u trećem delu ove glave. Predstavljeni su filtri realizovani u svim tehnologijama i modifikacijama tehnologija talasovoda na bazi procepa.

U četvrtom delu ove glave predstavljene su realizacije sprežnika i delitelja snage, do danas realizovane u tehnologiji talasovoda na bazi procepa.

3.1 Grebenasti talasovoda na bazi procepa i talasovod na bazi procepa sa kanalom

Na osnovu uvedenih talasovodnih elemenata, grebena i kanala, razlikujemo dve vrste talasovoda na bazi procepa: grebenasti talasovod na bazi procepa [12], i talasovod na bazi procepa sa kanalom, [19].

Sa stanovišta geometrije, grebenasti talasovod na bazi procepa i talasovod na bazi procepa sa kanalom, prikazani na slici 3.1, u zavisnosti od uvedenog talasovodnog elementa, pobuđuju različite modove prostiranja unutar zabranjene zone. Kod obe vrste talasovoda PMC površina uobičajeno je realizovana metalnim stubićima. Naime, grebenasti talasovod za prostiranje talasa koristi greben, načinjen od punog metala, dok talasovod sa kanalom koristi kanal, dobijen uklanjanjem većeg broja metalnih stubića, kako bi se obezbedio prostor za prostiranje talasa između gornje i donje PEC površine. Kanal je sa strana ograničen metalnim stubićima i PMC površinom.

Postoje različite modifikacije grebenastih talasovoda na bazi procepa. Najzastupljeniji je mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa [31], zasnovan na mikrostrip grebenu realizovanom kao uzemljeni mikrostrip vod, okružen PMC površinom realizovanom uzemljenim peč rezonatorima na dielektričnoj podlozi. Korišćenje dielektrične podloge sa jedne strane pojednostavljuje fabrikaciju talasovoda primenom jeftine standardne tehnologije štampanih ploča (PCB), dok sa druge strane rezultuje većim dielektričnim gubicima, usled čega se kola realizovana mikrostrip grebenastim talasovodima koriste na nižim učestanostima. Druga vrsta modifikacije grebenastog talasovoda na bazi procepa jeste invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa [23], [24], dobijen polaganjem invertovanog mikrostrip voda na PMC površinu realizovanu pomoću metalnih stubića.

Talasovod na bazi procepa sa kanalom može biti realizovan u dve konfiguracije; sa vertikalno i horizontalno polarizovanim talasom, [19]. Razlika u geometriji za ove dve konfiguracije je u dubini kanala. Naime, kanal talasovoda koji podržava prostiranje horizontalno polarizovanog talasa je dublji i jednim delom sa potpuno zatvorenim zidovima, [19].

Sa stanovišta elektromagnetskih modova, može se smatrati da grebenasti talasovod na bazi procepa i mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa odlikuje isto ponašanje, s obzirom da podržavaju prostiranje dominantnog kvazi-TEM moda, što je takođe i slučaj kod invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa. Talasovod na bazi procepa sa kanalom razlikuje se od navedenih talasovoda pošto podržava prostiranje dominantnog TE_{10} moda, kao konvencionalni talasovodi.

Karakteristično za sve vrste i modifikacije talasovoda na bazi procepa jeste uslov da gornji provodni sloj (PEC) mora biti na rastojanju manjem od $\lambda/4$ od PMC površine.

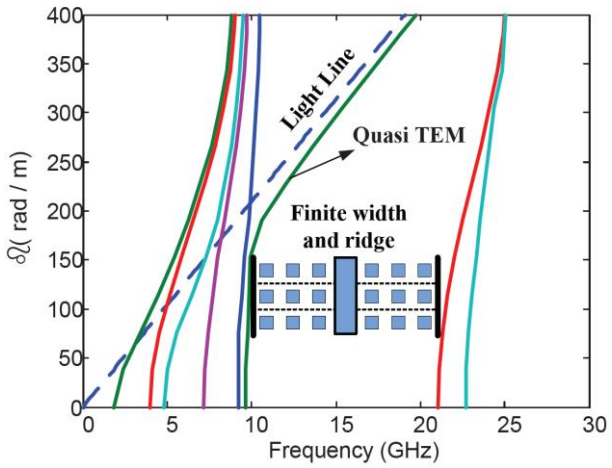
Na slici 3.1, prikazani su pogledi sa strane grebenastog talasovoda na bazi procepa i talasovoda na bazi procepa sa kanalom, za slučaj vertikalno polarizovanog talasa. Takođe, prikazani su vektori električnog polja dominantnog moda prostiranja, pojedinačno za svaki talasovod.

Dimenzije PMC površina talasovoda na bazi procepa sa slike 3.1, približno su iste, pa se talasovodi mogu uporedo posmatrati sa stanovišta opsega učestanosti zabranjene zone. Analizom jedinične ćelije metalnih stubića PMC površine određen je opseg učestanosti zabranjene zone koji se proteže od 10 do 23 GHz.

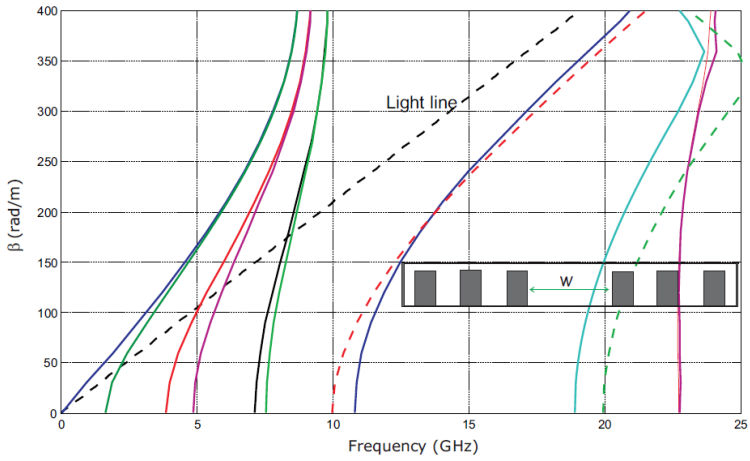


(a) *(b)*

Slika 3.1 Pogledi sa strane talasovoda na bazi procepa sa: a) grebenom, b) kanalom



(a)



(b)

Slika 3.2 Disperzioni dijagram super ćelija: a) grebenasti talasovod na bazi procepa, [20], b) talasovod na bazi procepa sa kanalom, [19]

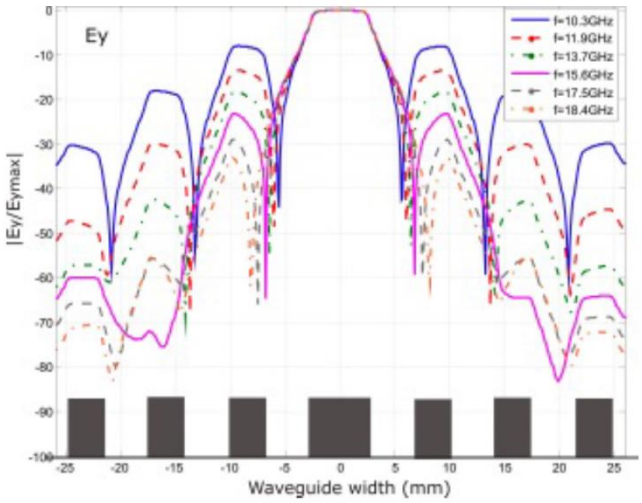
Kao što je navedeno, uvođenjem talasovodnog elementa, grebena ili kanala, unutar PMC površine načinjene od metalnih stubića ostvaruje se prostiranje talasa duž grebena ili kanala na učestanostima unutar zabranjene zone. Za analizu moda koji se prostire unutar zabranjene zone koristi se super ćelija talasovoda. Analizom super ćelije grebenastog talasovoda na bazi procepa i super ćelije talasovoda sa

kanalom na bazi procepa, dobijaju se disperzioni dijagrami prikazani na slici 3.2. U prilozima slika 3.2(a) i 3.2(b), prikazane su super ćelije grebenastog talasovoda i talasovoda sa kanalom, respektivno. Sa disperzionih dijagrama, može se zaključiti da tri metalna stubića postavljena bočno sa obe strane talasovodnih elemenata dovoljno dobro opisuju ponašanje talasovoda na bazi procepa.

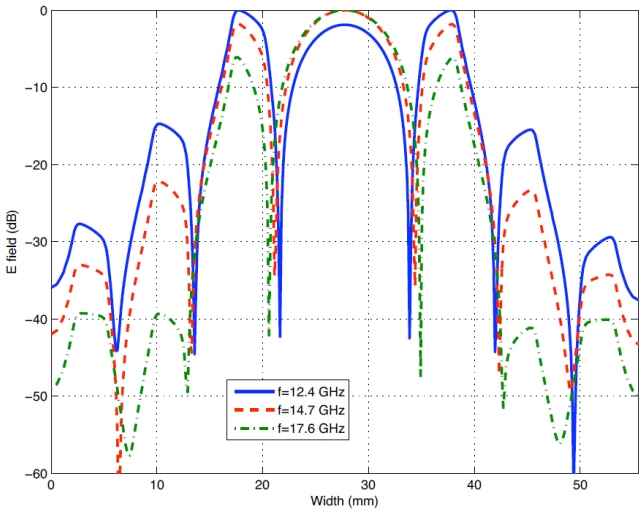
Pojava nekoliko modova ispod 10 GHz i iznad 20 GHz, nastaje usled bočnog ograničenja geometrije super ćelija talasovoda. Modovi ispod i iznad zabranjene zone predstavljaju modove strukture sa paralelnim pločama (TM i TE modovi), koji se pojavljuju ispod učestanosti odsecanja talasovoda na bazi procepa i odlaze u nepropusnu oblast ispod donje granične učestanosti zabranjene zone, pa se zatim ponovo pojavljuju ubrzo iznad gornje granične učestanosti zabranjene zone. Treba napomenuti da ovi modovi nisu od značaja prilikom projektovanja talasovoda na bazi procepa, ali predstavljaju sastavni deo svake od realizacija talasovoda na bazi procepa, [20].

Kvazi-TEM mod dobijen uvođenjem grebena unutar PMC površine metalnih stubića, prikazan na disperzionom dijagramu na slici 3.2(a), pokriva opseg učestanosti zabranjene zone od 10 do 19 GHz, sa tendencijom da malo remeti modove strukture sa paralelnim pločama ispod 10 GHz. Takođe, uvođenjem grebena utiče se na formiranje novog moda koji se pojavljuje na učestanosti od 21 GHz. To je mod višeg reda grebenastog talasovoda na bazi procepa, koji poseduje raspodelu vertikalnog električnog polja sa asimetričnom sinusoidnom zavisnošću duž grebena i ima nultu vrednost amplitude po sredini grebena, [20]. Učestanost odsecanja kvazi-TEM moda koji se prostire unutar zabranjene zone kod grebenastih talasovoda na bazi procepa nije određena samo širinom grebena, već zavisi i od rastojanja grebena od prvog reda metalnih stubića.

Na disperzionom dijagramu na slici 3.2(b), prikazan je mod prostiranja talasovoda na bazi procepa sa kanalom za vertikalno polarizovan slučaj. Mod prostiranja je sličan dominantnom modu TE_{10} kod konvencionalnih talasovoda, sa ortogonalnim električnim poljem u odnosu na PMC površinu, slika 3.1(b). Kod vertikalno polarizovanog talasovoda raspodela polja je kosinusnog tipa, [19]. Širina kanal talasovoda na bazi procepa uobičajeno se bira da bude polovina talasne dužine $\lambda/2$, na učestanosti odsecanja. Dodatno, na slici 3.2(b), isprekidanom crvenom linijom prikazan je mod prostiranja konvencionalnog talasovoda čija je širina jednaka širini kanala talasovoda na bazi procepa. Poređenjem modova može se zaključiti da modovi talasovoda imaju slično ponašanje, ali sa različitim učestanostima odsecanja. Poređenje uticaja promene širine kanala na učestanost odsecanja talasovoda na bazi procepa sa kanalom i konvencionalnog talasovoda, detaljno je analizirano u [32].



(a)



(b)

Slika 3.3 Vertikalne komponente električnog polja normalnog na pravac prostiranja talasa kod talasovoda na bazi procepa: a) sa grebenom, [20], b) sa kanalom, [19]

Iako se smatra da bočne jedinične ćelije treba da se prostiru u beskonačnost, njihovo skraćivanje na tri reda metalnih stubića, sa obe strane talasovoda na bazi procepa, dokazano zadovoljava eksponencijalno slabljenje elektromagnetskog polja u PEC-PMC oblasti. Naime, elektromagnetsko polje talasa koji se prostire duž talasovodnog elementa značajno slabi već nakon prvog reda metalnih stubića, [20], [33], što je prikazano na vertikalnim komponentama električnog polja kod grebenastog talasovoda na bazi procepa i talasovoda na bazi procepa sa kanalom, na slici 3.3. Komponente električnog polja posmatrane su u sredini vazdušnog procepa i normalne su na pravac prostiranja talasa duž grebena odnosno kanala, na različitim učestanostima unutar zabranjene zone.

Na slici 3.3, komponente električnog polja pokazuju bočno slabljenje polja udaljavanjem od sredine grebena odnosno kanala, iznad metalnih stubića. Jačina polja menja se periodično usled periodičnog rasporeda metalnih stubića. Sa slike 3.3(a), može se primetiti da za učestanosti iznad 15 GHz jačina električnog polja opadne ispod 60 dB, [20], na udaljenostima od 20 mm (1λ) od centra grebena. Sličan

trend bočnog slabljenja električnog polja imamo i kod talasovoda na bazi procepa sa kanalom, slika 3.3(b), s tim da je na učestanosti od 12,4 GHz jačina polja veća iznad prvog reda stubića, u odnosu na centar kanala, što je uslovljeno malom udaljenosti vrhova stubića od gornje provodne ploče, dok je već u drugom redu stubića jačina polja ispod 15 dB na svim učestanostima, [32]. Može se primetiti da je slabljenje izraženije na višim učestanostima u oba slučaja talasovoda na bazi procepa, pošto je talas više lokalizovan u oblasti iznad grebena i unutar kanala.

Poređenje osnovnih karakteristika grebenastog talasovoda na bazi procepa, talasovoda na bazi procepa sa kanalom i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, objedinjene su u tabeli 3.1.

TABELA 3.1 POREĐENJE OSNOVNIH KARAKTERISTIKA GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA, TALASOVODA NA BAZI PROCEPA SA KANALOM I MIKROSTRIP GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Topologija talasovoda	***Tehnologija izrade***	***Cena izrade***	***Modovi***	***Dimenzije***	***Gubici***
Greben	CNC	Viša	Kvazi-TEM	Velike	Mali
Kanal	CNC	Viša	TE_{10}	Velike (izražene bočne)	Mali
Mikrostrip greben	PCB	Niža	Kvazi-TEM	Manje	Srednji

Usled značaja koji topologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa ima u odnosnu na druge modifikacije grebenastih talasovoda na bazi procepa u literaturi, može se smatrati da je poređenje njegovih karakteristika sa karakteristikama osnovnih topologija talasovoda na bazi procepa opravdano. Naime, iako mikrostrip grebenasti talasovodi na bazi procepa za realizaciju koriste dielektrične podloge koje unose gubitke, izraženije na višim učestanostima, dielektrične podloge dozvoljavaju značajnu fleksibilnost u projektovanju PMC površina i smanjenje ukupnih dimenzija talasovoda. Takođe, u poređenju sa tehnologijama fabrikacije grebenastog talasovoda i talasovoda sa kanalom, mikrostrip grebenasti talasovodi nude jeftiniju i manje zahtevnu fabrikaciju primenom standardne tehnologije štampanih ploča. Takođe, integracija kola projektovanih u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, omogućava lakšu integraciju sa kolima fabrikovanim u planarnim tehnologijama, na primer u mikrotalasnim monolitnim integrisanim kolima, MMIC.

3.2 Pobuda kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa

Vrlo značajan aspekt prilikom projektovanja talasovoda na bazi procepa jeste način pobude talasovodnih elemenata. Naime, usled malih visina vazdušnog procepa postoji potreba da se na odgovarajući način pobudi dominantni mod prostiranja talasovodnog elementa, kvazi-TEM ili TE_{10} mod.

U literaturi, strukture koje se koriste za pobudu talasovoda na bazi procepa uobičajeno se nazivaju *tranzicije*. Tranzicije predstavljaju različite prilagodne strukture između konektora i talasovoda, projektovane sa namerom da što bolje prilagode impedanse konektora i talasovoda na bazi procepa, u što širem opsegu učestanosti zabranjene zone. Pošto tranzicije ne mogu idealno da prilagode različite nivoe impedanse u celom opsegu učestanosti zabranjene zone, prema tome možemo zaključiti da tranzicije ograničavaju iskorišćenje opsega učestanosti zabranjene zone.

Konektori koji se najčešće koriste u projektovanju tranzicija su SMA (engl. *SubMiniature type A*), 2.92 mm ili 2.4 mm konektori. Razlog njihovog korišćenja je standardizacija mernih uređaja do 50 GHz, tzv. vektorskih analizatora mreža (engl. *Vector Network Analyzer* - VNA). Na milimetarskim učestanostima i iznad 50 GHz, koriste se tzv. zemlja-signal-zemlja (engl. *Ground-Signal-Ground* – GSG) sonde koje se postavljaju na planarne strukture poput koplanarnih talasovoda.

Problemi koji se susreću prilikom projektovanja tranzicije su kapacitivnog ili induktivnog karaktera, usled čega tranzicija postaje frekventno zavisna. U velikom broju slučajeva karakter tranzicije zavisi od kontaktne ili bez kontaktne veze konektora i talasovoda na bazi procepa. Naime, tolerancije dimenzija spojeva ili poravnavanje, na visokim učestanostima male greške mogu da pretvore u velike i u potpunosti naruše performanse projektovane tranzicije. Takođe, periodična promena karakteristične impedanse talasovoda na bazi procepa, [20], predstavlja ograničavajući faktor u projektovanju tranzicije.

Većina tranzicija predloženih u literaturi pokriva značajne širine opsega učestanosti zabranjene zone, međutim nijedna od predloženih tranzicija nije u mogućnosti da idealno prilagodi ceo opseg zabranjene zone. Međutim, postoje tranzicije u literaturi koje omogućavaju bolje prilagođenje impedanse i prema tome pružaju iskorišćenje većine opsega učestanosti zabranjene zone.

Kako bi ustanovili odgovarajuće poređenje tranzicija iz literature, možemo proceniti koliki deo opsega učestanosti zabranjene zone tranzicija pokriva, izraženo u procentima, posmatranjem povratnih gubitaka (engl. *Return Loss* - RL) rezultata *S* parametara, tj. parametara rasipanja. Naime, u praksi vrednost povratnih gubitaka do 15 dB zadovoljavaju uslove za korišćenje u strukturama koje zahtevaju visoke performanse, kao što su mikrotalasni filtri, i ukazuje na dovoljno dobro prilagođenje impedanse za primenu u mikrotalasnim aplikacijama. Sa druge strane, pojedini autori tranzicija iz literature uzimaju u obzir vrednost povratnih gubitaka do 10 dB, kao referentnu vrednost prilikom poređenja tranzicija. Prema tome, pokrivenost opsega zabranjene zone za referentne vrednosti povratnih gubitaka do 10 dB i do 15 dB biće podjednako razmatrani prilikom analize tranzicija iz literature.

U pojedinim slučajevima, kada pokrivenost opsega zabranjene zone od strane tranzicije nije navedena u literaturi, iste su dobijene očitavanjem rezultata analize tranzicija, sa simuliranih ili izmerenih *S* parametara.

Tranzicije na osnovu njihovog položaja u odnosu na talasovod na bazi procepa, možemo podeliti na:

- linijske tranzicije – postavljene duž pravca prostiranja talasovoda,
- vertikalne tranzicije – postavljenje normalno na pravac prostiranja talasovoda,
- tranzicije zasnovane na sprezi kroz otvore – prilagođenje polja/impedanse izvršeno je preko peč rezonatora kroz otvor uobičajeno realizovan u uzemljenom sloju planarne transmisione linije. Ovaj tip tranzicije uobičajeno je podvrsta vertikalnih tranzicija.

Navedene vrste tranzicija uobičajeno se koriste kod grebenastih talasovoda na bazi procepa i njihovih modifikacija, dok talasovodi na bazi procepa sa kanalom uobičajeno koriste standardne tranzicije primenjivane kod konvencionalnih talasovoda.

3.2.1 Linijske tranzicije

Linijske tranzicije predstavljaju najjednostavnije vrste tranzicija, pošto ne zahtevaju složenu realizaciju pobudnog kola između konektora i talasovoda na bazi procepa. Uobičajeno su realizovane putem induktivne ili kapacitivne sprege.

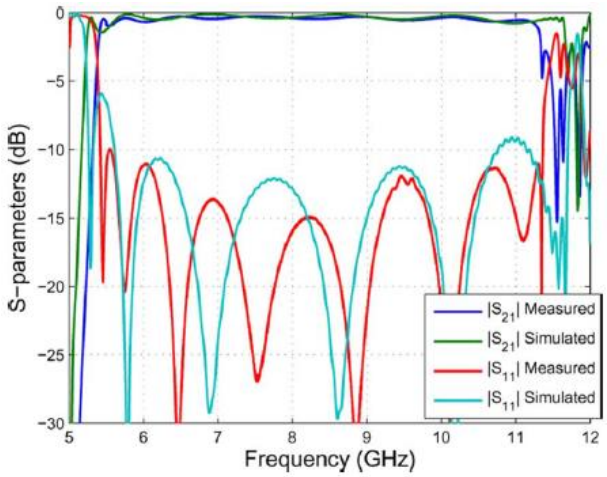
Najjednostavniji primer linijske tranzicije predstavlja direktnu vezu konektora na talasovod na bazi procepa, što je slično povezivanju koaksijalnih konektora na mikrostrip vodove. Realizacija jedne takve tranzicije sa SMA konektora na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, prikazana je na slici 3.4, [22].

Pošto je mikrostrip grebenasti talasovod okružen metalnim (bakarnim) zidom, središnji vod SMA konektora je provučen kroz otvor na metalnom zidu i zalemljen na mikrostrip grebenasti talasovod, sa spoljašnjim delom konektora pričvršćenim vijcima za zid.

Opseg učestanosti zabranjene zone dobijen analizom jedinične ćelije strukture sa slike 3.4, zasnovane na uzemljenom peč rezonatoru, iznosi od 5 do 15 GHz, [22]. Na slici 3.5, prikazani su rezultati simulacija i merenja strukture sa slike 3.4. Tokom simulacija model SMA konektora je takođe uzet u obzir.



Slika 3.4 Realizacija jednostavne linijske tranzicije sa SMA konektora na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, prikazan bez gornje provodne ploče, [22]



Slika 3.5 Poređenje simuliranih i izmerenih S parametara mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa slike 3.4, [22]

Sa slike 3.5, može se primetiti malo suženje opsega učestanosti izmerenih *S* parametara u odnosu na simulirane rezultate, što može biti prouzrokovano razlikom stvarne i simulirane vrednosti dielektrične konstante podloge. Pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone za referentnu vrednost povratnih gubitaka do 10 dB dobijen predloženom tranzicijom iznosi 60%, dok pokrivenost opsega zabranjene zone do 15 dB povratnih gubitaka iznosi 20,5%. Uneseni gubici predložene tranzicije [22] iznose oko 1 dB. Može se zaključiti da je tranzicija dobro prilagođenja, s obzirom da mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa sadrži dva zakrivljena segmenta od 90˚, koje unose dodatne gubitke, [22].

Potrebno je napomenuti da navedena tranzicija iz [22] nije detaljno razmatrana, već je iskorišćena isključivo za demonstraciju predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i njegovo poređenje sa mikrostrip vodom istih dimenzija. Ako detaljnije posmatramo tranziciju, možemo uočiti da otvor na metalnom zidu i središnji vod SMA konektora formiraju koaksijalni vod ispunjen vazduhom, kod kojeg promena prečnika otvora može da bude jedan od parametara za prilagođenje impedanse tranzicije. Sa druge strane, sužena (engl. *Tapered*) mikrostrip linija, [34], grebenastog talasovoda na bazi procepa može da se iskoristi kao dodatni parametar prilagođenja impedanse.

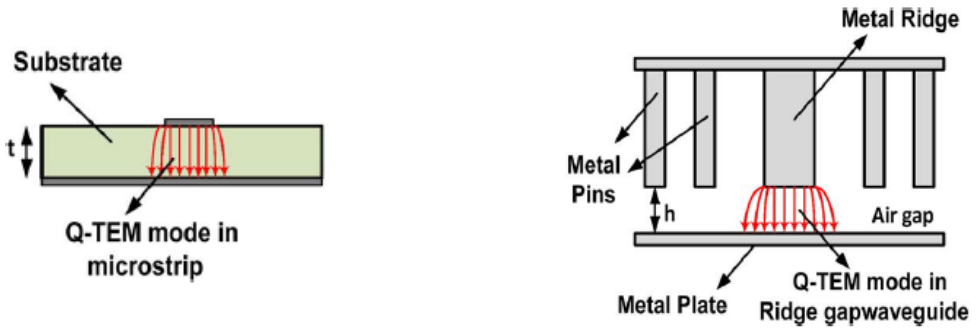
Naredne linijske tranzicije iz literature, zasnovane su na direktnoj sprezi između planarnog talasovoda; mikrostrip voda ili koplanarnog talasovod, i grebenastog talasovoda na bazi procepa. Ideja ovakve pobude proističe iz sličnosti raspodele električnog polja planarnih vodova i grebenastih talasovoda na bazi procepa, kao što je prikazano na slici 3.6. Obe konfiguracije sa slike 3.6, podržavaju kvazi-TEM mod prostiranja.

Primer jedne ovakve tranzicije iz literature [35], prikazan je na slici 3.7. Autori predlažu da se osnovni mod mikrostrip voda može jednostavno transformisati u mod grebenastog talasovoda, pošto oba talasovoda podržavaju prostiranje kvazi-TEM moda. Mikrostrip vod je postavljen u liniju sa grebenastim talasovodom i naleže na njega, tako da ostvaruju provodni kontakt. Vrlo je važno da debljina podloge mikrostrip voda bude jednaka visini vazdušnog procepa grebenastog talasovoda. Sekcija grebenastog talasovoda koja naleže na mikrostrip liniju sužena je da bude iste širine kao

mikrostrip vod, kako bi se postepeno izvršilo prilagođenje impedanse mikrostrip voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, [35].

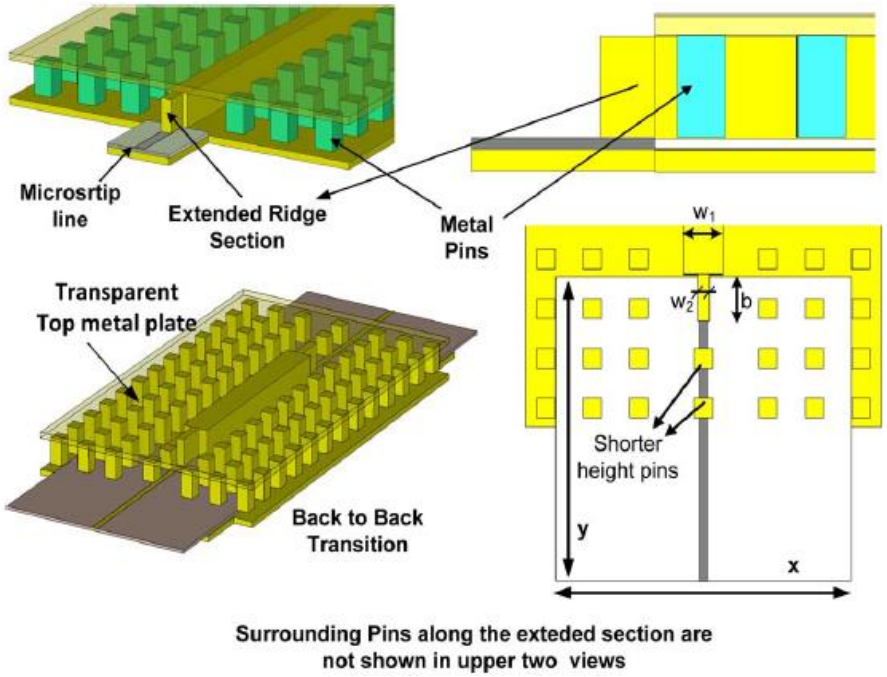
Kako bi se rešio problem zračenja na diskontinuitetu nastalom spajanjem mikrostrip voda sa grebenastim talasovodom, koje se uobičajeno javlja na visokim učestanostima, postavljena su dva metalna stubića pre sekcije spoja mikrostripa i grebenastog talasovoda, iznad mikrostrip linije. Metalni stubići su skraćeni u odnosu na ostale stubiće koji grade PMC površinu, slika 3.7. Uobičajeno, dva skraćena metalna stubića dovoljna su da potisnu zračenje nastalo od diskontinuiteta. Ideja potiskivanja zračenja predstavljena u [35], a detaljno je analizirana u [36], gde je PMC površina iskorišćena kako bi potisnula sve više modove mikrostrip voda, osim osnovnog moda prostiranja.

Analizom jedinične ćelije strukture sa slike 3.7, dobijen je opseg učestanosti zabranjene zone od 22 do 46 GHz.

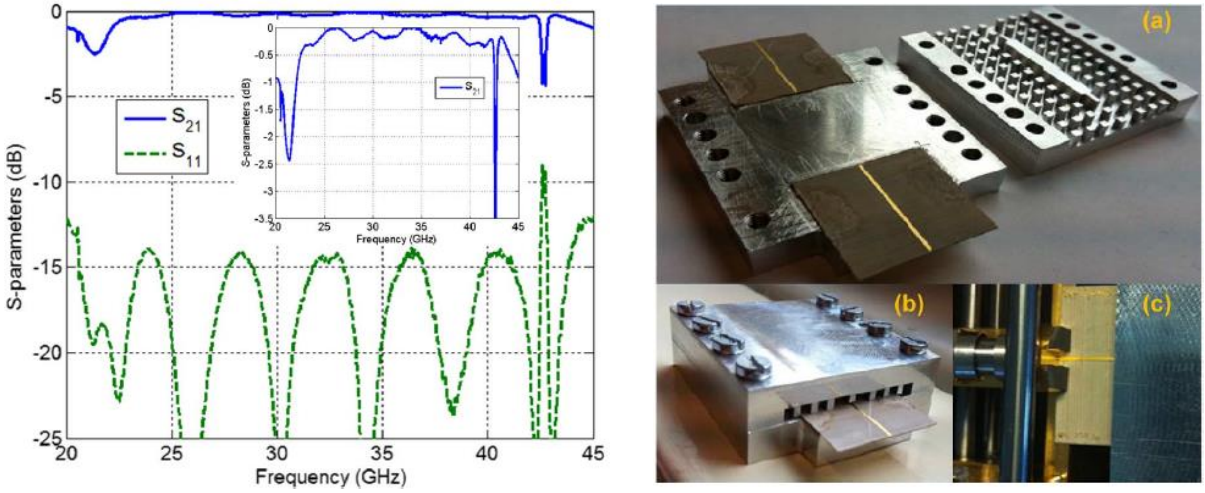


(a) *(b)*

Slika 3.6 Raspodela električnog polja: a) mikrostrip voda, b) grebenastog talasovod na bazi procepa, [35]



Slika 3.7 Primer linijske tranzicije sa mikrostrip voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, [35]



(a) *(b)*

Slika 3.8 Primer linijske tranzicije: a) izmereni S parametri, b) fabrikovan grebenasti talasovod na bazi procepa sa predloženom tranzicijom, [35]

Na slici 3.8, prikazani su izmereni *S* parametri fabrikovanog grebenastog talasovoda na bazi procepa sa predloženom tranzicijom. Tranzicija je okarakterisana pokrivenošću opsega učestanosti zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB od 83,33%, sa malim unesenim slabljenjem u ovom opsegu od oko 0,3 dB. Rezultati merenja ne zadovoljavaju uslov pokrivenosti opsega zabranjene zone za povratne gubitke do 15 dB. Najbolji rezultati dobijeni su za povratne gubitke do 14 dB, koji obuhvataju pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone od 55%, [35].

Pored male preciznosti prilikom postavljanja mikrostrip voda na grebenasti talasovod, kao i ograničene visine vazdušnog procepa, diktiranog od strane standardnih debljina dielektričnih podloga, na predloženu tranziciju može negativno da utiče i unošenja dielektrika unutar vazdušnog procepa. Naime, unošenje dielektrika unutar vazdušnog procepa uticaće na smanjenje opsega učestanosti zabranjene zone. Takođe, proces fabrikacije tranzicije dosta je složen jer zahteva realizaciju hibridne strukture dobijene CNC i PCB tehnologijama, pa je potrebno koristiti odgovarajuća vezivna sredstava (lepkove), kako bi se struktura spojila na odgovarajući način. Sa druge strane, kontakt ostvaren između grebena i mikrostrip voda, dobijen naleganjem pod pritiskom, moženegativno da utiče na konstantnost visine vazdušnog procepa duž grebena, kao i na toleranciju preciznosti naleganja.

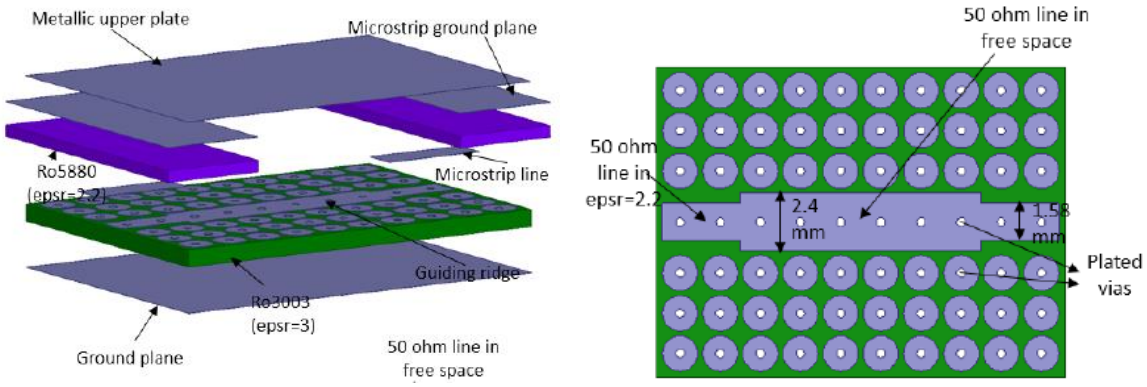
Sličan pristup projektovanja tranzicije u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa predložen je u [37], gde 50-omski mikrostrip vod direktno naleže na mikrostrip grebenasti talasovod, kao što je prikazano na slici 3.9. Prilagođenje tranzicije izvršeno je odgovarajućom dužinom preklapanja mikrostrip voda i suženih sekcija mikrostrip grebena. Visina vazdušnog procepa određena je visinom dielektrične podloge mikrostrip voda, dok je gornja provodna ploča mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, u provodnom kontaktu sa uzemljenim slojem mikrostrip voda, [37].

Jedinična ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, strukture sa slike 3.9, projektovana je da pokriva opseg učestanosti zabranjene zone od 20,8 do 44,6 GHz.

Na slici 3.10, prikazani su simulirani *S* parametri predložene tranzicije iz [37]. Tranzicija obezbeđuje pokrivenost opsega zabranjene zone od 64,8% za povratne gubitke do 10 dB i pokrivenost od 47,2% za povratne gubitke do 15 dB. Uneseni gubici u ovom opsegu učestanosti su oko 1 dB.

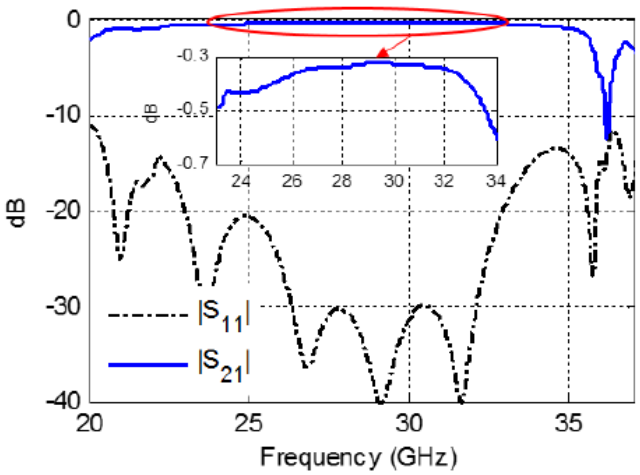
Predložena tranzicija iz [37] iskorišćena je za realizaciju filtra u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda. Problemi ovakve tranzicije su u ostvarivanju dobrog provodnog kontakta između dva voda.

Projektovana linijska tranzicija koja se zasniva na kapacitivnoj sprezi između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda, predstavljena je u [38]. Tranzicija je projektovana kako bi se koristila na učestanostima bliskim THz opsegu. Primer tranzicije iz [38] prikazan je na slici 3.11.

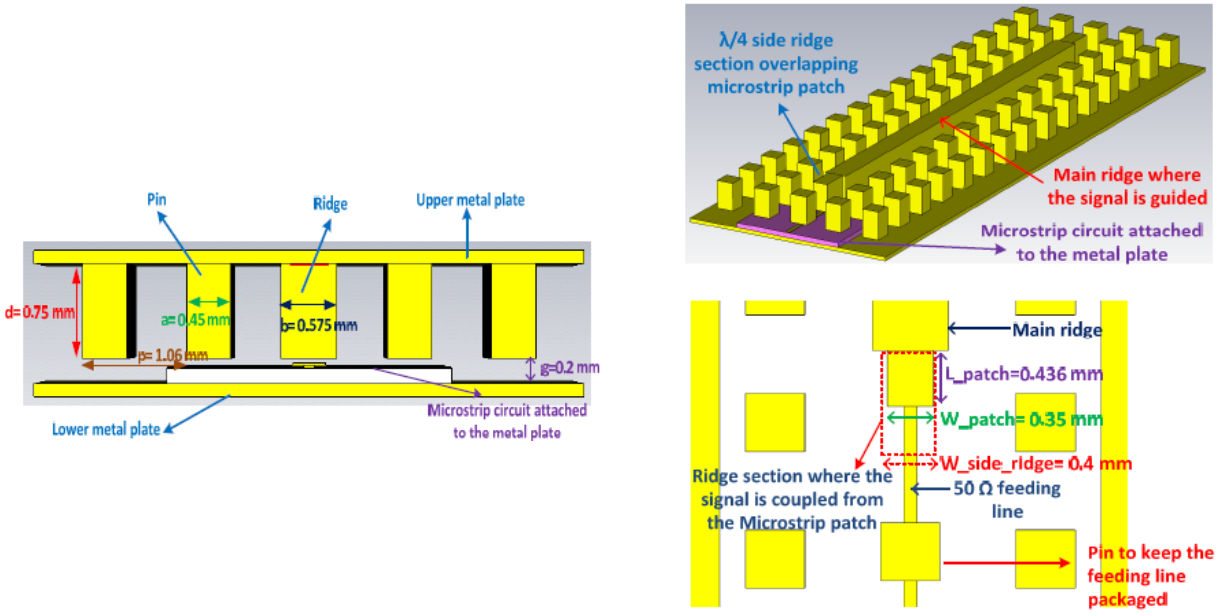


(a) *(b)*

Slika 3.9 Tranzicija sa mikrostrip voda na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) prikaz različitih nivoa tranzicije, b) pogled odozgo na mikrostrip grebenasti talasovod i na sužene sekcije tranzicije, [37]



Slika 3.10 Simulirani S parametri tranzicije sa mikrostrip voda na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procep, [37]



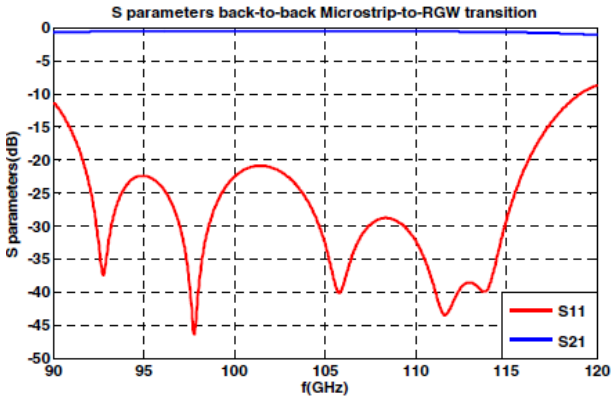
Slika 3.11 Model linijske tranzicije realizovan kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [38]

Analizom jedinične ćelije strukture sa slike 3.11, dobijen je opseg učestanosti zabranjene zone od 64 do 141 GHz. Na ovako visokim učestanostima poželjno je koristiti dielektrične podloge sa malim gubicima, na primer aluminu.

Tranzicija je realizovana tako da je uzemljeni sloj mikrostrip voda spojen sa gornjim provodnim slojem grebenastog talasovoda na bazi procepa, dok je sprega izvršena bliskim postavljanjem mikrostrip voda i grebena na malu udaljenost, slika 3.11. Širina grebena u delu koji se spreže sa mikrostrip vodom je smanjen, dok je kraj mikrostrip voda zatvoren kvadratnim peč rezonatorom dužine $\lambda/4$ na učestanosti od 100 GHz, slika 3.11, [39]. Širina i dužina peč rezonatora, kao i suženih delova grebena, podešene su tako da se dobije što bolje prilagođenje impedanse tranzicije. Kao i u slučaju tranzicije iz [35], iskorišćeni su skraćeni metalni stubići iznad mikrostrip linije, da bi se smanjilo zračenje strukture na mestu diskontinuiteta.

Simulirani *S* parametri predložene tranzicije prikazani na slici 3.12, pokazuju pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone od 37,6% i 25,4%, za povratne gubitke do 10 dB i 15 dB, respektivno. Iz rezultata simulacija može se zaključiti da predložena tranzicija iz [38] nudi mogućnost pobude grebenastih talasovoda na bazi procepa, na vrlo visokim učestanostima.

Međutim, rezultati simulacija ne prikazuju stvarne performanse tranzicije, pošto u realnom slučaju mnogo faktora, kao što su rastojanje između mikrostrip voda i grebena, kao i njihovo poravnavanje može da unese značaju grešku i negativno utiče na konačne rezultate. Takođe zavisnost kapacitivne sprega od učestanosti može da bude još jedan ograničavajući faktor predložene tranzicije.



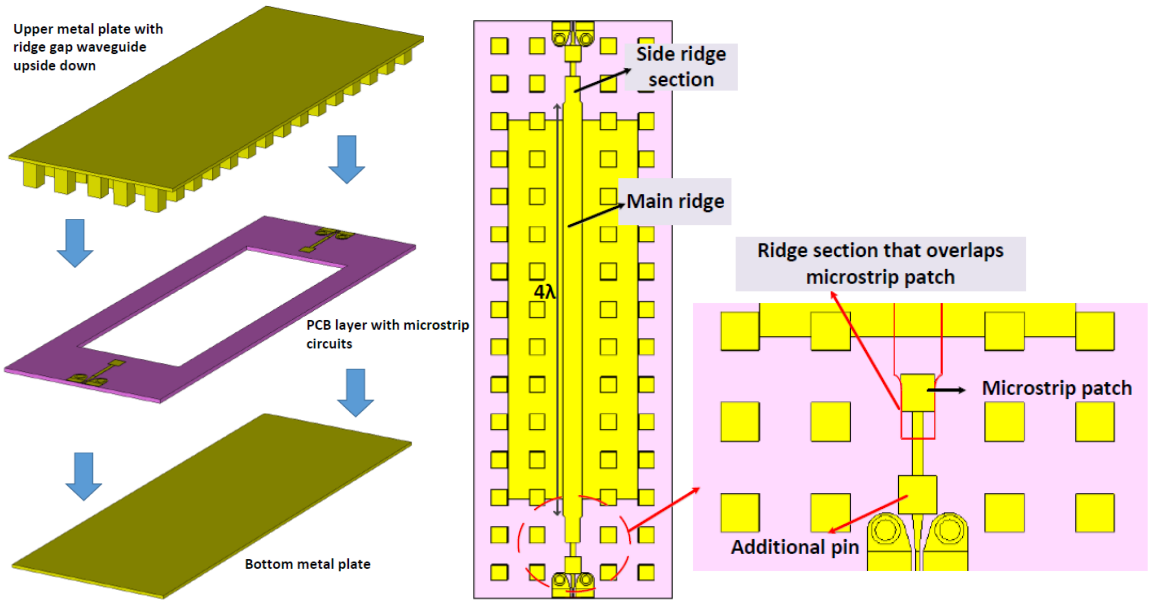
Slika 3.12 Simulirani S parametri linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [38]

Sličan pristup projektovanju tranzicije sa kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa predložen je u [40], za opseg učestanosti zabranjene zone od 70 do 135,8 GHz. Projektovana tranzicija sastoji se od dve sekcije. Prva sekcija predstavlja tranziciju između koplanarnog talasovoda i mikrostrip voda, koja se uobičajeno primenjuje kod struktura koje rade na milimetarskim opsezima učestanosti, [41]–[43]. Koplanarni talasovodi se koriste za postavljanje signal-zemlja-signal (SGS) sondi prilikom merenja. Druga sekcija predstavlja spregu između modifikovane mikrostrip linije i grebenastog talasovoda na bazi procepa.

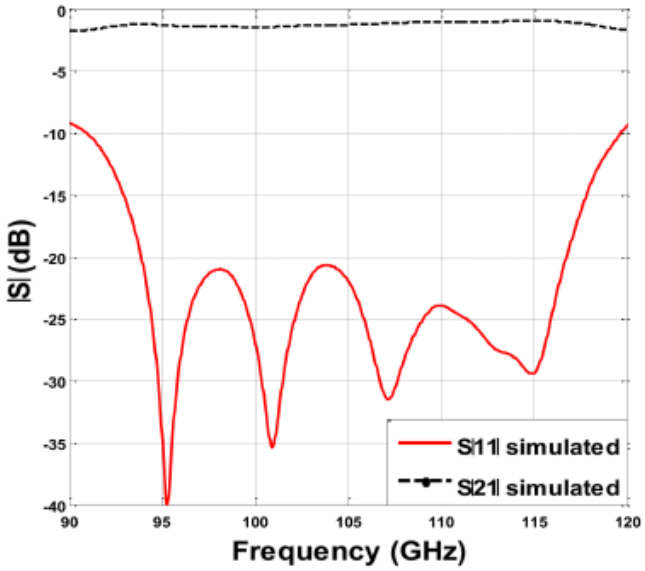
Model tranzicije iz [40] prikazan je na slici 3.13. Tranzicija se sastoji od grebena i okolne PMC površine realizovane metalnim stubićima sa jedne strane, provodne ploče sa druge strane i središnje dielektrične podloge od alumine, sa navedenim sekcijama tranzicije i otvorom u sredini. Uzemljeni sloj mikrostrip voda zalemljen je za provodnu ploču koja ima ulogu gornjeg provodnika grebenastog talasovoda na bazi procepa. Svi metalni delovi su obloženi zlatom, kako bi se smanjili gubici u metalu izraženi na visokim učestanostima. Elektromagnetska sprega je ostvarena između mikrostrip voda zatvorenog kvadratnim peč rezonatorom i grebena koji nisu u fizičkom kontaktu, već postavljeni na vrlo malom rastojanju (63 μm), [40].

Na slici 3.14, prikazani su simulirani *S* parametri predložene tranzicije sa slike 3.13, koji pokazuju pokrivenost opsega zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, od 43,5% i 38%, respektivno, sa unesenim slabljenjem od oko 1.5 dB. Rezultati merenja značajno su degradirani malim tolerancijama dimenzija dobijenih PCB fabrikacijom i montažom, pa prema tome nisu detaljnije razmatrana u ovoj disertaciji.

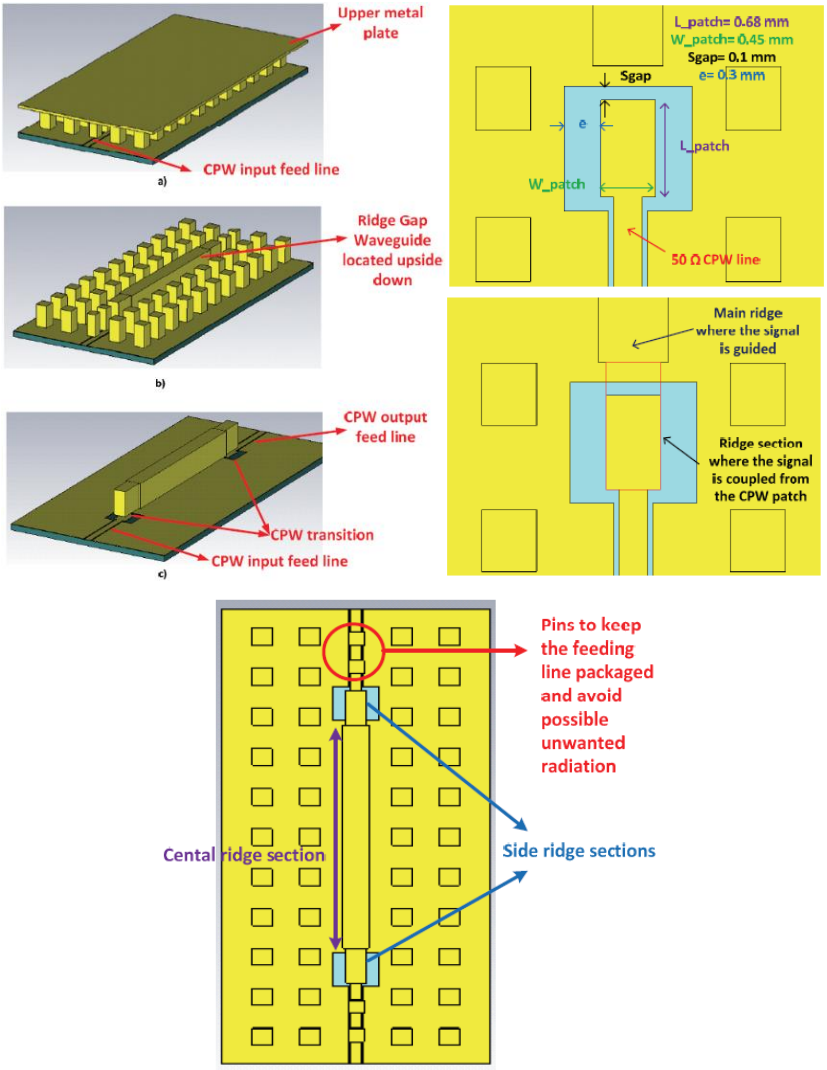
Analiza predložene tranzicije po pitanju tolerancija dimenzija i montaže, zasnovana na *Monte Carlo* analizi, detaljno je obrađena u [40].



Slika 3.13 Model linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, namenjena za korišćenje na milimetarskim učestanostima, [40]



Slika 3.14 Simulirani S parametri linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između mikrostrip voda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [40]



Slika 3.15 Ilustracija linijske tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između koplanarnog talasovoda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [44]

Naredna linijska tranzicija koja se zasniva na elektromagnetskoj sprezi između koplanarnog talasovoda i grebenastog talasovoda, sa opsegom učestanosti zabranjene zone od 55 do 134 GHz, predstavljena je u [44]. Predložena tranzicija ilustrovana je na slici 3.15. Tranzicija sa sastoji se od koplanarnog talasovoda koji je zatvoren koplanarnim peč rezonatorom. Peč rezonator je kapacitivno spregnut sa suženim delom grebena. Najbolji rezultati tranzicije dobijeni su za jednake širine suženog dela grebena i koplanarnog peč rezonatora. Kao i u prethodnim linijskim tranzicijama, dva kraća metalna stubića postavljena su iznad koplanarnog voda, kako bi se smanjilo zračenje od diskontinuiteta, [44].

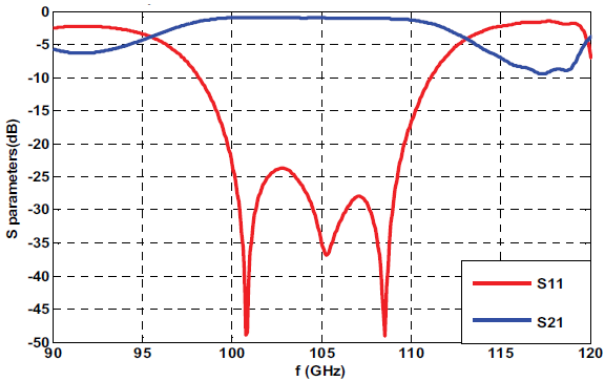
Razlika predložene tranzicije u odnosu na prethodne linijske tranzicije zasnovane na kapacitivnoj sprezi je u tome što je sada uzemljeni sloj koplanarnog talasovoda iskorišćen kao gornji provodni sloj grebenastog talasovoda na bazi procepa. Rastojanje između gornjeg provodnog sloja i grebenastog talasovoda predstavlja parametar koji utiče na jačinu sprege predložene tranzicije, kao i na širinu opsega učestanosti zabranjene zone.

Rezultati simulacija tranzicije [44], prikazani su na slici 3.16. Treba napomenuti da je tokom simulacija zadnja strana dielektrične podloge modelovana kao idealni magnetski provodnik (PMC). Prvobitno, zadnja strana dielektrične podloge bila je modelovana graničnim uslovom otvorenog kola (*Open*), pa rezultati nisu bili zadovoljavajući usled značajnog zračenja na mestu diskontinuiteta tranzicije, [44]. Rezultati pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, iznose 16,5% i 13,5%, respektivno, sa unesenim slabljenjem od oko 1 dB.

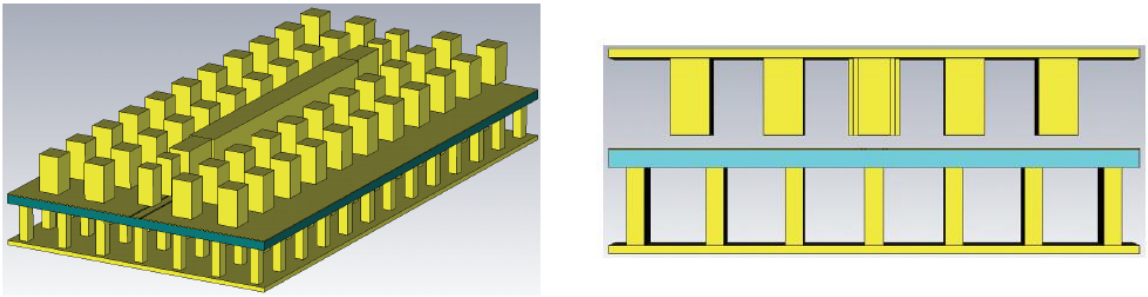
Tranzicija iz [44] modifikovana je u cilju dobijanja realnijih rezultata simulacija, tako što je sa donje strane koplanarnog talasovoda, ispod dielektrične podloge, postavljena PMC struktura načinjenu od metalnih stubića, kao što je prikazano na slici 3.17. PMC struktura uspešno će ukloniti gubitke nastale usled zračenja diskontinuiteta tranzicije, [26], [45], [46].

Dimenzije nove PMC strukture izabrane su tako da im se radni opseg poklapa sa opsegom učestanosti zabranjene zone periodične strukture projektovanog grebenastog talasovoda na bazi procepa. Radni opseg nove PMC strukture je od 43,8 do 124 GHz, čime je zadovoljena odgovarajuća širina i postignuto odgovarajuće preklapanje, [44].

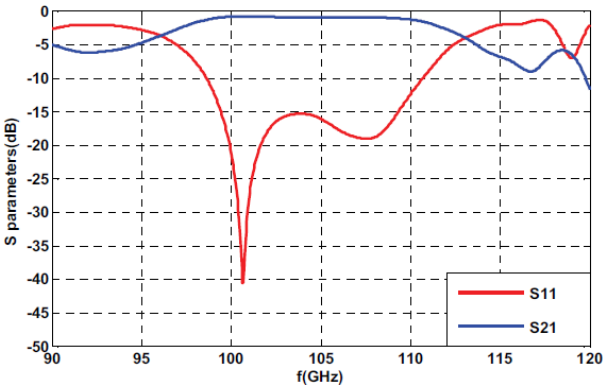
Simulirani *S* parametri modifikovane tranzicije sa uvedenom PMC površinom ispod dielektrika koplanarnog talasovoda, prikazani su na slici 3.18. Tranzicija je okarakterisana pokrivenošću opsega učestanosti zabranjene zone od 9,5% i 15,2% za povratne gubitke do 15 dB i do 10 dB, respektivno, sa unesenim slabljenjem od 1 dB.



Slika 3.16 S parametri dobijeni simulacijama tranzicije realizovane kapacitivnom spregom između koplanarnog talasovoda i grebenastog talasovoda na bazi procepa, [44]



Slika 3.17 Modifikacija tranzicije dodavanjem nove PMC strukture ispod dielektrične podloge koplanarnog talasovoda, [44]



Slika 3.18 Simulirani S parametri dobijeni modifikacijom tranzicije dodavanjem nove PMC strukture ispod dielektrične podloge koplanarnog talasovoda, [44]

U tabeli 3.2, objedinjene su performanse linijskih tranzicija realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa.

TABELA 3.2 PERFORMANSE LINIJSKIH TRANZICIJA U TEHNOLOGIJI TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Literatura	***Topologija tranzicije***	***Opseg zabranjene zone [GHz]***	***Tip rezultata***	***Pokrivenost (RL = 10 dB) [%]***	***Pokrivenost (RL = 15 dB) [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***
[22]	Linijska	5 - 15	Merenja	60	20,5	1
[35]	Linijska	22 – 46	Merenja	83,33	55 (14 dB)	0,3
[37]	Linijska	20.8 – 44,6	Simulacije	64,8	47,2	1
[38]	Linijska	64 – 141	Simulacije	37,6	25,4	0.5
[40]	Linijska	70 – 135,8	Simulacije	43,5	38	1,5
[44]	Linijska	55 – 134	Simulacije	16,5	13.5	1
[44]	Linijska	55 – 134	Simulacije	15,2	9,5	1

Predložene linijske tranzicije zasnovane su na induktivnoj ili na kapacitivnoj sprezi uvodnih linija i grebenastih talasovoda. Tranzicija iz [35] nudi najbolje performanse po pitanju pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone i unesenog slabljenja, ali zahtevaju hibridne strukture i složen proces montaže. Za pobudu kola na nižim učestanostima milimetarskog opsega, tranzicija iz [37] daje dobru pokrivenost opsega zabranjene zone, sa nešto većim unesenim slabljenjem usled korišćenja dielektričnih podloga i kompleksnoj izvedbi tranzicije. Tranzicije predložene za pobudu kola na milimetarskim opsezima [38], [40] i [44], značajno su teže za realizaciju usled malih talasnih dužina na učestanostima iznad 100 GHz. Na tako visokim učestanostima zahtevi tolerancija fabrikacije i montaže uređaja su značajno strožiji u odnosu na uređaje koji rade na nižim učestanostima. Prema tome, potrebno je pre projektovanja biti upoznat sa uticajem tolerancija na performanse uređaja na milimetarskim učestanostima, kako bi se zadovoljili svi zahtevi precizne fabrikacije i montaže.

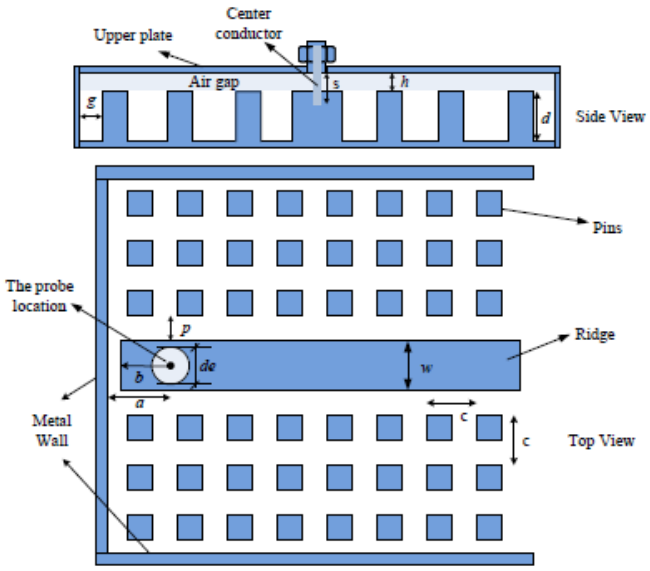
3.2.2 Vertikalne tranzicije

Strukture za pobudu kod vertikalnih tranzicija uobičajeno su ortogonalno postavljenje u odnosu na talasovod na bazi procepa i u najvećem broju slučajeva koriste neki od koaksijalnih konektora, čiji se središnji vod spreže kapacitivno ili induktivno sa talasovodom na bazi procepa.

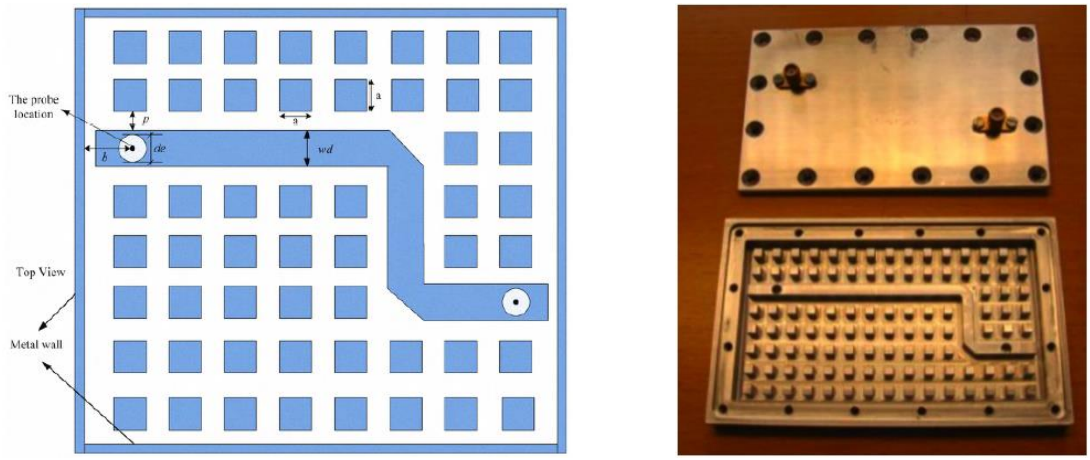
Primer prve vertikalne tranzicije [20] sa kritičnim parametrima, prikazan na slici 3.19, predstavlja spregu koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa. Jedinična ćelija predložene strukture projektovana je u opsegu učestanosti zabranjene zone od 10 GHz do 23 GHz, [20].

Predložena tranzicija iz [20], pobuđuje kvazi-TEM mod grebenastog talasovoda pomoću SMA konektora, koji je postavljen sa gornje strane talasovoda na bazi procepa. Središnji vod SMA konektora provučen kroz otvor na gornjoj provodnoj ploči prolazi kroz vazdušni procep dužinom *s*, tako da jednim svojim delom ulazi u kružni otvor prečnika *de* napravljen na grebenu. Otvor je udaljen od kraja grebena za dužinu $b = \lambda/2$, na učestanosti od 15 GHz. Za datu dužinu i učestanost, uvedeni talas iz centra otvora na grebenu će videti kraj grebena kao otvoreni vod (engl. *Open Circuit*), čime je omogućeno da se talas nakon sprezanja sa grebenom prostire u odgovarajućem smeru. Od bočnih metalnih zidova središnji vod SMA konektora udaljen je za dužinu *a*, [20]. Ovakvom postavkom SMA konektora i kapacitivnom spregom sa grebenastim talasovodom na bazi procepa, omogućena je jednostavna montaža i demontaža gornje ploče talasovoda.

Kako bi se na realnom primeru demonstrirala primena tranzicije, projektovan i fabrikovan je grebenasti talasovod na bazi procepa sa dva zakrivljena segmenta od po 90˚, prikazan na slici 3.20. Spoljašnji uglovi zakrivljenih segmenata isečeni su po 45˚ stepeni, tako da dužina isečenog dela bude jednaka širini grebena, *wd*. Ovo je uobičajen pristup kod mikrostrip vodova projektovanih sa zakrivljenim segmentima od 90˚ (engl. *Chamfer*). Realizovane su dve tranzicije sa SMA konektora na grebenasti talasovod na bazi procepa. Realizovani prototip navedene strukture i predložene tranzicije, prikazan je na slici 3.20(b).

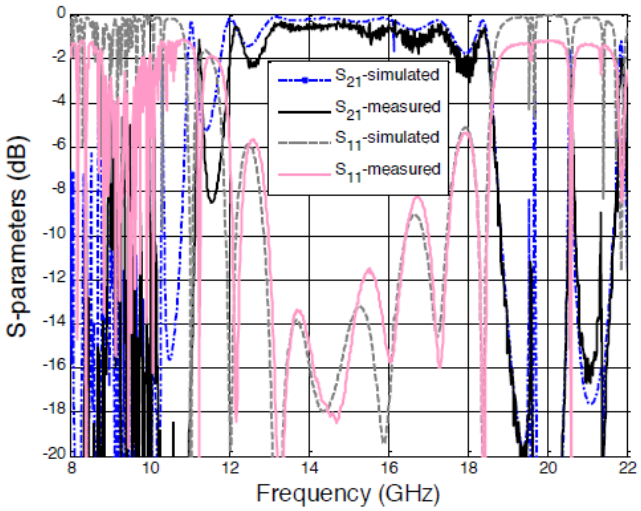


Slika 3.19 Ilustracija tranzicije sa koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, [20]



(a) *(b)*

Slika 3.20 Realizovani grebenasti talasovod sa koaksijalnom vertikalnom tranzicijom: a) ilustracija, [47], b) realizovani prototip, [20]



Slika 3.21 Poređenje simuliranih i izmerenih S parametara za grebenasti talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa koaksijalnog voda (SMA konektora), [20]

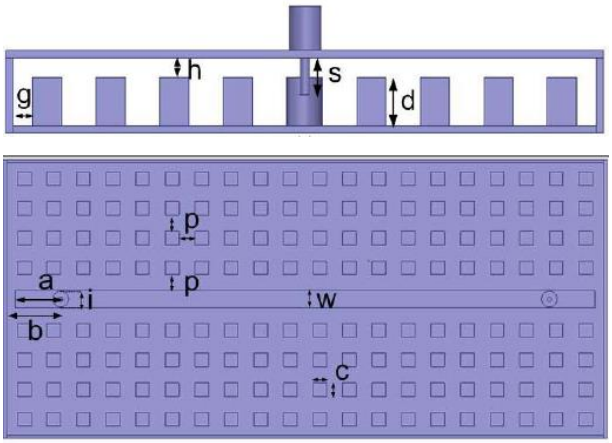
Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara predložene strukture sa slike 3.20, prikazani su na slici 3.21, [20]. Sa slike 3.21, vidi se dobro slaganje između izmerenih i simuliranih rezultat u opsegu učestanosti od 13 do 17 GHz. Rezultati ispod 12 GHz i iznad 18 GHz su nedovoljno dobri, pošto na ovim učestanostima nije izvršeno odgovarajuće prilagođenje impedanse, a takođe SMA konektori nisu projektovani da rade na učestanostima iznad 18 GHz.

Na osnovu rezultata sa slike 3.21, može se zaključiti da pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB iznosi 26,1%, dok je pokrivenost za povratne gubitke do 15 dB značajno manje, usled nedovoljno dobrog prilagođenja tranzicije i upotrebe neodgovarajućeg konektora, i iznosi samo 7,7%. Takođe, treba uzeti u obzir da i diskontinuiteti koji potiču od zakrivljenih segmenata grebena utiču na performanse tranzicija.

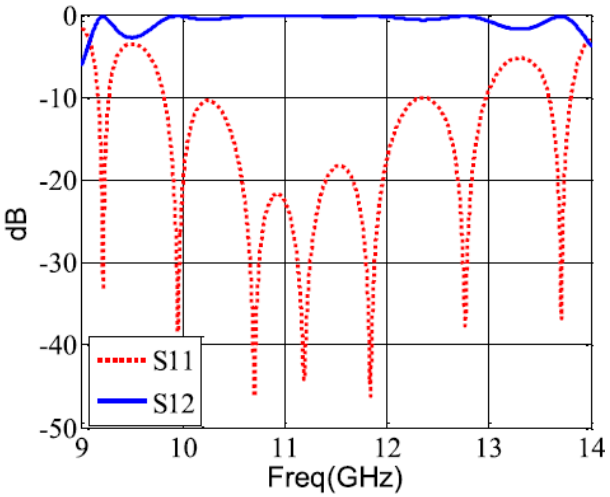
Predložena tranzicija iz [20], sa optimizovanim dimenzijama radi poboljšanja performansi, predstavljena je u [47], gde su prikazani samo rezultati simulacija. Tranzicija je okarakterisana pokrivenošću opsega zabranjene zone od 15,4% i 28,8%, za povratne gubitaka do 15 dB i do 10 dB, respektivno. Optimizacijom je dobijen dvostruko veći opseg povratnih gubitaka do 15 dB, dok je relativni opseg do 10 dB ostao približno isti, u poređenju sa prvobitnom tranzicijom iz [20].

Sličan pristup projektovanja tranzicije sa SMA konektora na grebenasti talasovod na bazi procepa predložen je u [48]. Tranzicija je iskorišćena u realizaciji filtra sa direktno spregnutim šupljinama. Opseg učestanosti zabranjene zone jedinične ćelije predložene strukture je od 7,16 GHz do 17,13 GHz. Ilustracija projektovane tranzicije primenjena na pravolinijskom grebenastom talasovodu na bazi procepa, sa kritičnim geometrijskim parametrima prikazana je na slici 3.22. Treba napomenuti da su u literaturi za tranziciju sa slike 3.22 predstavljeni samo simulirani rezultati, prikazani na slici 3.23.

Tranzicija je projektovana da zadovolji prilagođenje impedanse u opsegu učestanosti od 10 GHz do 13 GHz, čime je dobijena pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB od 25%, i za povratne gubitke do 15 dB od 15%.



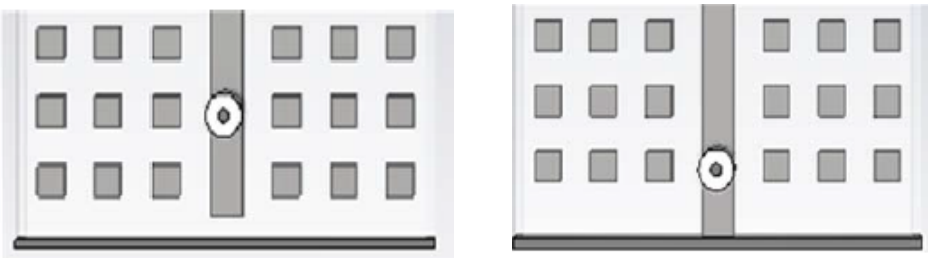
Slika 3.22 Ilustracija tranzicije sa koaksijalnog voda na pravolinijski grebenasti talasovod, [48]



Slika 3.23 Simulirani S parametri tranzicije sa koaksijalnog voda na pravolinijski grebenasti talasovod, [48]

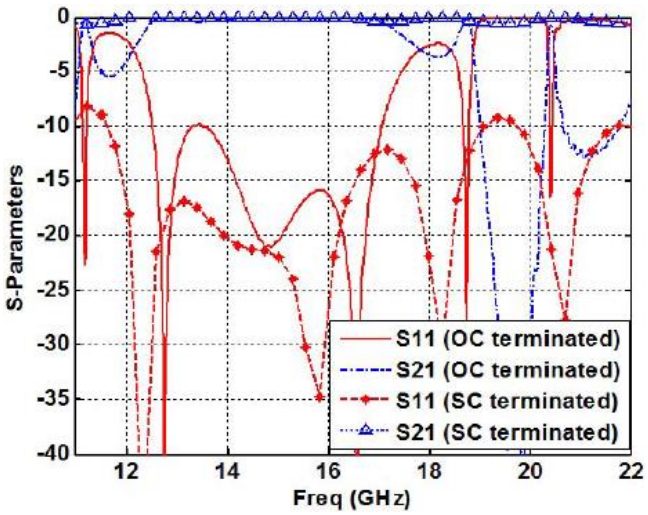
Predložena tranzicija [48] daje rezultate bliske tranziciji predloženoj u [47]. Rezultati predloženih tranzicija sa SMA konektora na grebenaste talasovode na bazi procepa, [20], [47] i [48], kod koji su grebeni realizovani kao otvoreni vodovi, predstavljaju optimalne rezultate koji se mogu postići ovim tipom tranzicije. Predloženi tipovi tranzicije ograničenih su performansi usled korišćenja konektora koji rade do 18 GHz, kapacitivne sprege središnjeg voda konektora i grebena, kao i frekventne zavisnosti kapacitivne sprege, na kojoj je tranzicija zasnovana.

Jedna od modifikacija koja može značajno da poboljša performanse navedenih tranzicija predstavljena je u [49]. Predložena modifikacija zahteva da se grebeni realizuju kao kratko spojeni vodovi (engl. *Short Ciruit*). Naime, fizička realizacija kratko spojenog grebena dobija se ostvarivanjem direktnog kontakta grebena i okolnog metalnog zida, kao što je prikazano na slici 3.24(b). Kako bi talas, koji se uvodi putem koaksijalnog voda, video kratak spoj na kraju grebena, središnji vod koaksijalnog talasovoda treba da bude postavljen na udaljenost od $\lambda/4$ od metalnog zida. Na slici 3.24, prikazana je realizacija grebena kao otvorenog i kratko spojenog voda. Metalni zid okružuje ceo talasovoda na bazi procepa, [49].



(a) *(b)*

Slika 3.24 Modifikacije tranzicija sa koaksijalnog voda na grebenasti talasovod: a) sa otvorenom vezom, b) sa kratkim spojem, [49]



Slika 3.25 Poređenje simuliranih rezultata S parametara grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa grebenima realizovanim kao otvoren i kratko spojen vod, [49]

Kako bi se demonstriralo poboljšanje koje pruža modifikacija tranzicije, izvršene su simulacije grebenastih talasovoda na bazi procepa, kod kojih su grebeni realizovani kao otvoren i kratko spojen vod, [49]. Dimenzije su uzete iz tranzicije [20]. Simulirani *S* parametri sa i bez modifikacije prikazani i upoređeni na slici 3.25.

Predloženom modifikacijom ostvarene su pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone od 57,7% i 34%, za povratne gubitke do 10 dB i 15 dB, respektivno, što predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na tranzicije predstavljene u [20], [47] i [48].

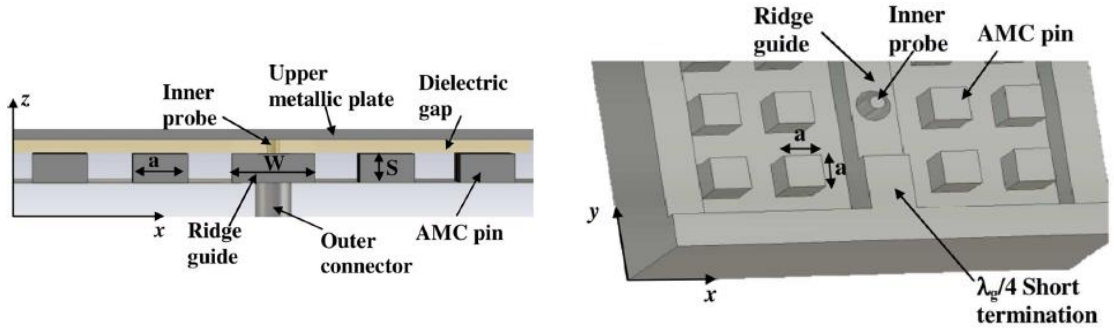
Usled činjenice da se greben kada nije kratko spojen ponaša kao otvoren vod isključivo na učestanosti i u okolini učestanosti na kojoj je udaljenost od središnjeg voda koaksijalnog konektora jednaka $\lambda/2$, govori nam da postoji velika mogućnost da će rasipna polja na krajevima otvorenog grebena negativno uticati na spregu i dodatno pogoršati nivoe prilagođenja impedanse same tranzicije, [49]. Povezivanjem grebena na metalni zid ostvaruje se električni kontakt koji nudi bolje performanse, o kojima svedoče rezultati simulacija sa slike 3.25. Pored boljih performansi kratko spojenog grebena, smanjena je i ukupna dužina grebenastog talasovoda približavanjem tranzicije metalnom zidu, kao što je prikazano na slici 3.24(b).

Prednost strukture sa kratko spojenim grebenom je značajna pošto pokriva šire opsege učestanosti zabranjene zone i daje niže nivoe refleksije izvan korisnog opsega, u odnosu na otvoreni greben, ali zahteva složeniju izradu prilikom ostvarivanja provodnog kontakta između grebena i zida, što se može rešiti izradom celog donjeg dela grebenastog talasovoda na bazi procepa iz jednog komada metala, [49].

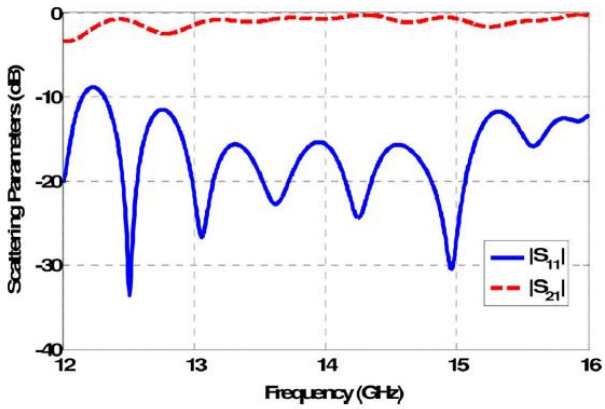
Naredni primer vertikalne tranzicije iz [50] sa koaksijalnog konektora na grebenasti talasovod na bazi procepa, kod koje je SMA konektor uveden sa donje strane grebena, prikazan je na slici 3.26. Središnji vod SMA konektora provučen je kroz realizovan otvor na grebenu i ostvaruje provodnu vezu sa gornjom provodnom pločom talasovoda. Spoljašnji deo SMA konektora spojen je na donju provodnu ploču grebenastog talasovoda na bazi procepa, [50].

Kako bi se osiguralo konstantno rastojanje između gornje provodne ploče i strukture metalnih stubića sa grebenom, vazdušni procep ispunjen je dielektričnim materijalom $\varepsilon_r = 1.96$ (*RT-Duroid 5880 LZ*). Izabrani dielektrični materijal osigurava male dielektrične gubitke, [50].

Za prilagođenje tranzicije iskorišćen je kratko spojeni segment grebena dužine $\lambda_g/4$, koji je u provodnoj vezi sa gornjom provodnom pločom talasovoda i zidom koji okružuje talasovod, kao što je prikazano na slici 3.26.



Slika 3.26 Geometrija tranzicije koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa, gde je SMA konektor postavljen sa donje strane talasovoda, [50]

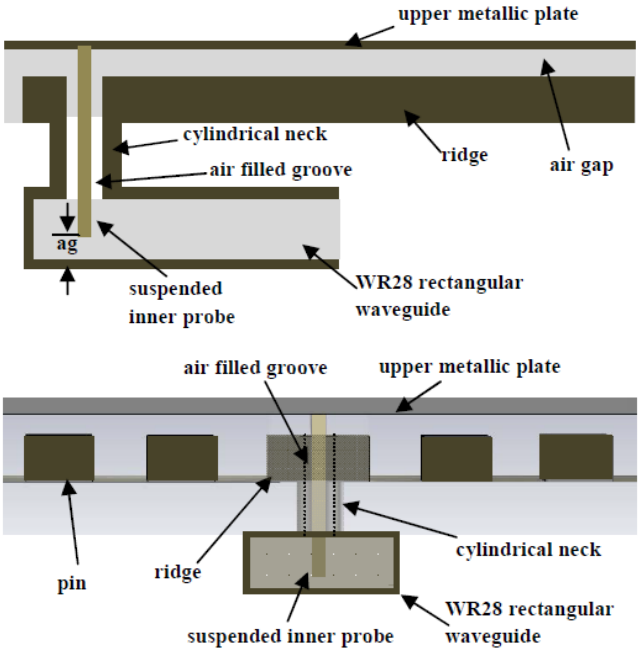


Slika 3.27 Simulirani S parametri tranzicije koaksijalnog voda na grebenasti talasovod na bazi procepa sa SMA konektorom postavljenim sa donje strane talasovoda, [50]

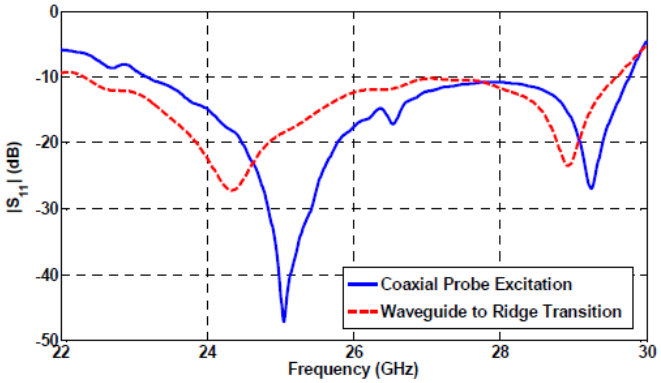
Projektovani opseg učestanosti zabranjene zone dobijen simulacijom jedinične ćelije predložene strukture je od 10 do 23 GHz. Na slici 3.27, prikazani su simulirani *S* parametri grebenastog talasovoda sa predloženim tranzicijama. Pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone predloženom tranzicijom iznosi 27,7% i 17,7%, za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, respektivno. Simulirani rezultati nagoveštavaju postojanje izraženijeg unesenog slabljenja ispod 13 GHz i iznad 15 GHz, što je prouzrokovano korišćenjem dielektrika unutar vazdušnog procepa, [50].

Naredna predložena tranzicija iz literature [51], zasnovana je na sprezi WR-28 talasovoda na grebenasti talasovod na bazi procepa, korišćenjem koaksijalnog voda. Ilustracija predložene tranzicije predstavljena je na slici 3.28.

Tranzicija je realizovana korišćenjem koaksijalnog talasovoda koji svojim središnjim vodom sa jedne strane ostvaruje provodan kontakt sa gornjom provodnom pločom grebenastog talasovoda na bazi procepa, dok sa druge strane ulazi unutar šupljine WR-28 talasovoda sa dužinom *ag*, slika 3.28. Koaksijalni vod se sastoji od otvora na grebenu na koji je spojen metalni šuplji cilindar sa donje strane, kroz koji se prostire središnji vod. Dimenzije koaksijalnog talasovoda, projektovane su da budu identične dimenzijama 2.92 mm konektora, [51].



Slika 3.28 Ilustracija tranzicije sa talasovoda WR-28 na grebenasti talasovod, [51]



Slika 3.29 Poređenje simuliranih S_{11} parametara koaksijalne tranzicije sa 2.92 mm konektorom i predložene tranzicije iz [51].

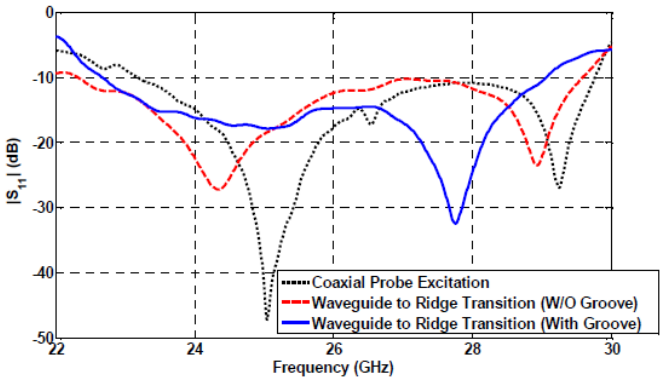
Prednost korišćenja tranzicije [51] je u fleksibilnom dizajnu koaksijalnog talasovoda i slobodnom izboru dimenzija, čime se mogu postići bolji nivoa prilagođenja impedanse. Ovim pristupom ostvarena je nezavisnost projektovane tranzicije od dimenzija standardizovanih koaksijalnih konektora.

Na slici 3.29, prikazano je poređenje simuliranih S_{11} parametara predložene tranzicije i koaksijalne tranzicije sa 2.92 mm konektorom, na grebenasti talasovod na bazi procepa, [51]. Za predloženu tranziciju dobijena je pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone od 29% za povratne gubitke do 10 dB, [51]. Može se zaključiti da su skoro identične performanse postignute sa dve različite tranzicije, s time da je prilagođenje veoma loše u opsegu od 27 GHz do 29 GHz.

Kako bi se postiglo bolje prilagođenje tranzicije WR-28 talasovoda na grebenasti talasovod na bazi procepa, izvršena je modifikacija cilindrične šupljine, kao što je prikazano na slici 3.30. Cilindrični otvor u delu između grebenastog talasovoda i WR-28 talasovoda je proširen, čime je dobijena stepenasto promenljive impedanse (engl. *Stepped Impedance*) u koaksijalnom talasovodu.



Slika 3.30 Modifikacija tranzicije iz [51]



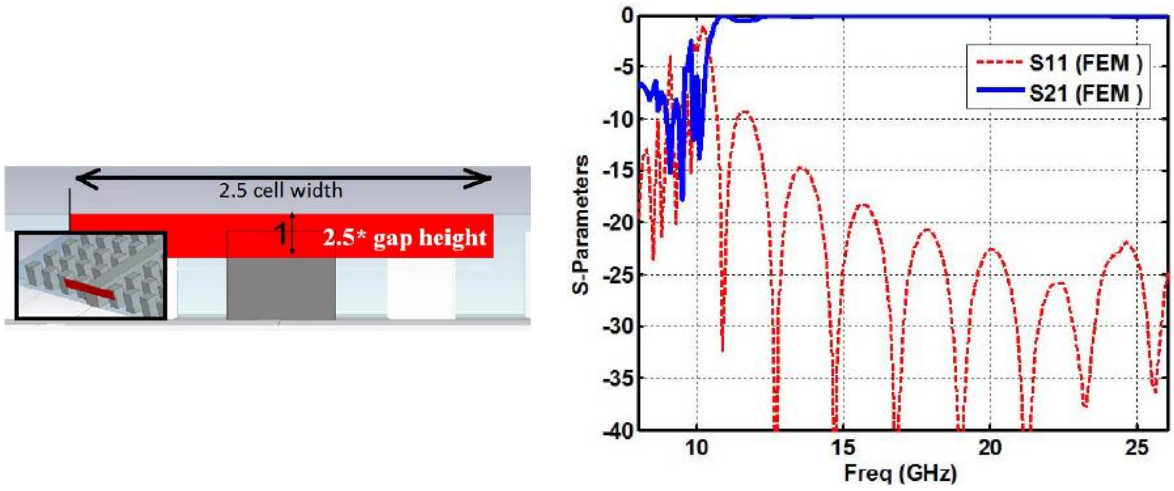
Slika 3.31 Poređenje simuliranih S_{11} parametara koaksijalne tranzicije na grebenasti talasovod na bazi procepa sa 2.92 mm konektorom, ne modifikovanom tranzicijom i modifikovanom tranzicijom, [51]

Predložen pristup modifikacije tranzicije nudi slobodu izbora optimalnog prečnika koaksijalnog voda između grebenastog talasovoda na bazi procepa i WR-28 talasovoda, čime je isključeno ograničenje postavljeno od strane komercijalno dostupnih koaksijalnih vodova. Izvršena je parametarska analiza koja je dala optimalne dimenzije središnjeg voda predložene tranzicije, [51]. Parametarska analiza izvršena je i za parametar *ag*, promenom dužine središnjeg voda koji ulazi unutra WR-18 talasovoda. Analiza je pokazala da dužina parametra *ag*, ima značajan uticaj na nivoe prilagođenja impedanse, [51].

Na slici 3.31, dato je poređenje simuliranih S_{11} parametara za sve tri tranzicije na grebenasti talasovod na bazi procepa: sa 2.92 mm koaksijalnim konektorom, sa nemodifikovanom koaksijalnom tranzicijom [51] i sa modifikovanom tranzicijom sa promenjenim prečnikom cilindričnog otvora, [51]. Modifikovana tranzicija pružila je bolje nivoe prilagođenja impedanse sa pokrivenošću opsega učestanosti zabranjene zone od 26% i 20%, za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, respektivno.

Do sada navedene vertikalne tranzicije iz literature imaju jedan zajednički nedostatak, a to je da ne pokrivaju dovoljno velik opseg učestanosti zabranjene zone, što je prouzrokovano lošim prilagođenjem impedanse.

Ideja nove tranzicije koja bi trebala da prevaziđe nedostatke koaksijalnih tranzicija na grebenasti talasovod na bazi procepa, potiče od talasovodnog porta (eng. *Wave Port*), koji se uobičajeno koristi tokom simulacija u procesu projektovanja RF i mikrotalasnih kola [31], [28] i [52]. Talasovodni port iskorišćen za pobudu grebenastog talasovoda na bazi procepa, omogućuje skoro potpunu pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone, kao što je prikazano na slici 3.32, [49].



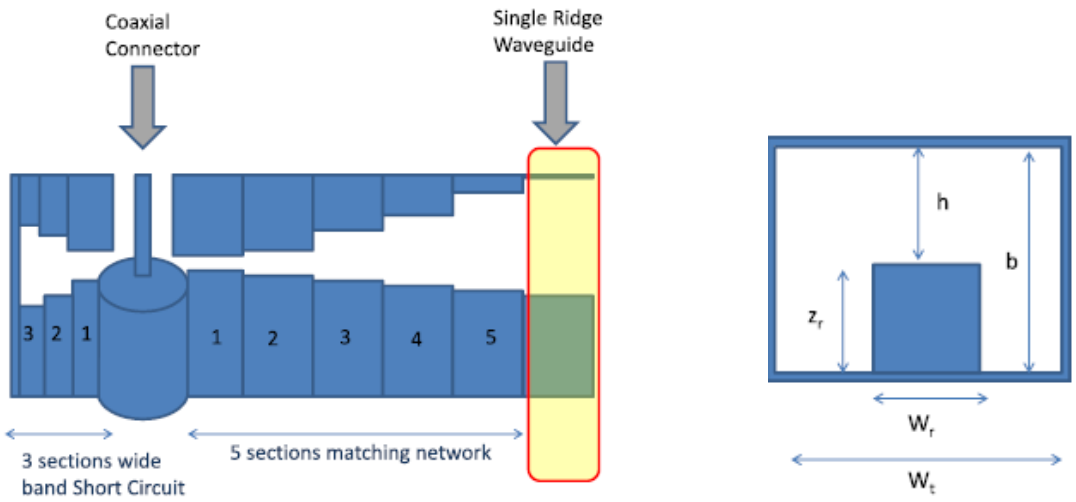
(a) *(b)*

Slika 3.32 Talasovodni port iskorišćen za pobudu grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) ilustracija, b) simulirani S parametri, [49]

Optimizacijom talasovodnog porta, njegove visine i širine, dobijaju se rezultati pokrivenosti zabranjene zone sa dobrim nivoima prilagođenja (do 15 dB i više) u širokom opsegu učestanosti, slika 3.32(b). Talasovodni port ima slično ponašanje kao grebenasti talasovod, [49].

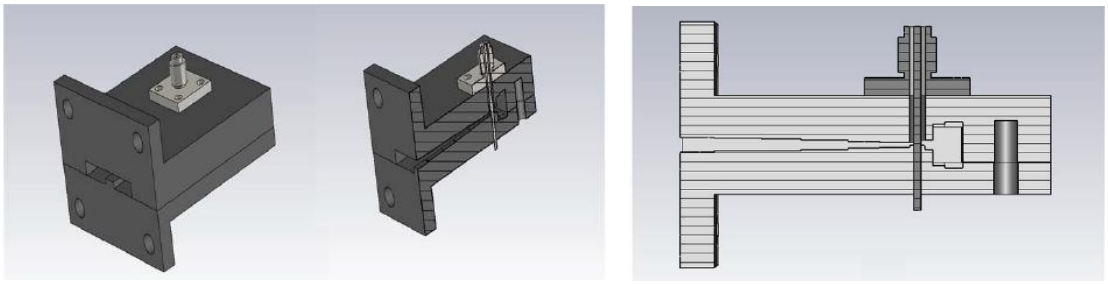
Na slici 3.33, prikazana je tranzicija u kojoj je iskorišćena ideja talasovodnog porta, [49]. Tranzicija se sastoji iz dva dela. Prvi deo predstavlja tranziciju sa koaksijalnog voda na talasovod sa jednim grebenom (engl. *Single Ridge Waveguide*) sa optimizovanim dimenzijama, kako bi se dobili odgovarajući nivoi prilagođenja, [53]–[55]. Drugi deo predstavlja podesivu strukturu koja treba da posluži za prilagođenje dimenzija talasovoda sa jednim grebenom u odgovarajuće dimenzije talasovodnog porta, [49]. Predložena tranzicija može se smatrati hibridom linijske i vertikalne tranzicije. Prvi deo tranzicije koristi koaksijalni 2.92 mm konektor, čiji je središnji vod u kontaktu sa provodnim cilindrom, kao što je prikazano na slici 3.33(a). Drugi deo tranzicije sastoji se od tri sekcije dužine $\lambda/4$ na učestanosti od 17,5 GHz, koje formiraju kratak spoj koji vidi središnji vod konektora sa leve strane, i od pet sekcija sa desne strane koje obezbeđuju odgovarajuće nivoe prilagođenja, [49].

Model predložene tranzicije [49], prikazan je na slici 3.34 u par perspektiva. Tranzicija je vrlo osetljiva na provodni materijal od kojeg je napravljena, [49].

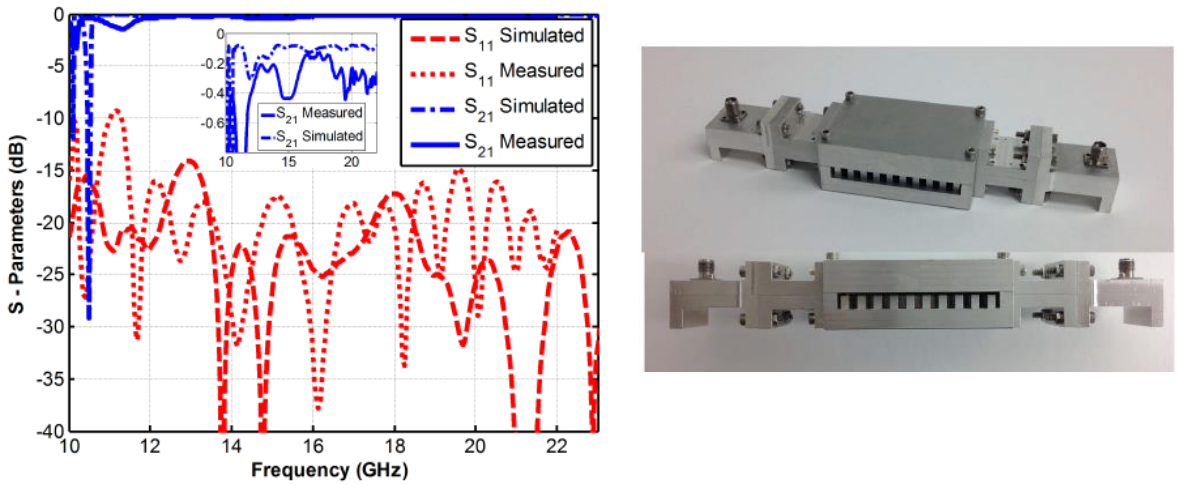


(a) *(b)*

Slika 3.33 Predložena dvostruka tranzicija zasnovana na ideji talasovodnog porta: a) poprečni presek, b) pogled duž talasovoda, [49]



Slika 3.34 Model tranzicije u par perspektiva, [49]



(a) *(b)*

Slika 3.35 Tranzicija iz dva dela: a) poređenje simuliranih i izmerenih rezultata S parametara, b) fabrikovana tranzicija spojena na krajeve grebenastog talasovoda, [49]

Poređenje rezultata simulacija i merenja *S* parametara tranzicije iz dva dela [49], prikazani su na slici 3.35, zajedno sa fabrikovanom tranzicijom, [49].

Treba napomenuti da je opseg učestanosti zabranjene zone za koji se vrši tranzicija od 10 do 23 GHz. Shodno tome, pokrivenost opsega zabranjene zone za povratne gubitke do 10 dB i do 15dB, iznosi 90,1% i 89%, respektivno. Predložena tranzicija i pored svoje kompleksnosti, pruža najbolje prilagođenje impedanse za grebenaste talasovode na bazi procepa, do sada ostvarene u literaturi.

U tabeli 3.3 objedinjene su performanse vertikalnih tranzicija realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa.

TABELA 3.3 PERFORMANSE VERTIKALNIH TRANZICIJA U TEHNOLOGIJI TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Literatura	***Topologija***	***Opseg učestanosti zabranjene zone [GHz]***	***Tip rezultata***	***Pokrivenost (RL = 10 dB) [%]***	***Pokrivenost (RL = 15 dB) [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***
[20]	Vertikalna	10 – 23	Merenja	26,1	7,7	1
[47]	Vertikalna	10 – 23	Simulacije	28,8	15,4	1
[48]	Vertikalna	7,16 – 17,13	Simulacije	25	15	1
[49]	Vertikalna	10 – 23	Simulacija	57,7	34	1
[50]	Vertikalna	10 – 23	Simulacija	27,7	17,7	2
[51]	Vertikalna	22 – 29,5	Simulacija	26	20	-
[49]	Vertikalna	10 – 23	Merenja	90,1	89	1

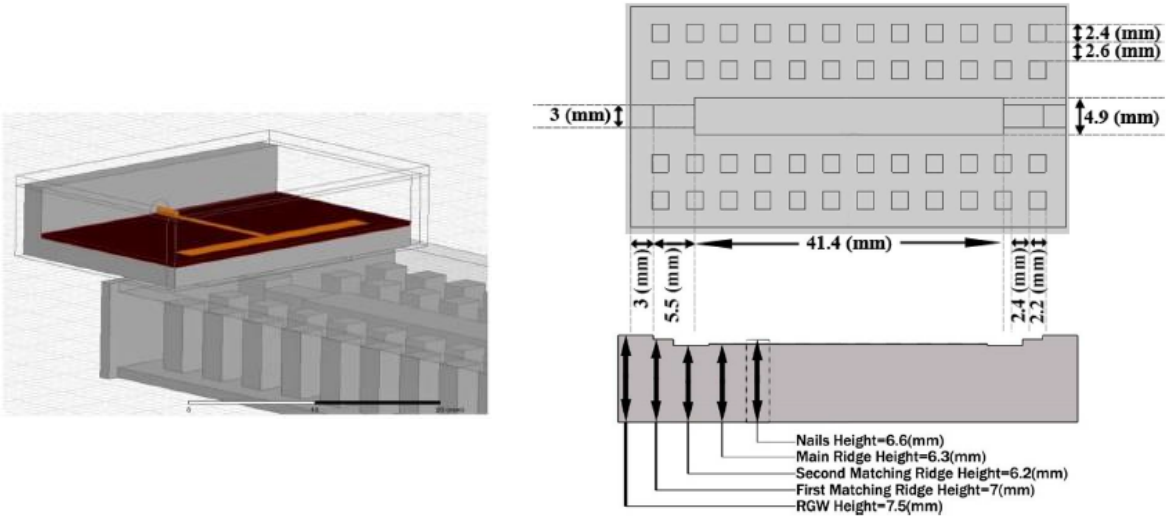
Predložene vertikalne tranzicije zasnovane su na sprezi koaksijalnih konektora, čiji se središnji vod spreže kapacitivno ili induktivno sa talasovodom na bazi procepa. Fabrikovana tranzicija predložena u [49], nudi daleko najbolje performanse po pitanju pokrivenosti opsega zabranjene zone i unesenog slabljenja, u odnosnu na ostale predložene vertikalne tranzicije, a i šire. Međutim, zahteva vrlo složenu i skupu fabrikaciju. Tranzicije iz [20], [47] i [48] predstavljaju uobičajen način pobuđivanja grebenastih talasovoda na bazi procepa, kada su grebeni realizovanih kao otvoreni vodovi, i rezultuju najlošijim performansama u odnosu na druge predložene vertikalne tranzicije. Korišćenjem sličnog principa tranzicije iz [20], [47] i [48], ali sa kratko spojenim grebenom, što zahteva donekle složeniju fabrikaciju, rezultuje boljim performansama po pitanju pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone, [49], [50], [51]. Potrebno je napomenuti da su tranzicije [50] i [51] realizovane koaksijalnim konektorom postavljenim sa donje strane grebenastog talasovoda, gde je središnji vod koaksijalnog konektora provučen kroz otvor u grebenu i provodno povezan sa gornjom provodnom pločom talasovoda na bazi procepa.

3.2.3 Tranzicije zasnovane na spregama kroz otvore

Tranzicije koje se oslanjaju na pobudu talasovoda na bazi procepa kroz otvore (slotove), uobičajeno su hibridne strukture koje se sastoje od dielektričnih podloga fabrikovanih u PCB tehnologiji i CNC fabrikovanih talasovoda na bazi procepa.

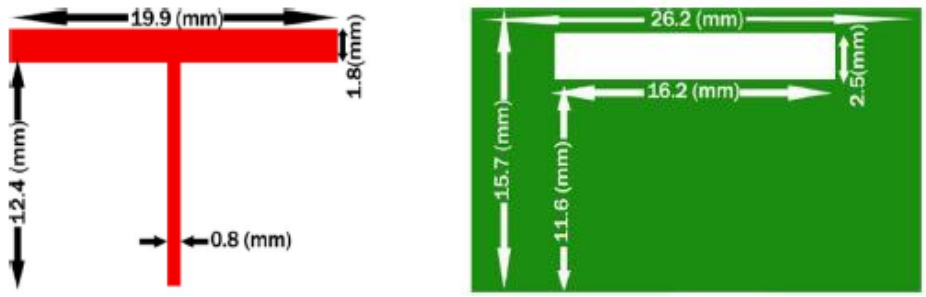
Prvi primer tranzicije koja koristi defektni slot u uzemljenom sloju mikrostripa za pobudu grebenastog talasovoda na bazi procepa, [56], prikazan je na slici 3.36. Tranzicija se sastoji iz dva dela, prvog koji predstavlja T mikrostrip vod sa defektnim slotom u uzemljenom sloju (slika 3.37), dok se drugi deo sastoji od tri sekcije različitih visina grebena, ilustrovanih na slici 3.36(b), [57]. Mikrostrip vod je oklopljen u metalnom kućištu, slika 3.36(a).

Na slici 3.37(a), prikazan je mikrostrip vod zatvoren pravougaonim peč rezonatorom, tzv. T vod, ispod kojeg je unutar uzemljenog sloja mikrostripa napravljen pravougaoni otvor, slika 3.37(b). Ovakva struktura pobuđuje dominantni mod TE_{01} koji se vidi na izlazu, odnosno na slotu u uzemljenom sloju mikrostripa. Analizom je dokazano da konverzija iz kvazi-TEM moda mikrostripa u mod slota TE_{01} je skoro idealna i ne pobuđuje više modove pravougaonog slota unutar uzemljenog sloja mikrostrip voda, [57]. Dimenzije slota iskorišćena je za prilagođenje nivoa sprege i unesenih gubitaka, [57]. Mikrostrip vod je postavljen unutar metalnog kućišta kako bi se sprečilo zračenje i smanjili gubici.



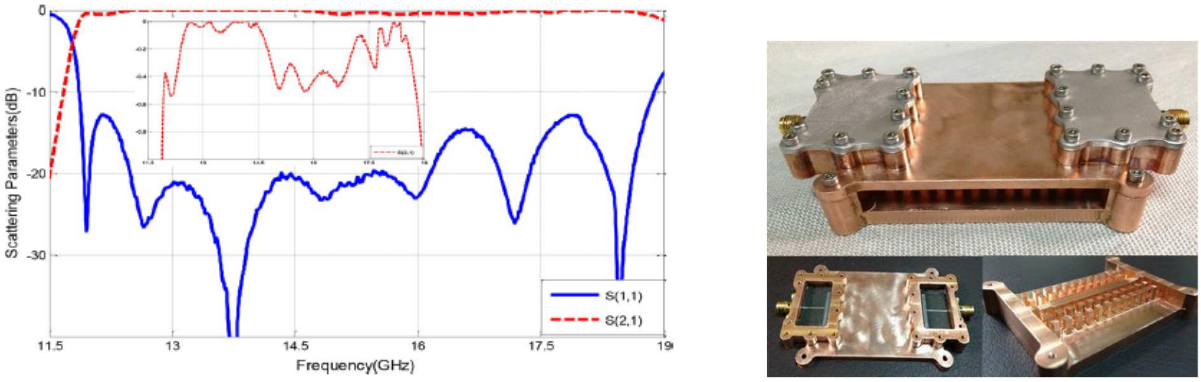
(a) *(b)*

Slika 3.36 Ilustracija tranzicije na grebenasti talasovod na bazi procepa kroz defektni slot u uzemljenom sloju mikrostrip voda: a) model tranzicije, b) prikaz modifikovanih sekcija grebena, [57]



(a) *(b)*

Slika 3.37 Mikrostrip vod: a) T vod, b) defektni slot unutar uzemljenog sloja, [57]



(a) *(b)*

Slika 3.38 Tranzicija na grebenasti talasovod na bazi procepa kroz defektni slot u uzemljenom sloju mikrostrip voda: a) izmereni S parametri, b) fabrikovano kolo, [57]

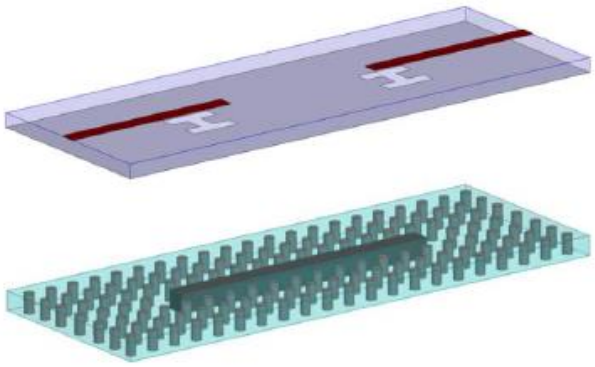
Za drugi deo tranzicije iskorišćena je stepenasta promena visine grebena od tri sekcije, sa smanjenom širinom grebena na njegovim krajevima, kao što je prikazano na slici 3.36(b), [57]. Krajevi grebena kratko su spojeni sa metalnim zidom, čime je omogućena jednostavna sprega moda TE_{01} sa kvazi-TEM modom grebenastog talasovoda na bazi procepa.

Jedinična ćelija predloženog grebenastog talasovoda projektovana je za opseg učestanosti zabranjene zone od 11 do 22 GHz. Na slici 3.38, prikazani su izmereni *S* parametri i fabrikovano kolo grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa dve predložene tranzicije na krajevima grebena, [57]. Rezultati merenja pokazuju pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone od 63,6%, za povratne gubitke do 10 dB, i od 37,3% za povratne gubitke do 15 dB, sa unesenim slabljenjem od oko 0,5 dB, [57].

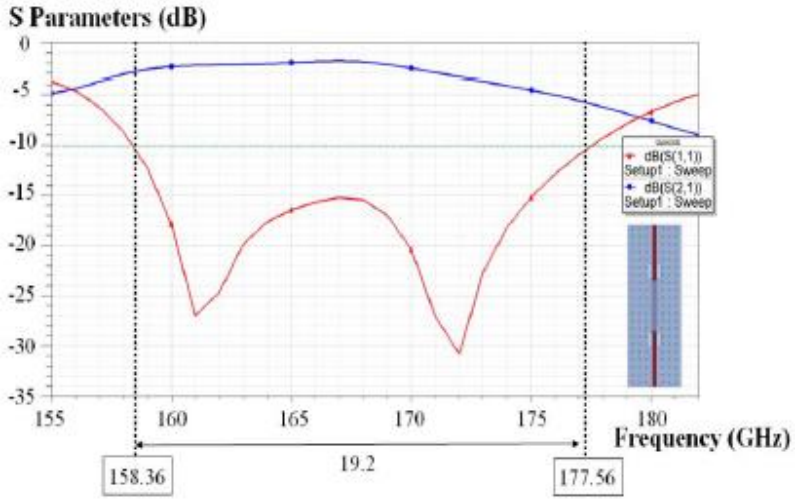
Naredni primer tranzicije sa defektnim otvorom u uzemljenom sloju, predstavljen je u [58] i primenjen je u mikrofluidičnom senzorskom kolu [59], realizovanom u tehnologiji nisko-temperaturne zajedno pečene keramike (engl. *Low Temperature Co-fired Ceramics* - LTCC). Tranzicija [58], prikazana na slici 3.39, sastoji se od sprege mikrostrip voda putem defektnog H slota u uzemljenom sloju, na grebenasti talasovod na bazi procepa realizovan u LTCC tehnologiji. H slot smanjuje povratno zračenje i manjih je dimenzija od pravougaonog slota, [58].

Jedinična ćelija predložene strukture projektovana je za opseg zabranjene zone koji se prostire od 151 do 190 GHz. Simulirani rezultati predložene tranzicije [58], prikazani su na slici 3.40. Potrebno je napomenuti da je za gornju provodnu ploču mikrostrip grebenastog talasovoda iskorišćen uzemljeni sloj mikrostrip voda.

Tranzicija je okarakterisana pokrivenošću zabranjene zone od skoro 50%, za povratne gubitke do 10 dB, dok je pokrivenost zabranjene zone za povratne gubitke do 15 dB, skoro 40%, [58].



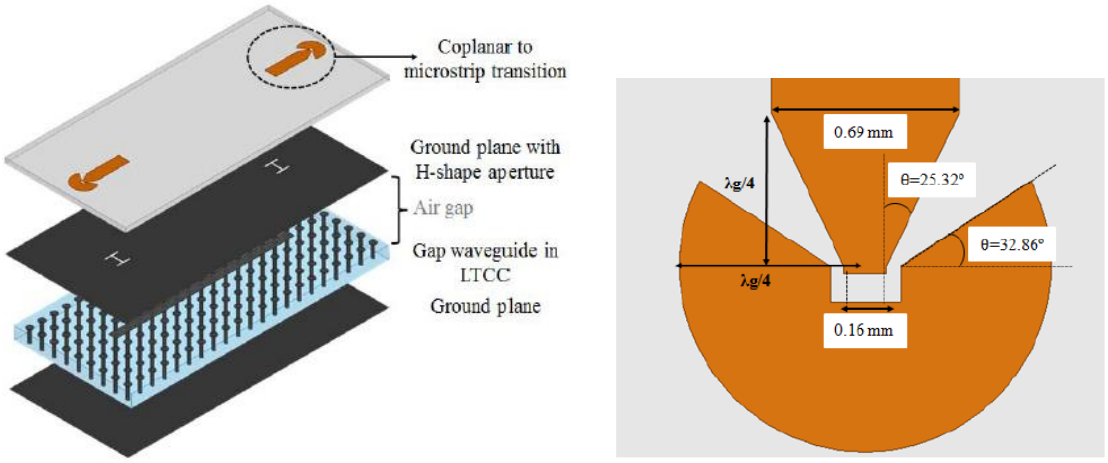
Slika 3.39 Tranzicija sa mikrostrip voda putem defektnog H slota na grebenasti talasovod na bazi procepa, [58]



Slika 3.40 Simulirani S parametri tranzicije sa mikrostrip voda putem defektnog H slota na grebenasti talasovod na bazi procepa, [58]

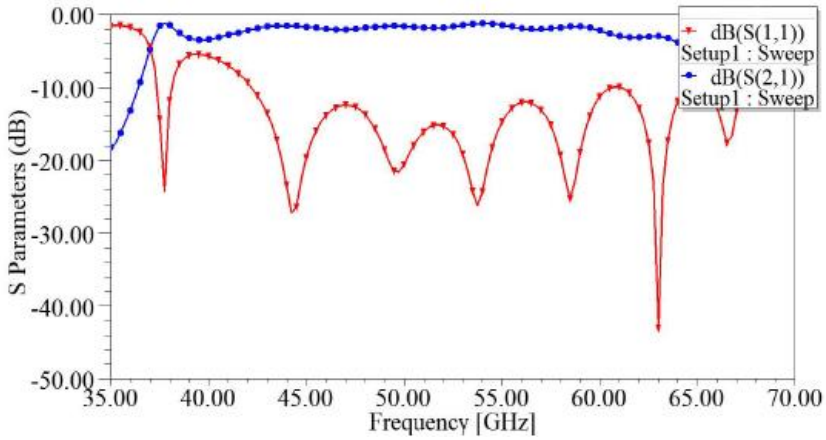
Ilustracija tranzicije iskorišćena u mikrofluidičnom senzorskom kolu [59], prikazan je na slici 3.41. Opseg učestanosti zabranjene zone u ovom slučaju projektovan je da bude od 45 do 75 GHz. Tranzicija je realizovana iz dva dela. Prvi deo je tranzicija sa koplanarnog talasovoda na mikrostrip vod, dok je drugi deo tranzicije sprega između mikrostrip voda kroz H slot, u uzemljenom sloju mikrostripa, na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, projektovan u LTCC tehnologiji. I u ovom slučaju uzemljeni sloj mikrostrip voda iskorišćen je kao gornja provodna ploča mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Detaljan prikaz tranzicije sa koplanarnog talasovoda na mikrostrip vod za korišćenje signal-zemlja-signal (SGS) sondi, dat je na slici 3.41(b).

Na slici 3.42, prikazani su simulirani *S* parametri za predloženu tranziciju, [59]. Dobijena je pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone od 76,6% i 22,3%, za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, respektivno.



(a) *(b)*

Slika 3.41 Ilustracija tranzicije primenjena u mikrofluidičnom senzorskom kolu: a) pogled na nivoe tranzicije, b) tranzicija sa koplanarnog talasovoda na mikrostrip vod, [59]

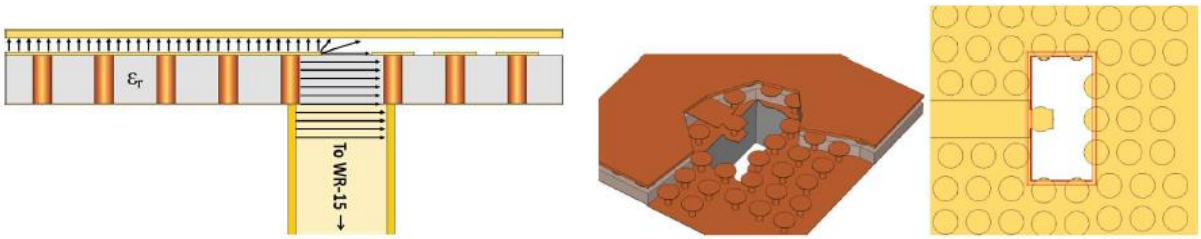


Slika 3.42 Simulirani S parametri tranzicije primenjene u mikrofluidičnom senzorskom kolu, [59]

Naredni pristup projektovanju tranzicije kroz otvore, realizovan je između konvencionalnog WR-15 talasovoda i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [31]. Projektovani opseg zabranjene zone u ovom slučaju iznosi od 45 do 72 GHz. Ilustracija predložene tranzicije prikazana je na slici 3.43, [31].

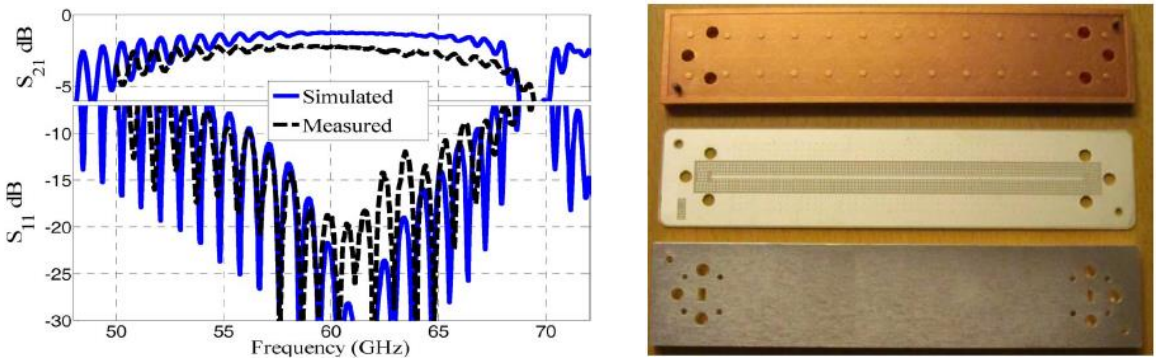
Konvencionalni talasovod WR-15 uveden je sa donje strane mikrostrip grebenastog talasovoda, slika 3.43(a). Dominantni mod prostiranja WR-15 talasovoda spreže se sa kvazi-TEM modom mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, putem otvora u donjem provodnom sloju talasovoda, kao što je prikazano na slici 3.43(a). Potrebno je napomenuti da je otvor napravljen samo u donjem provodnom sloju mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, ali ne i u dielektričnim materijalu. Sprega između dva moda podešena je pomoću metalnog stubić postavljenog na kraj mikrostrip grebena, kao što je prikazano na slici 3.43(b). Metalni stubić povezuje donji provodni sloj i mikrostrip greben. Pored ovog stubića za prilagođenje iskorišćeni su i stubići u okolini otvora na koji naleže talasovod, slika 3.43(b), [31].

Na slici 3.44, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih rezultata *S* parametara, za pravolinijski mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, sa dve predložene tranzicije implementirane na krajevima talasovoda, kao i izgled fabrikovane tranzicije, [31]. Pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone za izmerene rezultate sa slike 3.44, iznose 35,2% i 17,6%, za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, respektivno. Uneseno slabljenje u ovom opsegu iznosi oko 2,2 dB.



(a) *(b)*

Slika 3.43 Tranzicija sa WR-15 na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) poprečni presek, b) otvor u donjem provodnom sloju mikrostrip grebenastog talasovoda, [31]

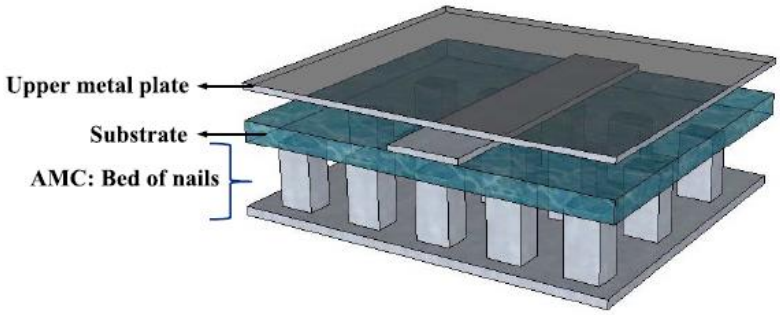


(a) *(b)*

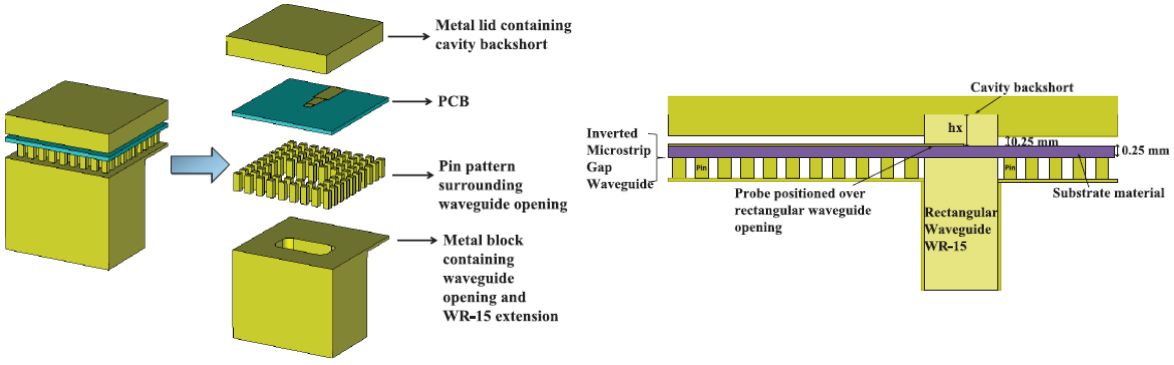
Slika 3.44 Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa WR-15 talasovodom: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikovano kolo, [31]

Naredni primer tranzicije pomoću konvencionalnog WR-15 talasovoda, predložen u [60], iskorišćen je za pobudu invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, prikazan na slici 3.45. Opseg učestanosti zabranjene zone dobijen simulacijom jedinične ćelije predložene strukture je od 50,55 do 75 GHz.

Ilustracija tranzicije između invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa i talasovoda WR-15, prikazana je na slici 3.46. Tranzicija se sastoji od mikrostrip linije zatvorene sa dve uže sekcije koje predstavljaju deo kola za prilagođenje, odnosno transformatore impedanse koji su na odgovarajući način postavljeni iznad otvora talasovoda, [60]. Otvor je napravljen u donjem provodnom sloju i unutar PMC površine, uklanjanjem metalnih stubića iznad otvora. Dodatno, iznad dela kola za prilagođenje, u gornjem provodnom sloju, odnosno u uzemljenju invertovanog mikrostrip voda, napravljen je otvor istih dimenzija kao talasovod WR-15. Dubina otvora u odnosnu na mikrostrip vod treba da bude na rastojanju od $\lambda/4$, kako bi se dobio efekat graničnog uslova kratke veze (engl. *Backshort*). Na ovaj način, omogućena je sprega između kvazi-TEM moda invertovanog mikrostrip talasovoda sa TE_{10} modom WR-15 talasovoda.

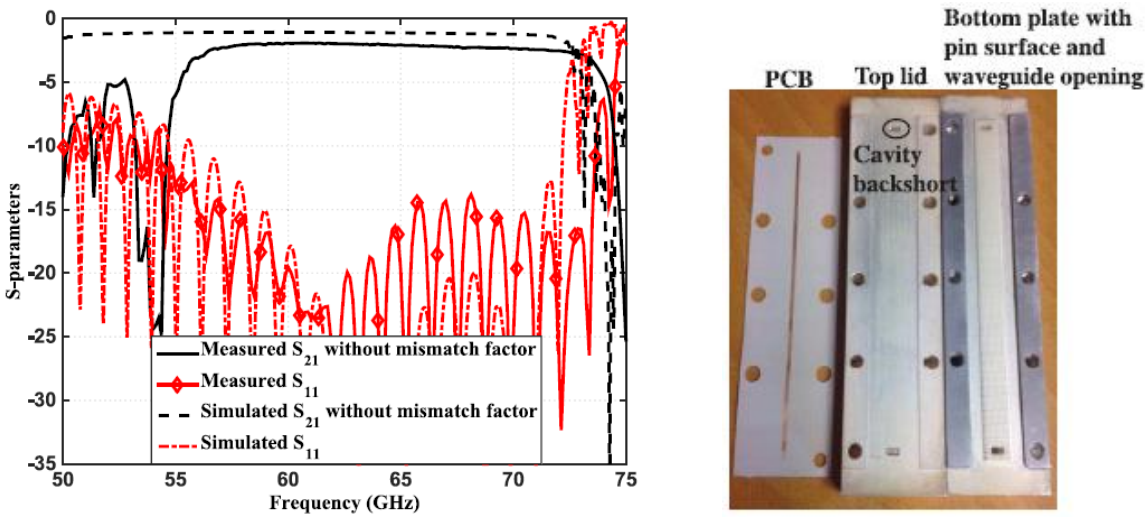


Slika 3.45 Invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa, [60]



(a) *(b)*

Slika 3.46 Ilustracija tranzicije WR-15 talasovoda na invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa: a) pogled na nivoe tranzicije, b) poprečni presek, [60]



(a) *(b)*

Slika 3.47 Invertovani mikrostrip talasovod na bazi procepa pobuđen tranzicijom sa WR-15: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, b) fabrikovano kolo, [60]

Na slici 3.47, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih rezultata fabrikovanog invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa dve predložene tranzicije na krajevima mikrostrip linije, [60]. Struktura metalnih stubića je ispunjena penastim materijalom *Rohacell HERO71,* usled prvobitnog problema naleganja dielektrične podloge na PMC površinu. Naime, tanke dielektrične podloge imale su tendenciju da se izvijaju i krive kada se postave na metalne stubiće, pa su pored penastog materijala za ispunjavanje prostora između stubića iskorišćene i deblje dielektrične podloge, koje su manje podložnije savijanju, [60]. Ovim pristupom su se poboljšali rezultati merenja, mada i dalje postoji značajan pomeraj i smanjenje ukupne širine opsega učestanosti zabranjene zone za razliku od simuliranih rezultata, slika 3.47.

Iz rezultata merenja mogu se dobiti pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone od 81% i od 36,2%, za povratne gubitke do 10 dB i do 15 dB, respektivno, sa unesenim slabljenjem od oko 3 dB. Gubici su uslovljeni korišćenjem izabranog dielektrika, dok se pomeranje učestanosti može pripisati neodgovarajućem naleganju dielektrične podloge na PMC površinu, mehaničkom sklapanju i tolerancijama montaže.

U tabeli 3.4 objedinjene su performanse linijskih tranzicija realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa.

Predložene tranzicije zasnovane su na spregama kroz otvore i predstavljaju modifikacije vertikalnih tranzicija. Sprega planarnih vodova kroz otvore u uzemljenom sloju na grebenaste talasovode na bazi procepa predstavljena je u tranzicijama [57], [58] i [59]. Predložene tranzicije odlikuju se dobrim performansama.

TABELA 3.4 PERFORMANSE TRANZICIJA KROZ OTVORE U TEHNOLOGIJI TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Literatura	*Topologija*	*Opseg zabranjene zone [GHz]*	*Tip rezultata*	*Pokrivenost (RL = 10 dB) [%]*	*Pokrivenost (RL = 15 dB) [%]*	*Uneseno slabljenje [dB]*
[57]	Kroz otvore	11 – 22	Merenja	63,6	37,3	0,5
[58]	Kroz otvore	151 – 190	Simulacije	50	40	2,5
[59]	Kroz otvore	45 – 75	Simulacije	76,6	22,3	2,5
[31]	Kroz otvore	45 – 72	Merenja	35,2	17,26	2,2
[60]	Kroz otvore	50,55 – 75	Merenja	81	36,2	3

Projektovana tranzicija iz [58] na osnovu rezultata simulacija daje mogućnost za realizaciju ovakvog tipa tranzicija na vrlo visokim učestanostima, mada usled primene dielektrika ima izraženije gubitke i realizovana je skupim procesom fabrikacije, LTCC. Primena konvencionalnih talasovoda za pobudu mikrostrip grebenastog i mikrostrip invertovanog talasovoda na bazi procepa, sa donje strane, predstavljena je u tranzicijama [31] i [60], respektivno, za primene na učestanostima u milimetarskom opsegu. Realizacija sa invertovanim mikrostrip vodom [60] pokazuje bolje pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone, uz izraženo uneseno slabljenje, zahteva složeniju montažu korišćenjem dielektričnih pena za ispunjavanje prostora između metalnih stubića.

Kao zaključak nameće se da su vertikalne i linijske tranzicije najčešće korišćene za pobudu grebenastih talasovoda na bazi procepa u literaturi. Po performansama i jednostavnosti izvedbe, linijske tranzicije predstavljaju najbolje rešenje. Vertikalne tranzicije dominantno su primenjivane na nižim učestanostima i u većini slučajeva se koriste za pobudu grebenastog talasovoda na bazi procepa, dok se tranzicije kroz otvore koriste najčešće za pobudu modifikovanih grebenastih talasovoda koji koriste dielektrične materijale; mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa. Takođe, tranzicije kroz otvore uglavnom su projektovane za kola koja rade na učestanostima u milimetarskom opsegu. Linijske tranzicije podjednako su korišćene i kod grebenastih i kod mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa.

Posmatranjem rezultata fabrikovanih i okarakterisanih tranzicija najbolje performanse od svih vrsta tranzicija predloženih u literaturi poseduje tranzicija iz [49]. Naime, tranzicija zasnovana na ideji pobuđivanja grebenastog talasovoda na bazi procepa pomoću talasovodnog porta, odlikuje se izmerenim vrednostima pokrivenosti opsega zabranjene zone od 89% za povratne gubitke do 15 dB i unesenog slabljenja od 1 dB. Međutim, tranzicija iz [49] zahteva složen proces fabrikacije i projektovana je za niske učestanosti. Od linijskih tranzicija najbolje izmerene performanse po pitanju pokrivenosti opsega učestanosti zabranjene zone i unesenog slabljenja, nudi tranzicija iz [35], koja takođe zahteva složeniji proces fabrikacije korišćenjem dielektričnih materijala i CNC tehnologije. Najbolje performanse od tranzicija kroz otvore poseduje tranzicija iz [57] sa pokrivenošću opsega učestanosti zabranjene zone od 37,3% za povratne gubitke do 15 dB i unesenim slabljenjem od 0,5 dB.

3.3 Filtri u talasovodima na bazi procepa

Mikrotalasni filtri predstavljaju komponente čije su performanse od kritične važnosti za sveobuhvatan rad komunikacionih sistema. Shodno tome, talasovodi na bazi procepa iskorišćeni su za projektovanje mikrotalasnih filtara visokih performansi i kompaktnih dimenzija, za rad na visokim učestanostima.

Filtri u talasovodima na bazi procepa zasnivaju se na rezonatorima, koje mogu biti dobijeni modifikacijom ili uklanjanjem jednog ili više metalnih stubića (ili uzemljenih peč rezonatora) iz PMC površine talasovoda na bazi procepa. Ovim pristupom dobijaju se rezonantne šupljine koje, ako su odgovarajućih dimenzija, mogu da pobude modove na određenim učestanostima unutar opsega zabranjene zone. Pored rezonantnih šupljina, rezonatori u talasovodima na bazi procepa mogu biti realizovani sekcijama grebena ili mikrostrip grebena (invertovanog mikrostrip voda) dužine $\lambda/2$, na rezonantnim učestanostima unutar opsega zabranjene zone.

Za analizu rezonatora u talasovodima na bazi procepa koriste se tzv. *super ćelije rezonatora*. Super ćelija rezonatora sastoji se od prostora u kojem je modifikovan ili uklonjen jedan ili više metalnih stubića (ili uzemljenih peč rezonatora), okružen odgovarajućom PMC strukturom, sa definisanim bočnim periodičnim graničnim uslovima.

Realizacija filtara u talasovodima na bazi procepa zasnovana je na sprezi rezonantnih elemenata. Rezonantni elementi jedan u odnosu na drugi mogu biti postavljeni vertikalno ili horizontalno, i spregnuti direktno ili preko jedne ili više jediničnih ćelija realizovane PMC površine.
Filtre u talasovodima na bazi procepa možemo podeliti na filtre realizovane u:

- grebenastim talasovodima na bazi procepa,
- talasovodima na bazi procepa sa kanalom,
- mikrostrip grebenastim talasovodima na bazi procepa.

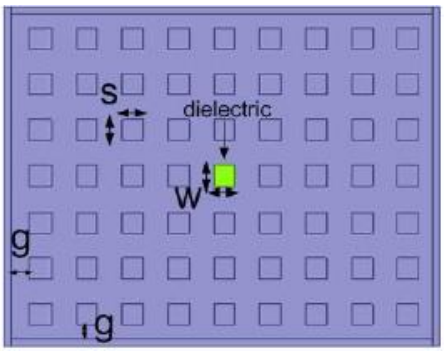
Pobude rezonatora u filtrima realizovanim u talasovodima na bazi procepa mogu da budu izvedene direktnim sprezanjem rezonantnih šupljina sa središnjim vodom koaksijalnog konektora ili pobudom preko grebenastih talasovoda na bazi procepa.

U nastavku je dat pregled filtara u talasovodima na bazi procepa iz literature, koji su okarakterisani centralnom učestanošću, unesenim slabljenjem i povratnim gubicima u propusnom opsegu, relativnom širinom propusnog opsega (engl. *Fractional Bandwidth - FBW*) i dimenzijama filtara izraženim u talasnim dužinama ($\lambda_0 x \lambda_0$), gde λ_0 predstavlja talasnu dužinu u vazduhu na centralnoj učestanosti filtra. Pošto u pojedinim radovima iz literature nisu navedene sve relevantne osobine filtara, sve vrednosti koje nedostaju dobijene su očitavanjem simuliranih ili izmerenih rezultata predloženih filtara. Takođe, prilikom određivanja dimenzija filtara uzeta je u obzir cela struktura filtra zajedno sa okolnim PMC ćelijama i uvodnim linijama.

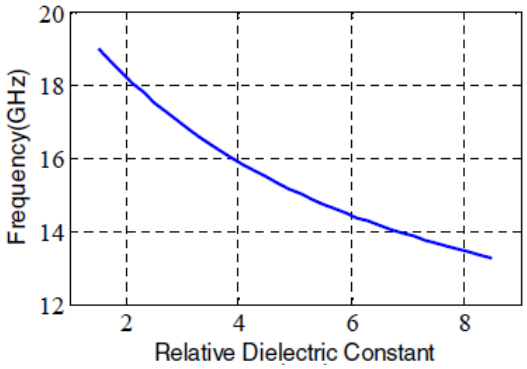
3.3.1 Filtri realizovani u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa

Filtri u grebenastim talasovodima na bazi procepa najčešće se realizuju spregom rezonantnih šupljina načinjenih uklanjanjem ili modifikacijom jednog ili više metalnih stubića unutar PMC površine.

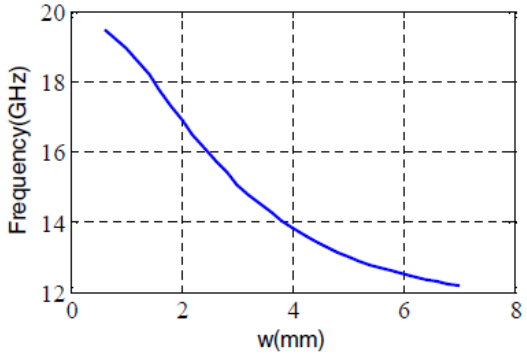
U [61] predložena je zamena jednog metalnog stubića, stubićem koji je načinjen od dielektričnog materijala. Super ćelija ovakvog rezonatora ilustrovana je na slici 3.48. Promenom permitivnosti dielektričnog materijala ili promenom dimenzije *w*, možemo da utičemo na promenu rezonantne učestanosti ovog rezonatora, kao što je prikazano na slici 3.49.



Slika 3.48 Ilustracija super ćelije rezonatora kod koje je metalni stubić zamenjen stubićem od dielektričnog materijala, [61]

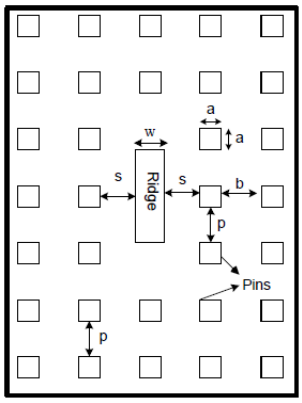


(a)

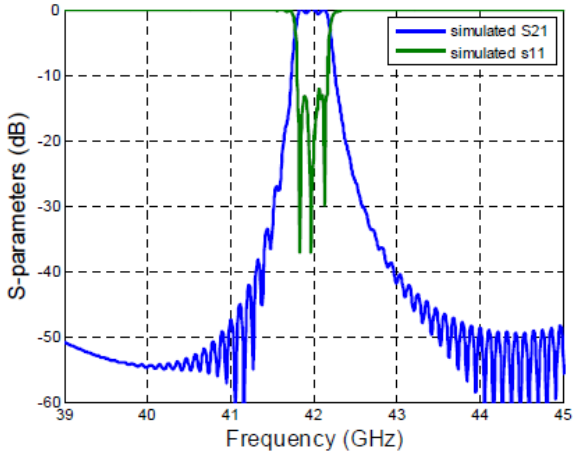


(b)

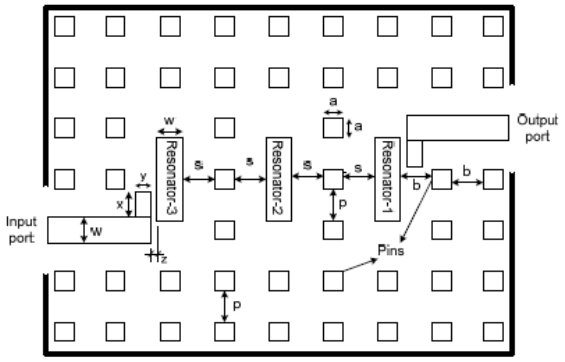
Slika 3.49 Promena rezonantne učestanosti super ćelije rezonatora sa stubićem od dielektričnog materijala: a) promenom permitivnosti, b) promenom dimenzije w, [61]



Slika 3.50 Ilustracija super ćelije rezonatora realizovanog kao sekcija grebena dužine λ/2, [62]



(a)



(b)

Slika 3.51 Filtar trećeg reda realizovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani rezultati, b) ilustracija geometrije predloženog filtra sa kritičnim geometrijskim parametrima, [62]

Projektovanje $\lambda/2$ rezonatora realizovanog kao sekcija grebena dužine $\lambda/2$, na rezonantnoj učestanosti, okružena sa metalnim stubićima predstavljen je u [62]. Na slici 3.50, prikazana je ilustracija super ćelije rezonatora sa kritičnim geometrijskim parametrima.

Primenom predloženog $\lambda/2$ rezonatora projektovan je filtar propusnik opsega trećeg reda, prikazan na slici 3.51(b). Filtar je projektovan na centralnoj učestanosti od 42 GHz, spregom između rezonatora preko jednog reda metalnih stubića, korišćenjem standardne filtarske tehnike, koeficijenta sprege i spoljašnjeg Q faktora [63]. Simulirani rezultati i ilustracija predloženog filtra trećeg reda prikazani su na slici 3.51.

Filtar trećeg reda okarakterisan je unesenim slabljenjem od 0,7 dB, povratnim gubicima od 12 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 1,1% i dimenzijama $2{,}52\lambda_0$ x $1{,}83\lambda_0$.

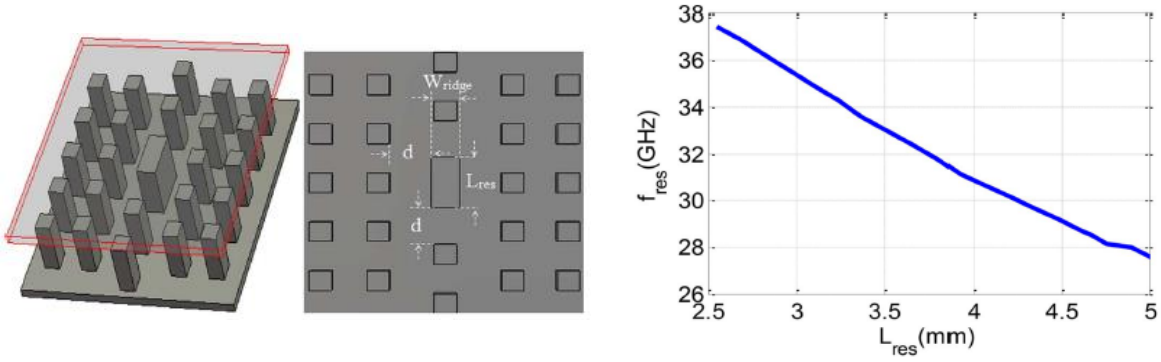
U [64] predstavljen je filtar realizovan slaganjem $\lambda/2$ rezonatora jedan na drugi. Rezonatori su realizovani sekcijama grebena dužine $\lambda/2$ na rezonantnim učestanostima, okruženi sa svih strana sa dva

reda metalnih stubića. Ovakvom konfiguracijom dobijeni su minijaturni filtri u tehnologiji grebenastih talasovoda na bazi procepa, značajno manjih težina.

Na slici 3.52, prikazana je super ćelija predložnog rezonatora sa grebenom dužine $\lambda/2$ i promena rezonantne učestanosti u zavisnosti od promene dužine grebena, L_{res}.

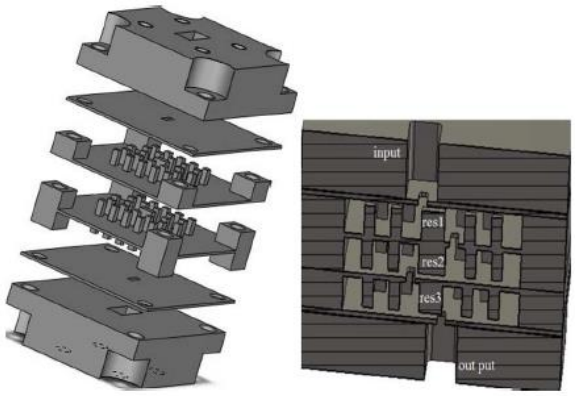
Primenom predloženog rezonatora projektovan je filtar propusnik opsega trećeg reda na centralnoj učestanosti od 35 GHz. Filtar je projektovan korišćenjem Čebiševljeve filtarske funkcije, sa unesenim slabljenjem manjim od 1 dB, povratnim gubicima boljim od 20 dB i relativnim propusnim opsegom od 1%. Za projektovanje filtra iskorišćena je standardna filtarska tehnika, korišćenjem koeficijenta sprege i spoljašnjeg Q faktora [63]. Ilustracija projektovanog filtra trećeg reda, realizovanog slaganjem predloženih rezonatora jedan na drugi, prikazana je na slici 3.53.

Rezonatori su međusobno spregnuti putem otvora, koji su napravljeni između zidova susednih rezonatora, slika 3.53. Otvori su takođe iskorišćeni za sprezanje rezonatora sa pobudnim strukturama, odnosno talasovodima WR-28, [64].

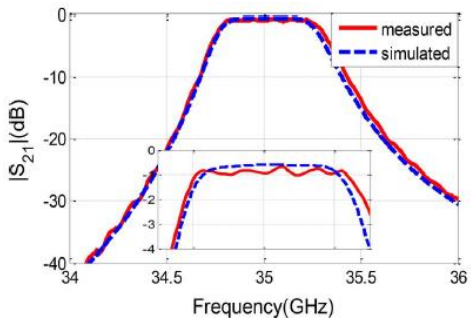


(a) *(b)*

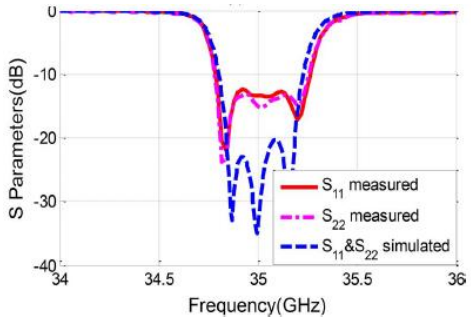
Slika 3.52 Super ćelija predloženog rezonatora sa grebenom dužine λ/2: a) pogled odozgo, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra L_{res}, [64]



Slika 3.53 Ilustracija filtra propusnika opsega trećeg reda realizovanog u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa, dobijen slaganjem rezonatora jedan na drugi, [64]



(a)



(b)



(c)

Slika 3.54 Filtar propusnik opsega trećeg reda realizovan slaganjem rezonatora sa grebenom jedan na drugi: a) poređenje simuliranih i izmerenih S_{21} parametara, b) poređenje simuliranih i izmerenih S_{11} parametara, b) fabrikacija, [64]

Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, kao i izgled fabrikovanog filtra trećeg reda, prikazani su na slici 3.54. Filtar na centralnoj učestanosti od 35 GHz, okarakterisan je unesenim slabljenjem od 0,65 dB, povratnim gubicima oko 12 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 1% i dimenzijama 1,7λ_0 x 1,55λ_0. Treba napomenuti da je filtar fabrikovan u CNC tehnologiji od mesinga i presvučen slojem srebra, kako bi se smanjili gubici u materijalu, [64].

U tabeli 3.5 objedinjene su sve karakteristike filtara realizovanih u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa.

TABELA 3.5 KARAKTERISTIKE FILTARA REALIZOVANIH U TEHNOLOGIJI GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Literatura	***Tip rezultata***	***Centralna učestanost [GHz]***	***Red filtra***	***Relativni opseg [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***	***Povratni gubici [dB]***	***Dimenzije filtra [λ_0 x λ_0]***
[62]	Simulacije	42	3	1,1	0,7	12	2,52 x 1,83
[64]	Merenja	35	3	1	0,65	12	1,7 x 1,55

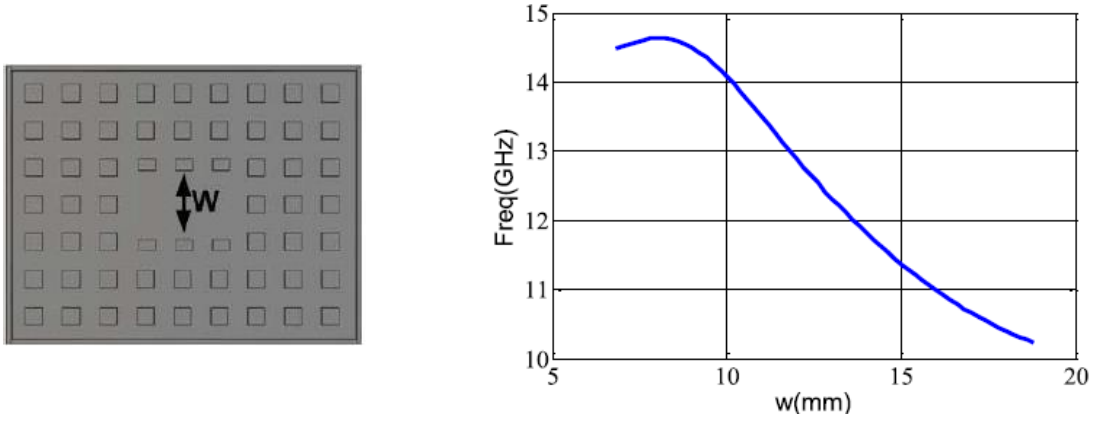
U tehnologiji grebenastih talasovoda na bazi procepa projektovana su dva filtra trećeg reda sa dobrim performansama, u milimetarskom opsegu učestanosti. Filtri su realizovan sekcijama grebena dužine $\lambda/2$, gde je dodatna minijaturizacija dobijena slaganjem delova filtra jedan na drugi, [64].

3.3.2 Filtri realizovani u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom

Za razliku od realizovanih filtara u tehnologiji grebenastog talasovoda, filtri u talasovodima sa kanalom iz literature realizovani su pomoću rezonantnih šupljina koje se dobijaju uklanjanjem većeg broja metalnih stubića iz PMC površine. Rezonantne šupljine međusobno se mogu spregnuti kroz jedan red metalnih stubića PMC površine ili putem malih otvora dobijenih uklanjanjem jednog ili više metalnih stubića.

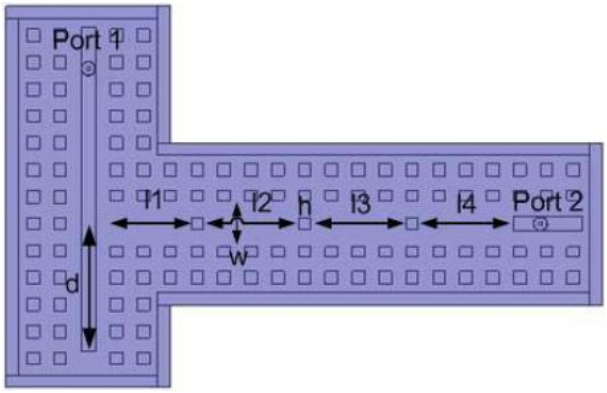
Prvi primer filtra zasnovan je na direktno spregnutim rezonantnim šupljinama, [48]. Rezonantne šupljine su dobijene uklanjanjem tri metalna stubića iz PMC površine. Izgled projektovane super ćelije rezonatora prikazan je na slici 3.55(a). Rezonantna učestanost projektovane super ćelije rezonatora može biti modifikovana promenom parametra *w*, odnosno promenom širine rezonantne šupljine sužavanjem metalnih stubića ispod i iznad rezonantne šupljine, [48]. Promena rezonantne učestanosti usled promene parametra *w*, prikazana je na slici 3.55(b).

Na osnovu predložene super ćelije rezonatora, projektovan je filtar propusnik opsega četvrtog reda, sa maksimalno ravnom filtarskom karakteristikom, na centralnoj učestanosti od 11,59 GHz i sa propusnim opsegom od 72 MHz, ilustrovan na slici 3.56. Filtar se sastoji od četiri rezonantne šupljine širina *w*, postavljene u liniju, direktno spregnute preko jednog metalnog stubića. Za optimizaciju filtarskog odziva iskorišćene su dužine rezonantnih šupljina, $l_1 = l_4$ i $l_2 = l_3$, i visina metalnog stubića *h* između druge i treće rezonantne šupljine. Filtar je realizovan u asimetričnoj strukturi, gde su rezonatori pobuđeni grebenastim talasovodima na bazi procepa. Sprega između prve rezonantne šupljine i grebenastog talasovoda na bazi procepa optimizovana je parametrom *d*, slika 3.56, [48].

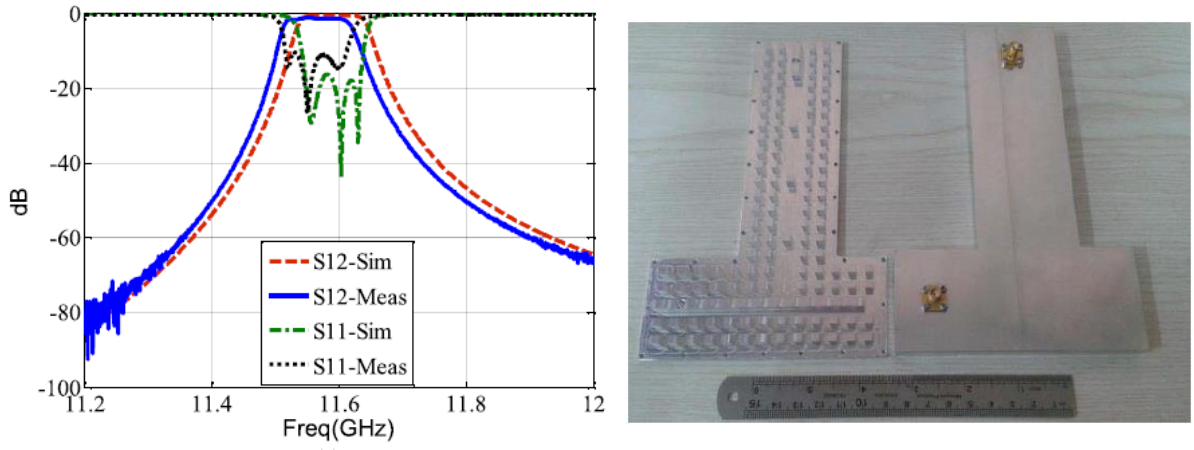


(a) *(b)*

Slika 3.55 Super ćelija rezonantne šupljine: a) pogled odozgo bez gornje provodne ploče, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra w, [48]



Slika 3.56 Ilustracija filtra četvrtog reda realizovan pomoću rezonantnih šupljina talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [48]

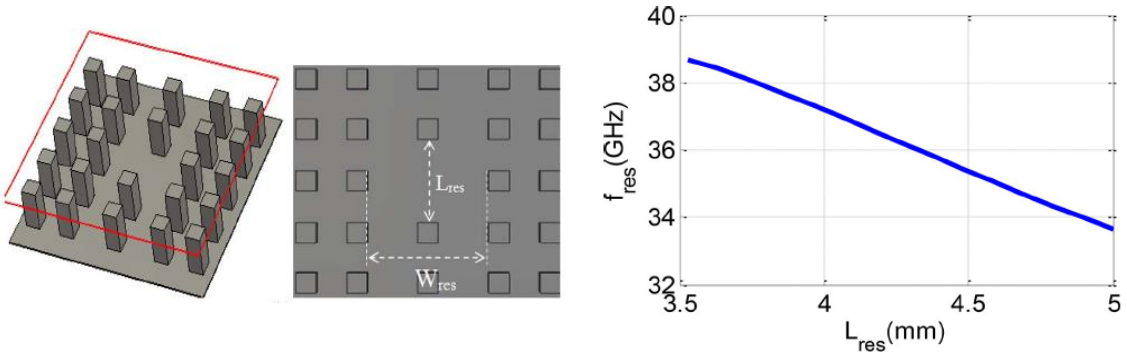


(a) *(b)*

Slika 3.57 Filtar četvrtog reda realizovan pomoću rezonantnih šupljina talasovoda na bazi procepa sa kanalom: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, b) fabrikacija u aluminijumu pomoću CNC tehnologije, [48]

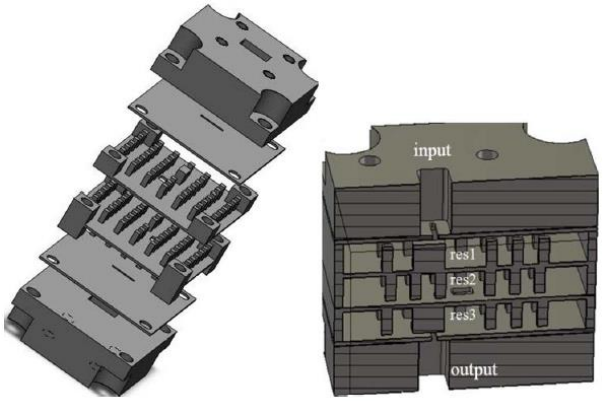
Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara filtra četvrtog reda i izgled realizovanog filtra u CNC tehnologiji, prikazani su na slici 3.57. Filtar je okarakterisan unesenim slabljenjem od 1 dB, povratnim gubicima od 10 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 0,62% i dimenzijama $14{,}91\lambda_0$ x $4{,}1\lambda_0$, [48]. Za pobudu filtra iskorišćena je modifikacija tranzicije iz [20].

Naredni primer filtra propusnika opsega učestanosti realizovan je slaganjem rezonatora jedan na drugi, u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [64]. Filtar i rezonator sličnih konfiguracija navedeni su u filtrima realizovanim u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa, [64], sa razlikom da je sada rezonator realizovan kao rezonantna šupljina, dobijena uklanjanjem jednog metalnog stubića iz PMC površine. Super ćelija predloženog rezonatora i promena učestanosti u zavisnosti od promene dužine rezonantne šupljine L_{res}, sa konstantnom širinom šupljine W_{res}, prikazana je na slici 3.58.



(a) *(b)*

Slika 3.58 Super ćelija rezonantne šupljine: a) pogled odozgo, b) odziv rezonantne učestanosti dobijen promenom parametra L_{res}, [64]

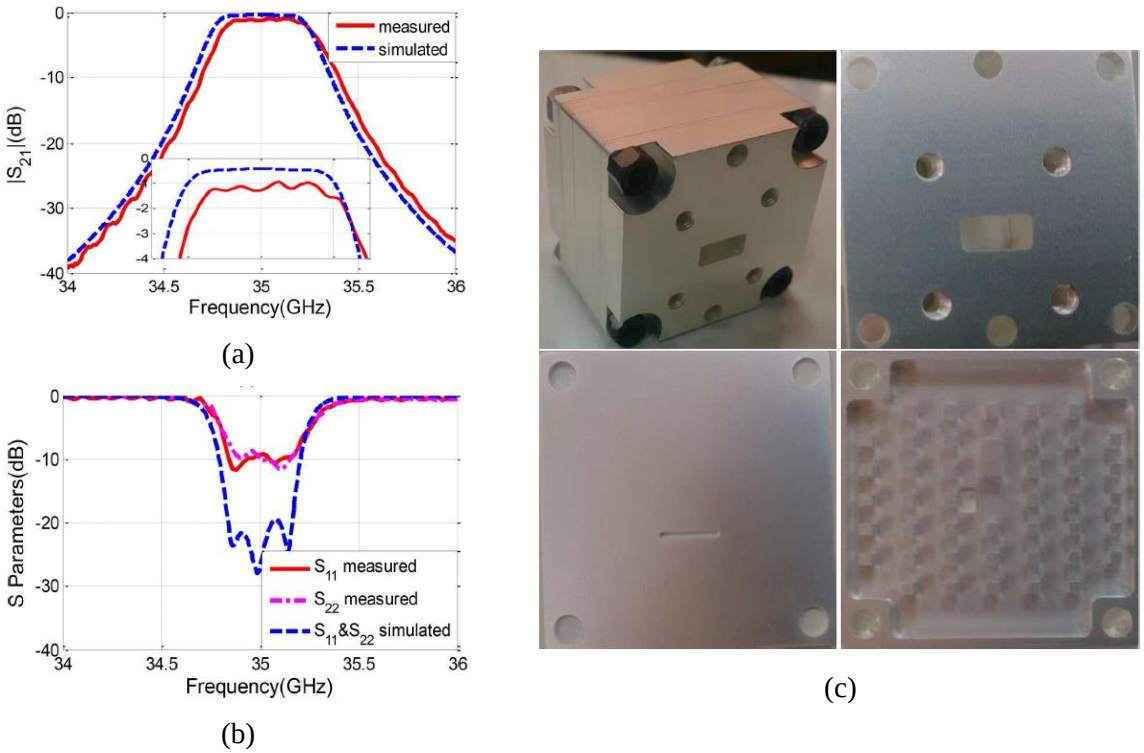


Slika 3.59 Ilustracija filtra propusnika opsega trećeg reda realizovanog u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom, dobijen slaganjem rezonantnih šupljina jedna na drugu, [64]

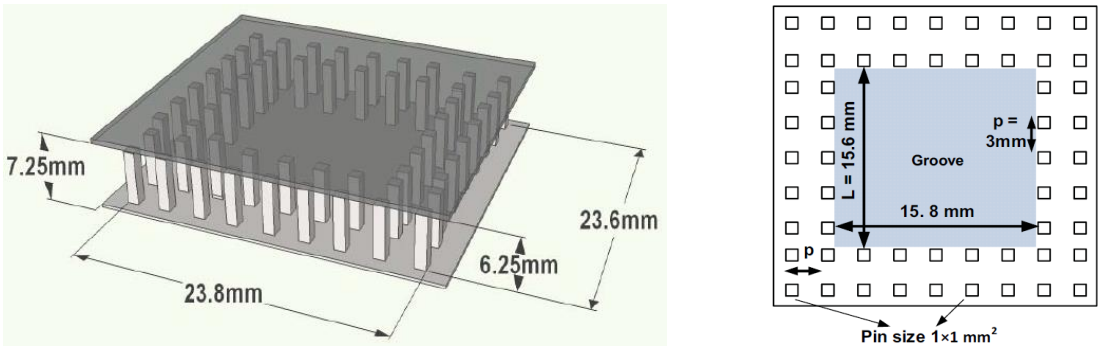
Na osnovu predložene super ćelije, projektovan je filtar propusni opsega učestanosti trećeg reda, Čebiševljeve filtarske funkcije, na centralnoj učestanosti od 35 GHz, sa unesenim slabljenjem manjim od 1 dB, povratnim gubicima boljim od 20 dB i relativnom širinom opsega učestanosti od 1%. Za projektovanje filtra iskorišćena je standardna filtarska tehnika, korišćenjem koeficijenta sprege i spoljašnjeg *Q* faktora [63]. Ilustracija predloženog filtra propusnika opsega trećeg reda realizovanog slaganjem tri rezonantne šupljine, sa slike 3.58(a), jedna na drugu, prikazan je na slici 3.59.

Sprega između rezonatora realizovana je korišćenjem malih otvora, slika 3.59, napravljenih između zidova susednih rezonatora. Pored malih otvora za podešavanje sprege između prvog rezonatora i pobudnih talasovoda WR-28, korišćene su i kratke sekcije grebena, slika 3.59, [64].

Na slici 3.60, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, kao i izgled fabrikovanog filtra trećeg reda. Filtar na centralnoj učestanosti od 35 GHz okarakterisan je unesenim slabljenjem od oko 1 dB, povratnim gubicima od 9 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 1% i dimenzijama $2{,}1\lambda_0$ x $1{,}9\lambda_0$. Filtar je fabrikovan u CNC tehnologiji glodanjem u mesingu i kasnije presvučen srebrom, [64].



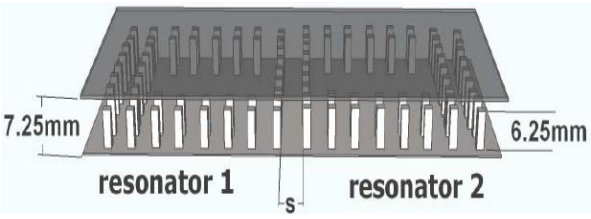
Slika 3.60 Filtar propusnik opsega trećeg reda realizovan u tehnologiji talasovod na bazi procepa, slaganjem rezonantnih šupljina jedna na drugu: a) poređenje simuliranih i izmerenih S_{21} parametara, b) poređenje simuliranih i izmerenih S_{11} parametara, b) fabrikacija, [64]



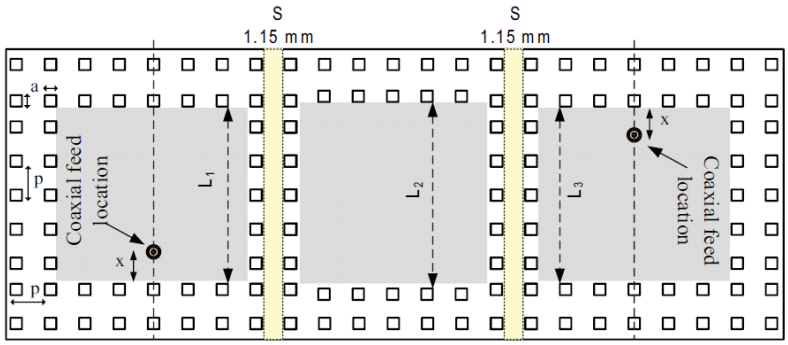
Slika 3.61 Super ćelija rezonantne šupljine sa velikim faktorom dobrote: a) pogled iz perspektive sa gornjim provodnim slojem, b) pogled odozgo, nije prikazan gornji provodni sloj, [65]

Rezonantne šupljine velikih faktora dobrote (engl. *High Q*), realizovane uklanjanjem većeg broja metalnih stubića, iskorišćenje su za projektovanje filtara trećeg i petog reda, [65]. Super ćelija rezonantne šupljine sa kritičnim dimenzijama, prikazana je na slici 3.61.

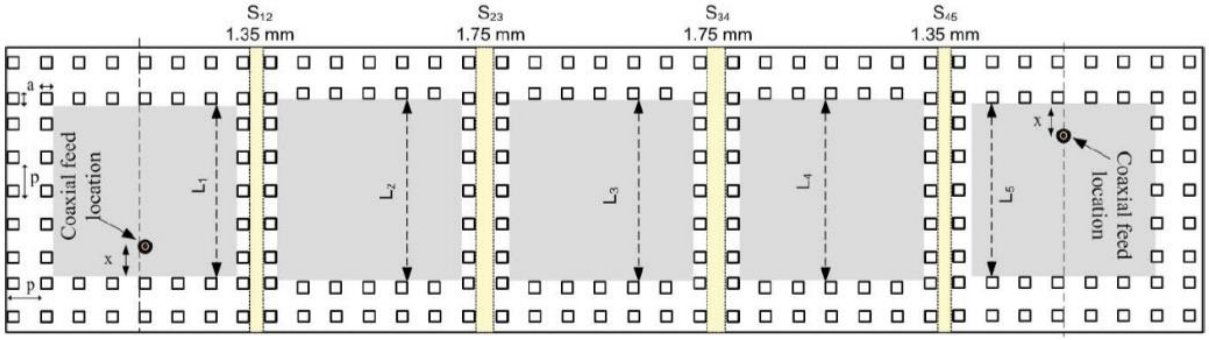
Sprega između rezonantnih šupljina izvršena je preko dva reda metalnih stubića, dok je nivo sprege podešen promenom razmaka između redova metalnih stubića parametrom *s*, kao što je prikazano na slici 3.62. Za projektovanje filtra iskorišćeni su koeficijent sprege i spoljašnji *Q* faktor, [63].



Slika 3.62 Rezonantne šupljine sa veliki Q faktorom, spregnute preko dva reda metalnih stubića, gde parametar s služi za podešavanje sprege, [65]



(a)



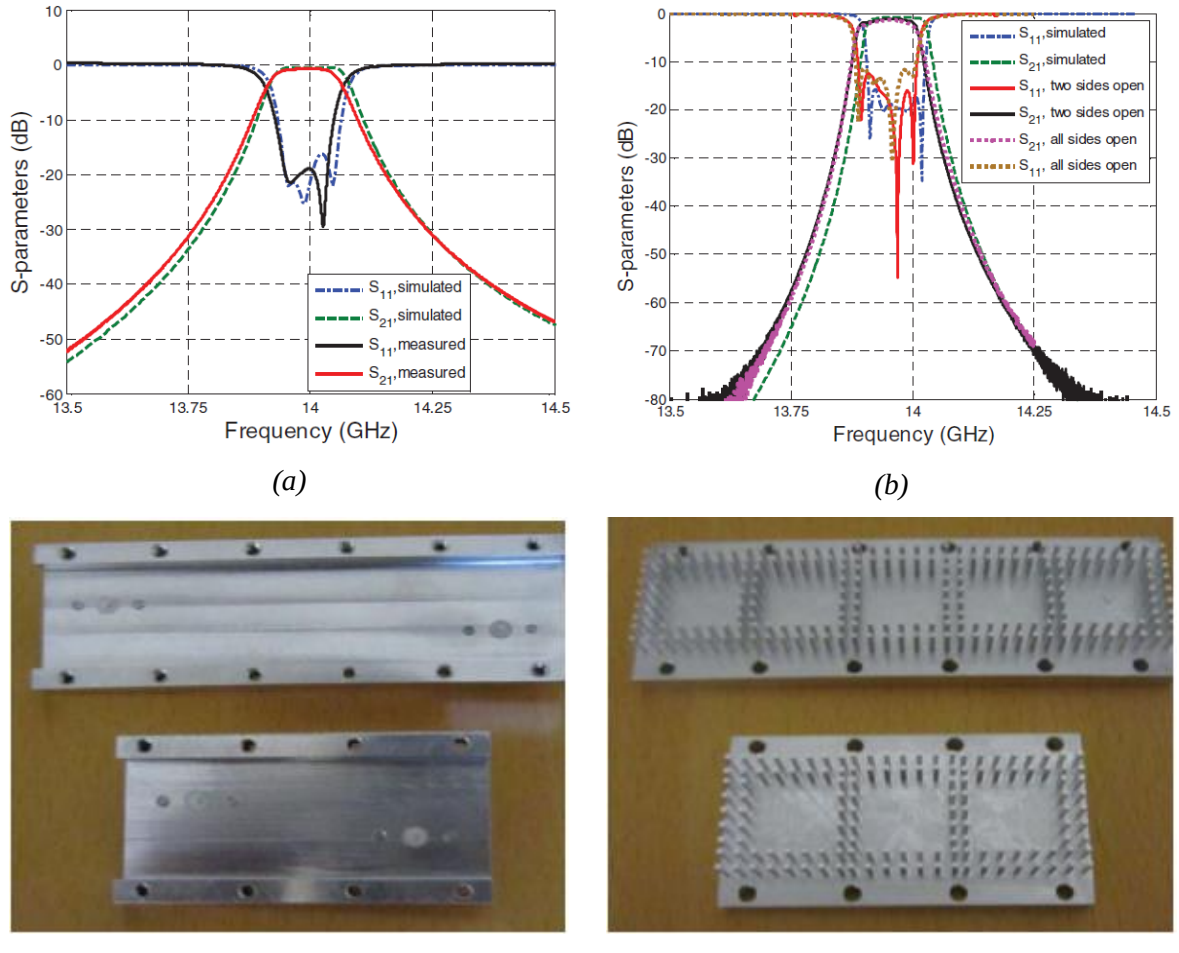
(b)

Slika 3.63 Ilustracija filtara dobijenih spregom rezonantnih šupljina: a) filtar trećeg reda, b) filtar petog reda, [65]

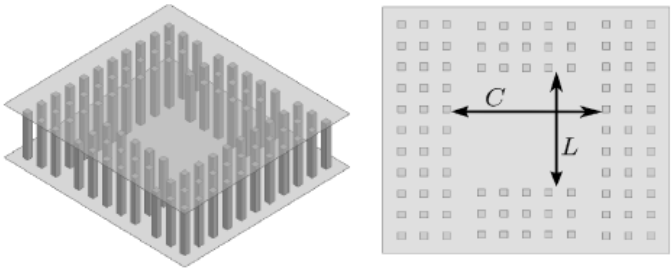
Uobičajen način pobude rezonantnih šupljina realizovanih u talasovodima na bazi procepa sa kanalom, jeste uvođenje koaksijalne probe unutar šupljine rezonatora, što je tipičan način pobude konvencionalnih talasovoda, [66]. U ovom slučaju pobuda je realizovana uvođenjem središnjeg voda SMA konektora unutar šupljine, kroz otvore na gornjem provodnom sloju.

Korišćenjem navedenih rezonantnih šupljina projektovani su filtri propusnici opsega trećeg i petog reda Čebiševljevom filtarskom funkcijom, sa talasanjem u propusnom opsegu od 0,1 dB, povratnim gubicima od 16,4 dB i relativnom širinom propusnog opsega od 1% na centralnoj učestanosti od 14 GHz. Projektovani filtri sa kritičnim dimenzijama i geometrijskim parametrima, ilustrovani su na slici 3.63, [65].

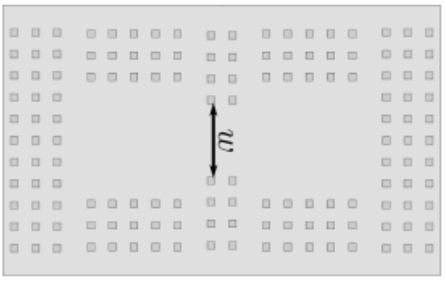
Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, kao i izgled fabrikovanog filtra trećeg i petog reda, prikazani su na slici 3.64. Filtar trećeg reda na centralnoj učestanosti od 13,95 GHz okarakterisan je unesenim slabljenjem oko 1 dB, povratnim gubicima oko 20 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 1% i dimenzijama od $3{,}2\lambda_0$ x $1{,}1\lambda_0$. Sa druge strane, filtar petog reda ima vrlo blisku centralnu učestanost, slično uneseno slabljenje i relativnu širinu propusnog opsega kao filtar trećeg reda, dok poseduje lošije povratne gubitke od oko 11 dB i većih je dimenzija $5{,}16\lambda_0$ x $1{,}1\lambda_0$. Potrebno je napomenuti da oba filtra imaju vrlo dobro potiskivanje viših modova i ne dozvoljavaju prostiranje modova strukture sa paralelnim pločama unutar opsega učestanosti zabranjene zone, [65]. Filtri su fabrikovani u aluminijumu CNC tehnologijom.



Slika 3.64 Filtar propusnik opsega trećeg i petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina kroz dva reda metalnih stubića.: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara za filtar trećeg reda, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara za filtar petog reda, c) fabrikacija gornje provodne površine, d) fabrikacija koja sadrži rezonantne šupljine, [65]



Slika 3.65 Super ćelija rezonantne šupljine, [67]



Slika 3.66 Sprega između dve rezonantne šupljine korišćenjem induktivnog otvora širine w, [67]

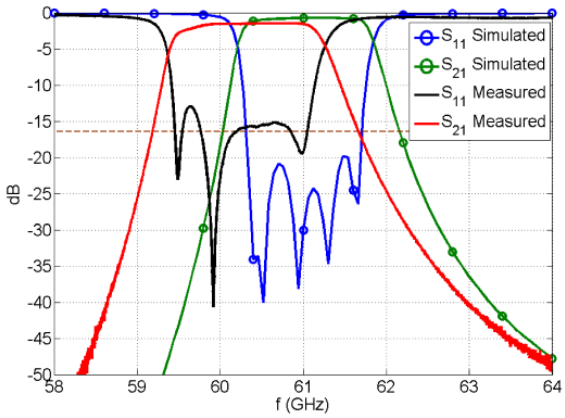
U literaturi [67], projektovan je filtar sa spregom između rezonantnih šupljina, ali na značajno višoj centralnoj učestanosti od 61 GHz. Za spregu rezonatora iskorišćeni su induktivni otvori realizovani uklanjanjem određenog broja metalnih stubića između rezonantnih šupljina. Filtar je projektovan korišćenjem koeficijenta sprege i spoljašnjeg *Q* faktora, [63]. Ilustracija super ćelije rezonantne šupljine prikazana je na slici 3.65 sa kritičnim geometrijskim parametrima *C* i *L*, čijom promenom se može uticati na rezonantnu učestanost šupljine, [67].

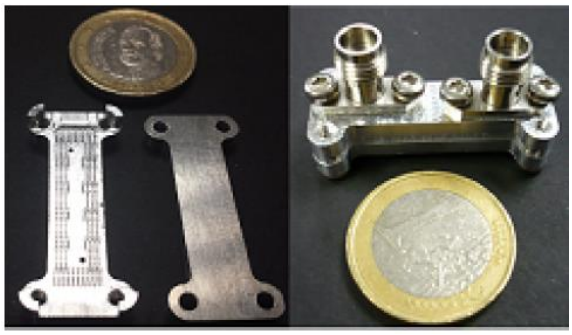
Kao što je već napomenuto, sprega između rezonatora postignuta je korišćenjem induktivnog otvora koji je realizovan sa dva reda metalnih stubića kod kojih su uklonjena tri srednja stubića, kao što je prikazano na slici 3.66. Jačina sprege između dva rezonatora određena je geometrijskim parametrom *w*, koji određuje širinu induktivnog otvora, [67].

Pobuda rezonantnih šupljina u [67] izvršena je koaksijalnim konektorima sa donje strane, kroz donju provodnu ploču. Ovakva pobuda na visokim učestanostima ima prednost u odnosu na pobudu kroz gornju provodnu ploču, pošto pozicioniranjem ploče usled malih tolerancija dimenzija stvara se velika mogućnost za nastanak greške.

Filtar petog reda je projektovan sa Čebiševljevom filtarskom funkcijom, za maksimalno talasanje u propusnom opsegu od 0,01 dB i sa relativnim opsegom od 2,5%, na centralnoj učestanosti od 61 GHz, primernom predloženi rezonantnih šupljina, [67].

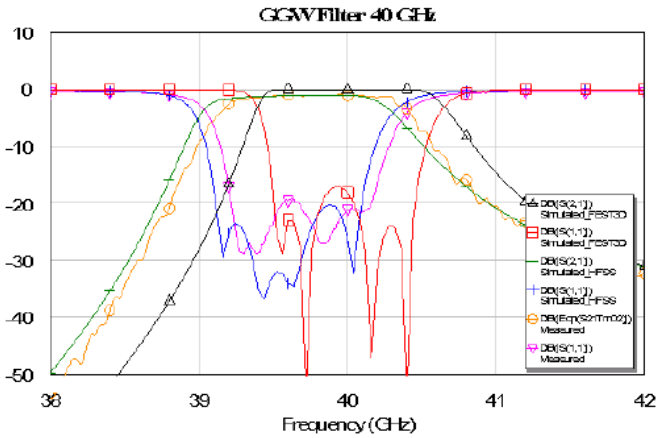
Na slici 3.67, prikazani su simulirani i izmereni *S* parametri filtra petog reda.





(a) *(b)*

Slika 3.67 Filtar propusnik opsega petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem induktivnih otvora: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [67]





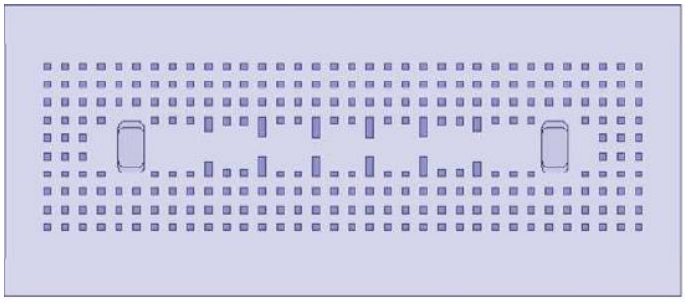
(a) *(b)*

Slika 3.68 Filtar propusnik opsega četvrtog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem induktivnih otvora: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [68]

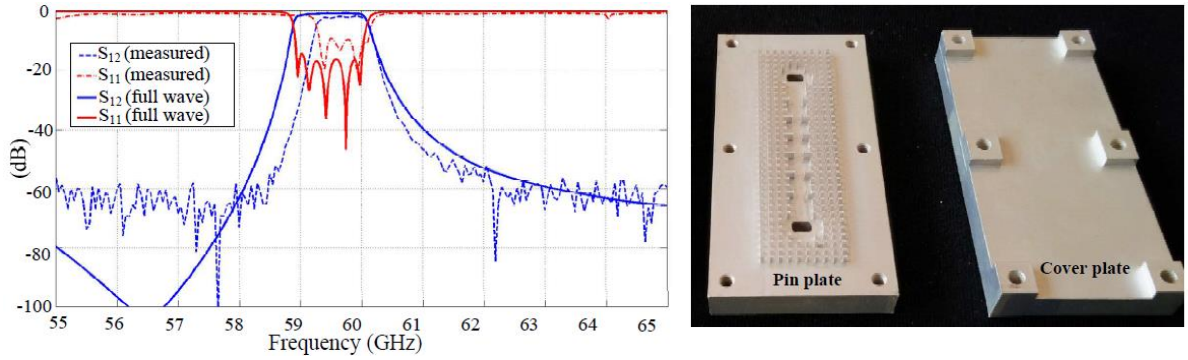
Fabrikovani filtar propusnik opsega petog reda okarakterisan je centralom učestanosti od 60,2 GHz, koja je pomerena za 1,3% u odnosu na projektovanu učestanost od 61 GHz. Uneseno slabljenje je oko 1 dB, povratni gubici oko 13 dB, relativna širina propusnog opseg 1% i dimenzije filtra $4{,}53\lambda_0$ x $1{,}24\lambda_0$ [67].

Filtar četvrtog reda zasnova na principu sprege preko induktivnih otvora, [67], predložen je u [68]. Filtar je projektovan Čebiševljevom filtarskom funkcijom na centralnoj učestanosti od 40 GHz, sa talasanjem u propusnom opsegu od 0,01 dB i relativnim opsegom od 2,5%. Za projektovanje filtra iskorišćen je koeficijent sprege i spoljašnji *Q* faktor, sa pobudom koaksijalnim konektorom kroz otvor na gornjoj provodnoj ploči, [68]. Filtar je realizovan CNC tehnologijom, glodanjem u aluminijumu.

Na slici 3.68, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara zajedno sa predloženim fabrikovanim minijaturnim filtrom, [68]. Filtar je okarakterisan centralnom učestanošću od 39,6 GHz, unesenim slabljenjem od 1,1 dB, povratnim gubicima boljim od 19 dB, relativnom širinom propusnog opsega od 2,5% i dimenzijama $3{,}17\lambda_0$ x $0{,}86\lambda_0$.



Slika 3.69 Ilustracija filtra petog reda projektovanog korišćenjem otvora u metalnim zidovima koji razdvajaju rezonantne šupljine, [69]



(a) *(b)*

Slika 3.70 Filtra propusnik opsega petog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina putem otvora u metalnim zidovima: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [69]

Naredni filtar iz literature [69], za spregu rezonatora koristi takođe induktivne otvore, ali ovaj put realizovane poput otvora različitih veličina u metalnim zidovima između rezonatora. Na slici 3.69, prikazana je ilustracija projektovanog filtra petog reda, sa otvorima unutar metalnih zidova između rezonatora. Metalni zidovi su realizovani kao duže sekcije metalnih stubića za razliku od stubića koji grade PMC površinu.

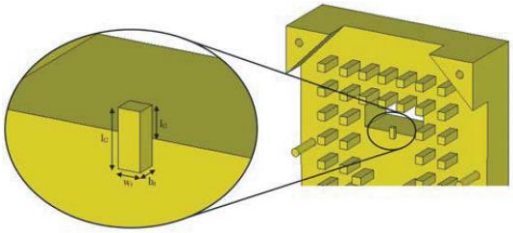
Filtar je projektovan korišćenjem standardne filtarske tehnike, koeficijenta sprege i spoljašnjeg *Q* faktora. Za pobudu filtra iskorišćena je tranzicija sa talasovoda WR-15 na talasovod na bazi procep sa kanalom.

Filtar petog reda projektovan je Čebiševljevom filtarskom funkcijom sa povratnim gubicima boljim od 20 dB. Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, kao i fabrikacija filtra petog reda, prikazani su na slici 3.70. Filtar je fabrikovan korišćenjem CNC tehnologije u mesingu i presvučen je tankim slojem srebra, [69].

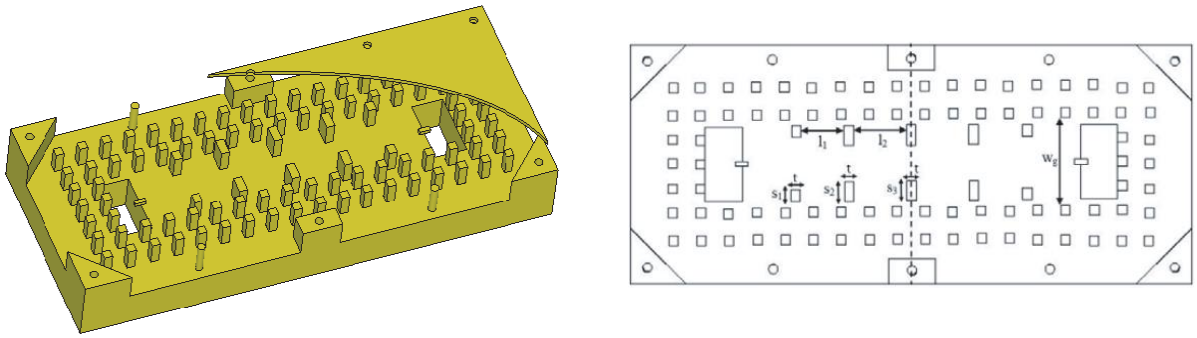
Filtar petog reda sa slike 3.70(b), okarakterisan je centralnom učestanošću od 59,7 GHz, unesenim slabljenjem od 1,7 dB, povratnim gubicima od 9 dB, relativnim opsegom od 1,34% i dimenzijama $19{,}72\lambda_0$ x $5{,}8\lambda_0$, [69].

Još jedan filtar koji koristi otvore u metalnim zidovima za spregu rezonantnih šupljina, i pobudu putem tranzicije sa konvencionalnog talasovoda na talasovod na bazi procepa sa kanalom, predstavljen je u [70]. Da bi se omogućio odgovarajući prenos energije putem tranzicije sa talasovoda WR-62 na talasovod sa kanalom, iskorišćen je mali polegnuti metalni stubića za podešavanje odgovarajućeg nivoa sprege. Metalni stubić se pruža iznad otvora kroz koji se uvodi u strukturu elektromagnetska energija iz talasovoda, kao što je prikazano na slici 3.71, [70].

Na slici 3.72, prikazan je model predloženog filtra četvrtog reda, sa kritičnim geometrijskim parametrima, [70]. Simulirani i izmereni rezultati za predloženi filtar četvrtog reda, zajedno sa fabrikovanim filtrom, prikazani su na slici 3.73, [70].

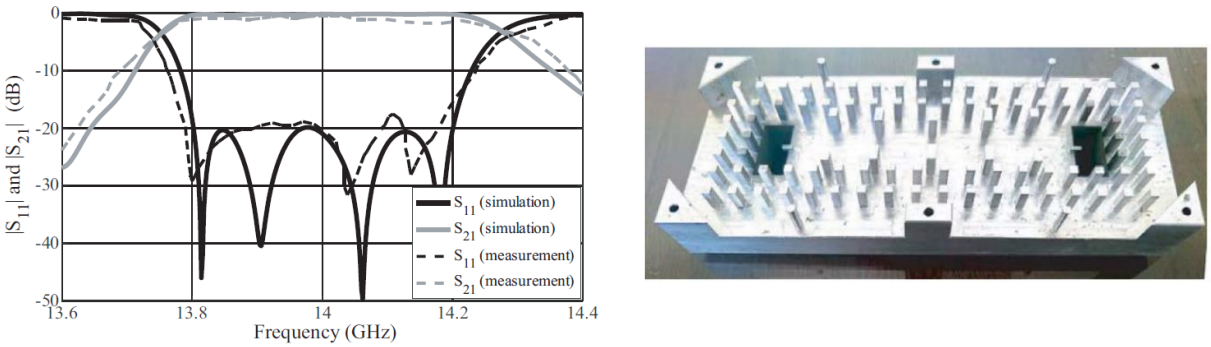


Slika 3.71 Tranzicija sa talasovoda WR-62 na talasovod na bazi procepa sa kanalom, [70]



(a) *(b)*

Slika 3.72 Model filtra četvrtog reda realizovanog pomoću induktivnih otvora: a) pogled iz perspektive, b) pogled odozgo bez gornjeg provodnog sloja, [70]



(a) *(b)*

Slika 3.73 Filtra propusnik opsega četvrtog reda realizovan spregom rezonantnih šupljina: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [70]

Predloženi filtar iz [70] na centralnoj učestanosti od 14 GHz okarakterisan je relativnom širinom propusnog opsega od 2,85%, unesenim slabljenjem od 1 dB i povratnim gubicima od 17 dB. Dimenzije predloženog filtra četvrtog reda iznose $4{,}85\lambda_0$ x $1{,}77\lambda_0$.

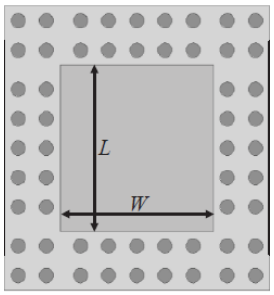
Pored filtara koji su zasnovani na PMC površinama sa metalnim stubićima, u literaturi imamo slučajeva da su PMC površine realizovane kao metalne vije unutar dielektričnih podloga. Jedna takva struktura predložena je u [71], u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa kanalom (engl. *Microstrip-Groove Gap Waveguide*).

Naime, PMC struktura predložena u [71] slična je strukturi PMC površine kod mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa, sa razlikom da je metalni peč zamenjen tankim metalnim prstenom oko ivice otvora u dielektriku koji naknadno treba da bude ispunjen vijom. Uloga prstena je da obezbedi mogućnost fabrikacije metalne vije unutar dielektrične podloge, [71].

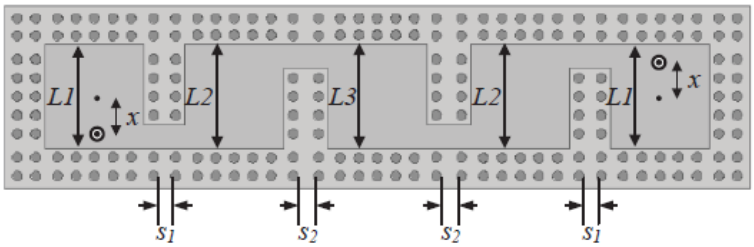
Predloženi filtar petog reda [71] baziran je na sprezi rezonantnih šupljina, čiji je primer prikazan na slici 3.75. Rezonantna šupljina se sastoji od dva reda vija unutar dielektričnog materijala, koji okružuju prostor bez vija i dielektričnog materijala određen dimenzijama *W* i *L*, slika 3.74.

Za projektovanje filtra iskorišćeni su koeficijent sprege i spoljašnji *Q* faktor. Pobuda rezonatora izvršena je pomoću koaksijalne probe postavljena kroz otvore na gornjoj provodnoj ploči, [71].

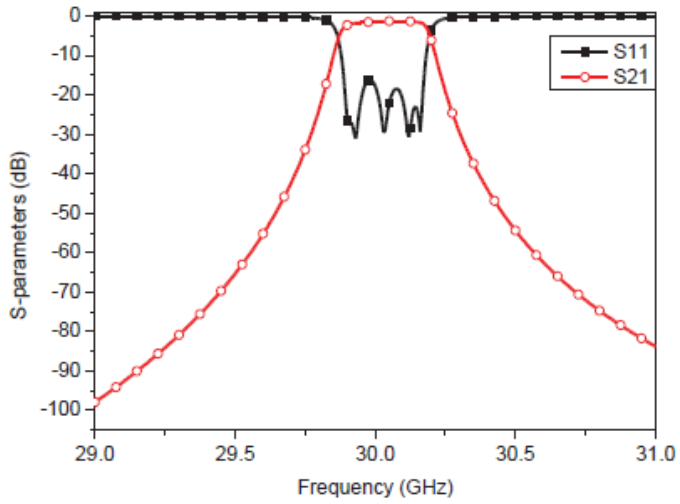
Filtar propusnik opsega petog reda projektovan je korišćenjem Čebiševljeve filtarske funkcije na centralnoj učestanosti od 30 GHz i maksimalnim talasanjem u propusnom opsegu od 0,1 dB. Model predloženog filtra prikazan je na slici 3.75. Sprega između rezonantnih šupljina optimizovana je pomoću parametra s_1 i s_2. Rezonatori su direktno spregnuti putem otvora dobijenih uklanjanjem metalnih vija i dielektričnog materijala.



Slika 3.74 Model predložene rezonantne šupljine u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [71]



Slika 3.75 Model filtra petog reda projektovan u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa sa kanalom, [71]



Slika 3.76 Simulirani S parametri filtra petog reda projektovanog u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [71]

Simulirani *S* parametri filtra predloženog u [71], prikazani su na slici 3.76. Filtar je okarakterisan relativnim širinom propusnog opsega od 1,03% na centralnoj učestanosti od 30,025 GHz, unesenim slabljenjem od 1,4 dB, povratnim gubicima od 16 dB i dimenzijama $4{,}7\lambda_0$ x $1{,}5\lambda_0$.

U tabeli 3.6 objedinjene su sve karakteristike filtara realizovanih u talasovodima na bazi procepa sa kanalom.

TABELA 3.6 KARAKTERISTIKE FILTARA U TEHNOLOGIJI TALASOVODA NA BAZI PROCEPA SA KANALOM

Literatura	***Tip rezultata***	***Centralna učestanost [GHz]***	***Red filtra***	***Relativni opseg [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***	***Povratni gubici [dB]***	***Dimenzije filtra [λ_0 x λ_0]***
[48]	Merenja	11,59	4	0,62	1	10	14,91 x 4,1
[64]	Merenja	35	3	1	1	9	2,1 x 1,9
[65]	Merenja	13,95	3	1	1	20	3,2 x 1,1
[65]	Merenja	13,95	5	1	1	11	5,16 x 1,1
[67]	Merenja	61	5	1	1	13	4,53 x 1,24
[68]	Merenja	39,6	4	2,5	1,1	19	3,17 x 0,86
[69]	Merenja	59,7	5	1,34	1,7	9	19,72 x 5,8
[70]	Merenja	14	4	2,85	1	17	4,85 x 1,77
[71]	Simulacije	30,025	5	1,03	1,4	16	4,7 x 1,5

U literaturi, tehnologija talasovoda na bazi procepa sa kanalom predstavlja često korišćenu tehnologiju za projektovanje filtara, koji su realizovani uklanjanjem većeg broja metalnih stubića, pri čemu se dobijaju rezonantne šupljine unutar PMC oblasti. Ova tehnologija omogućava jednostavan način sprege između rezonantnih šupljina, preko jednog ili više redova metalnih stubića, [48], [65], ili putem induktivnih otvora dobijenih uklanjanjem određenog broja metalnih stubića između rezonantnih šupljina, [67], [68], [69], [70] i [71]. Usled jednostavnog načina postizanja sprege između rezonatora, projektovani su i fabrikovani filtri trećeg, četvrtog i petog reda.

Filtrima trećeg reda [64], [65], postignuti su uski propusni opsezi i male ukupne dimenzije, na učestanosti ispod [65], i iznad milimetarskog opsega, [64]. Filtar predstavljen u [64], dobijen slaganjem rezonantnih šupljina, okarakterisan je najmanjim dimenzijama filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom. Filtri četvrtog reda [48], [68], [70], okarakterisani su relativno malim unesenim slabljenjem i dobrim povratnim gubicima [68], [70], dok su filtri petog reda [65], [67], [69] i [71], okarakterisani dobrim performansama, uskim propusnim opsezima i većim ukupnim dimenzijama.

Većina predloženih filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, zasnovani su na linijskim konfiguracijama sa direktno spregnutim rezonatorima, čime su dobijene značajno velike dimenzije konačnih filtara. Korišćenjem realizacije iz [64] ili unakrsnom spregom predloženih rezonantnih šupljina, moguće je ostvariti minijaturizaciju filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom.

3.3.3 Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa zasnovana je na korišćenju dielektričnih podloga, koje iako unose gubitke izraženije na višim učestanostima, omogućuju značajnu fleksibilnost u projektovanju PMC površina i smanjenje ukupnih dimenzija realizovanih kola. Najizraženije je smanjenje bočnih profila, pošto PMC površine mogu da se realizuju veoma tanke, u poređenju sa metalnim stubićima.

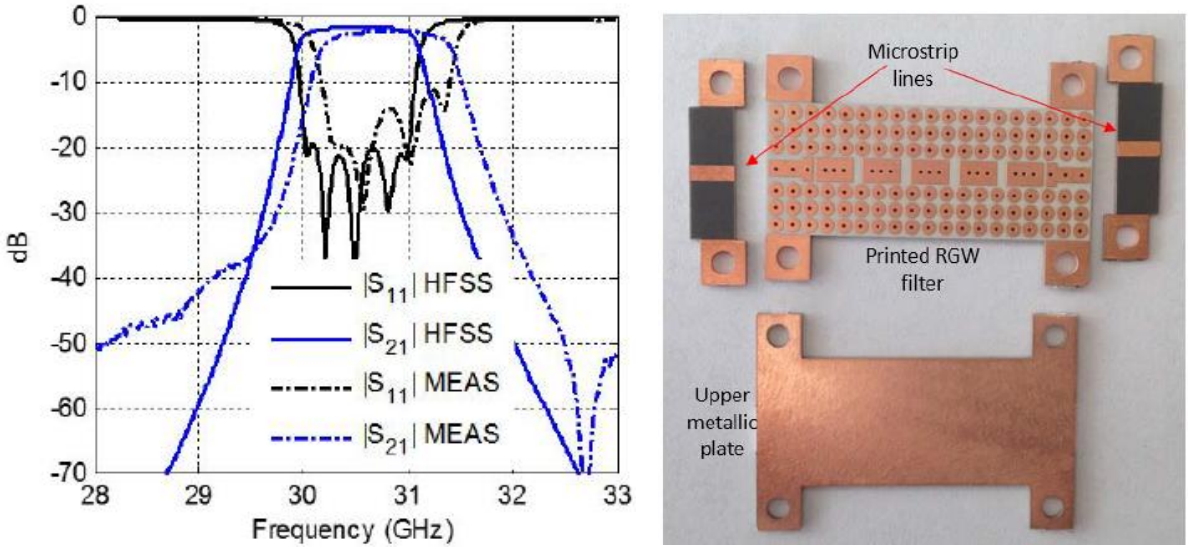
Korišćenje standardne tehnologije štampanih ploča (PCB) za fabrikaciju kola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda, pruža u poređenju sa tehnologijama fabrikacije grebenastog talasovoda i talasovoda sa kanalom, manje zahtevan i jeftiniji procese fabrikacije.

Takođe, kola projektovana u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa pružaju jednostavnu integraciju sa kolima fabrikovanim u planarnim tehnologijama, na primer mikrotalasnim monolitnim integrisanim kolima, MMIC.

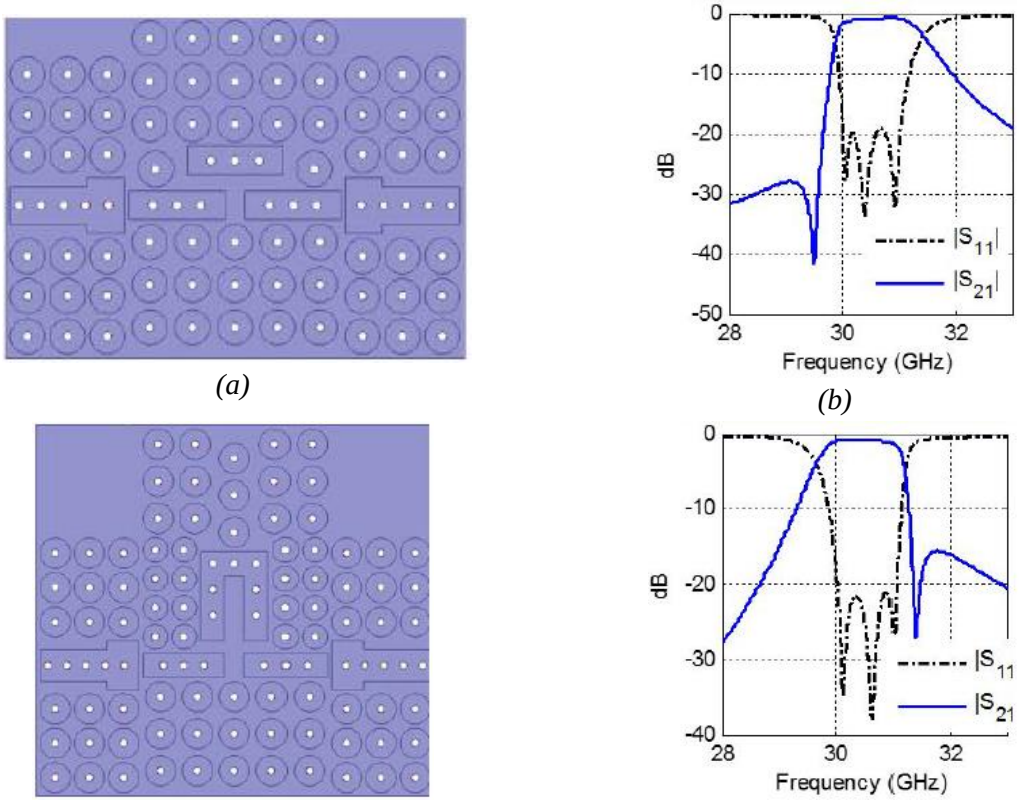
U literaturi do danas, predloženo je par filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, što pruža nove mogućnosti za istraživanje i projektovanje novih filtarski rešenja.

Prvo filtarsko rešenje u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, predstavljeno je u [72]. Predložen je filtar propusnik opsega petog reda, zasnovan na krajevima spregnutim rezonatorima realizovanim $\lambda/2$ sekcijama mikrostrip grebena.

Rezultati simulacija i merenja, kao i izgled fabrikovanog filtra prikazani su na slici, 3.77. Predloženi filtar pobuđen je korišćenjem tranzicije iz [37].



Slika 3.77 Filtra propusnik opsega petog reda realizovan krajevima spregnutim λ/2 rezonatorima u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [72]

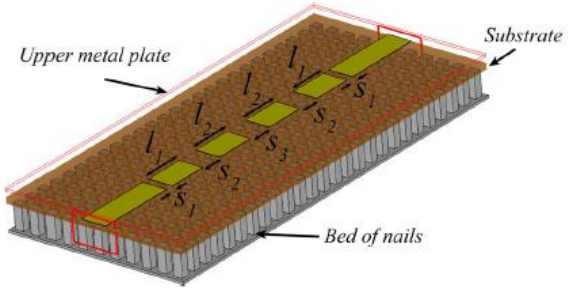


Slika 3.78 Projektovane sekcije tripleta filtra: a) prvi triplet sa transmisionom nulom sa leve strane propusnog opsega, b) simulirani S parametri prvog triplet filtra, c) drugi triplet sa transmisionom nulom sa desne strane propusnog opsega, d) simulirani S parametri drugog triplet filtra, [72]

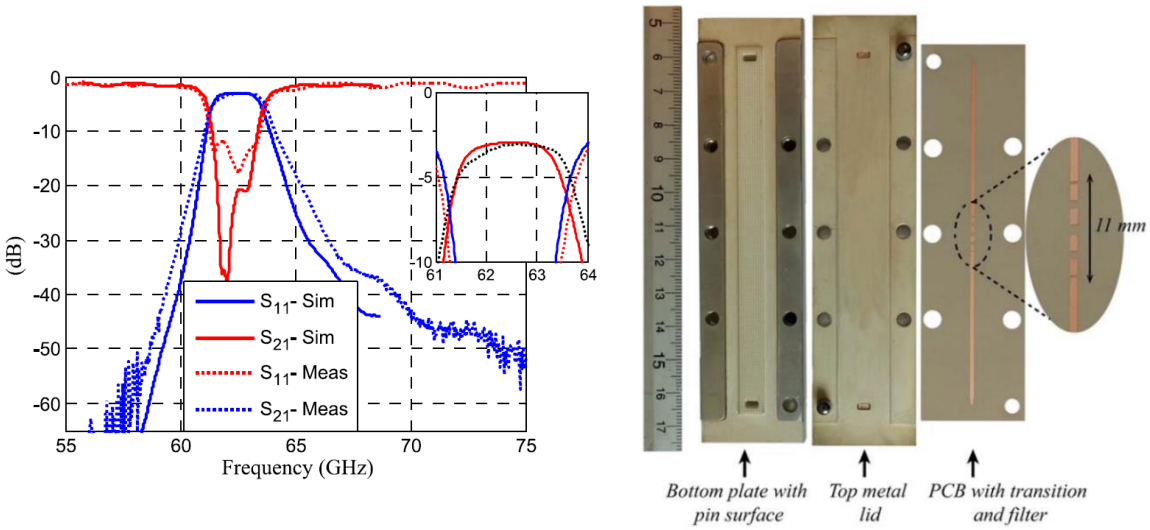
Predloženi filtar iz [72] okarakterisan je relativnom širinom propusnog opsega od 4,55% na centralnog učestanosti od 30,75 GHz, unesenim slabljenjem od 2,3 dB, povratnim gubicima od 11 dB i dimenzijama 3,32λ_0 x 1,29λ_0. Značajan uticaj na uneseno slabljenje ima mehanička robusnost strukture, koja je narušena usled elastičnosti dielektričnih podloga korišćenih tokom realizacije filtra, usled čega visina vazdušnog procepa nije konstantna duž mikrostrip grebena, [72].

Pored filtra petog reda u [72] predložena su dva triplet filtra propusnika opsega, koji nude mogućnost dobijanja transmisione nule sa jedne ili druge strane propusnog opsega, kao što je prikazano na slici 3.78.

Naredni predloženi filtar iz literature [73], realizovan u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [60], zasnovan je na krajevima spregnutim $\lambda/2$ sekcijama mikrostrip linija. Korišćenjem navedene tehnologije, projektovan je filtar četvrtog reda propusnik opsega učestanosti sa Čebiševljevom filtarskom funkcijom, na centralnoj učestanosti od 60 GHz, sa relativnom širinom propusnog opsega od 3,3% i talasanjem u propusnom opsegu od 0,1 dB. Model projektovanog filtra, prikazan je na slici 3.79, [73].



Slika 3.79 Model projektovanog filtra u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [73]



(a) *(b)*

Slika 3.80 Filtra propusnik opsega četvrtog reda realizovan krajevima spregnutim λ/2 rezonatorima u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa: a) simulirani i izmereni S parametri, b) fabrikacija predloženog filtra, [73]

Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara predloženog filtra, zajedno sa izgledom fabrikacije, prikazani su na slici 3.80. Za pobudu filtra korišćena je tranzicija sa WR-15 talasovoda na invertovani mikrostrip talasovod, [60].

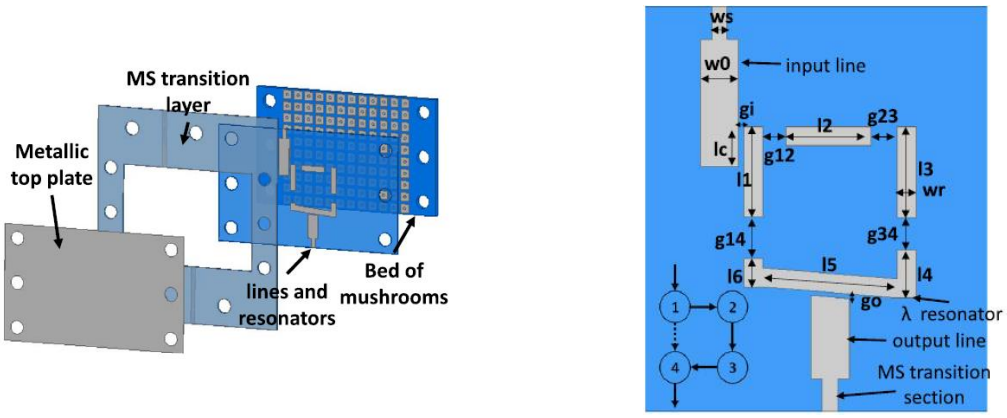
Filtar iz [73], okarakterisan je relativnom širinom propusnog opsega od 3,4% na centralnoj učestanosti od 62,5 GHz, unesenim slabljenjem od 3 dB, povratnim gubicima od 12,5 dB i dimenzijama $22{,}73\lambda_0$ x $1{,}3\lambda_0$. Dužina mikrostrip voda unosi značaje gubitke u predloženom filtru. Kada se ovi gubici izostave uneseno slabljene predloženog filtra iznosi 1,6 dB, [73].

Sledeći filtar iz [74], zasnovan je na tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, sa PMC površinom realizovanom pomoću uzemljenih peč rezonatora. Na takav način, omogućeno je izdvajanje filtarske geometrije i rezonantnih sekcija iz PMC površine, čime je ostvarena fleksibilnost i mogućnost projektovanja složenijih filtara.

Prema tome, korišćenjem navedenih mogućnosti projektovan i realizovan je kvadruplet filtar četvrtog reda propusnik opsega, čiji je model prikazan je na slici 3.81. Za pobudu filtra iskorišćena je tranzicija iz [72].

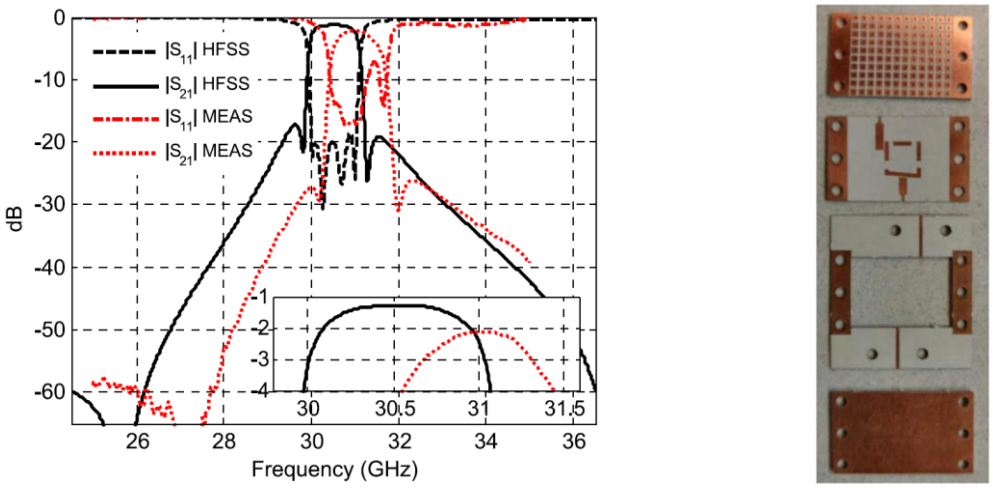
Optimizacija predloženog filtra izvršena je iterativnim postupkom pronalaženjem matrice sprege, koja je prvobitno dobijena iz simulacionih *S* parametara i iskorišćena u linearnom mapiranju, kako bi se pronašle odgovarajuće dužine rezonatora i procepa, [74]. Analitički pristup iskorišćen je za dobijanje matrice sprege, [75].

Poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, kao i izgled fabrikovanog filtra četvrtog reda [74], prikazani su na slici 3.82. Filtar je okarakterisan eliptičnim odzivom sa relativnom širinom propusnog opsega od 3% na centralnoj učestanosti od 31 GHz, unesenim slabljenjem od 2,3 dB, povratnim gubicima od 6 dB i dimenzijama $0{,}7\lambda_0$ x $0{,}7\lambda_0$. Sa slike 3.82, može se primetiti značajni pomeraj u učestanosti izmerenih *S* parametara, što se može pripisati pojavi vazdušnih džepova između različitih slojeva strukture.



(a) *(b)*

Slika 3.81 Model kvadruplet filtra: a) različiti slojevi, b) sloj sa projektovanim rezonatorima, [74]



(a) *(b)*

Slika 3.82 Kvadruplet filtar četvrtog reda: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametra, b) realizacija filtra po slojevima, [74]

U tabeli 3.7 objedinjene su sve karakteristike filtara realizovanih u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa.

TABELA 3.7 KARAKTERISTIKE FILTARA U TEHNOLOGIJI MIKROSTRIP GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Literatura	***Tip rezultata***	***Centralna učestanost [GHz]***	***Red filtra***	***Relativni opseg [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***	***Povratni gubici [dB]***	***Dimenzije filtra [λ_0 x λ_0]***
[72]	Merenja	30,75	5	4,55	2,3	11	3,32 x 1,29
[73]	Merenja	62,5	4	3,4	3	12.5	22,73 x 1,28
[74]	Merenja	31	4	3	2,3	6	0,7 x 0,7

U literaturi, predloženo je nekoliko filtarskih rešenja u tehnologiji mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa. Filtri su realizovani za primenu na učestanostima u milimetarskom opsegu. Usled korišćenja dielektričnih podloga, filtri pokazuju značajno narušenje performansi zbog dielektričnih gubitaka. Međutim, sa druge strane dielektrične podloge omogućavaju značajnu minijaturizaciju. Na primer, filtar iz [74] predstavlja najmanji filtar realizovan u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Međutim, usled korišćenja dielektričnog materijala za formiranje PMC površine i naleganja strukture, predloženi filtar ima značajne dielektrične gubitke.

Kao zaključak, nameće se da su u literaturi najzastupljeniji filtri u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom, usled jednostavne realizacije dobijanja rezonantnih šupljina uklanjanjem jednog ili više metalnih stubića iz PMC površine. Takođe, jednostavnoj realizaciji doprinosi mogućnost ostvarivanja sprega između rezonantnih šupljina preko metalnih stubića ili kroz induktivne otvore. Preostale dve tehnologije, grebenastog talasovoda na bazi procepa i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, su samo kroz par filtarskih rešenja predstavljene u literaturi.

U tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom realizovani su filtri trećeg, četvrtog i petog reda, pretežno dobrih performansi, ali sa značajno većim dimenzijama u odnosu na filtre realizovane u drugim tehnologijama talasovoda na bazi procepa. Naime, veće dimenzije filtara u topologiji talasovoda sa kanalom nastaju usled linijskih konfiguracija i direktne sprege rezonantnih šupljina. Rešenje smanjenja dimenzija filtara u ovoj tehnologiji predloženo je u [64], slaganjem rezonatora jedan na drugi. Sa druge strane, filtri realizovani u tehnologiji grebenastog i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa nude pretežno manje dimenzije filtara, pošto za realizaciju rezonatora koriste $\lambda/2$ sekcije grebena, u odnosnu na filtre realizovane u talasovodima sa kanalom, koji uobičajeno zahtevaju uklanjanje većeg broja metalnih stubića za formiranje rezonantnih šupljina. Filtar najmanjih ukupnih dimenzija, $0{,}7\lambda_0$ x $0{,}7\lambda_0$, predložen je u tehnologiji invertovanog mikrostrip talasovoda na bazi procepa, [74]. Filtar je realizovan korišćenjem dielektričnih podloga i kvaduplet rasporeda rezonatora. Usled korišćenja dielektričnih podloga, filtar ispoljava značajne gubitke. Filtri najmanjih ukupnih dimenzija realizovanim u drugim tehnologijama talasovoda na bazi procepa, dobijeni su slaganjem rezonatora jedan na drugi, [64]. Naime, ukupne dimenzije filtra sa grebenom iznose $1{,}7\lambda_0$ x $1{,}55\lambda_0$, dok dimenzije filtra sa kanalom iznose $2{,}1\lambda_0$ x $2{,}1\lambda_0$.

Filtar predložen u [64], pokazuje najbolje performanse u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa i male dimenzije. Dobre performanse od predloženih filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom nudi filtar trećeg reda iz [65], dok složeniji filtar petog reda iz [67], nudi uporedive performanse na značajno višoj učestanosti. Od par filtarskih rešenja predstavljenih u literaturi zasnovanih na mikrostrip grebenastim talasovodima na bazi procepa, najbolje performanse i zadovoljavajuće male dimenzije, nudi filtar predložen u [72].

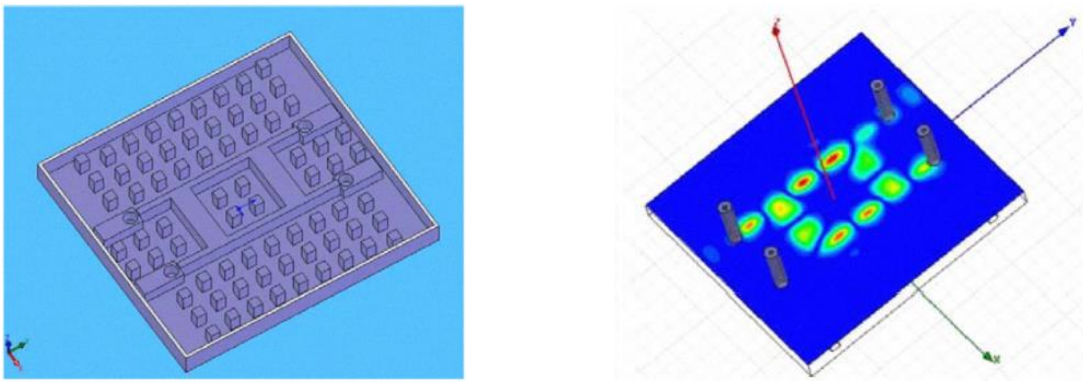
3.4 Realizacije sprežnika i delitelja snage u talasovodima na bazi procepa

Hibridni sprežnici predstavljaju suštinske uređaje u različitim mikrotalasnim kolima i sistemima, [76]. Pored primene u filtrima, talasovodi na bazi procepa mogu se iskoristiti za realizaciju sprežnika snage i delitelja snage na sličan način kao u mikrostrip tehnologiji.

Kako bi se demonstrirale mogućnosti koje nudi tehnologija talasovoda na bazi procepa, u [77] projektovani su kvadratni sprežnik (engl. *Branch line coupler*) i direkcioni sprežnik sa spregnutim linijama (engl. *Coupled-line directional coupler*) u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa.

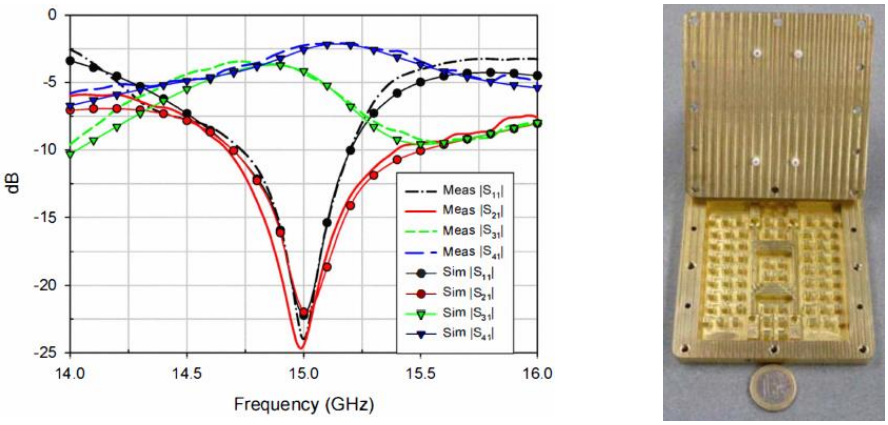
Na slici 3.83, prikazan je model kvadratnog sprežnika [77] sa raspodelom električnog polja na učestanosti od 15 GHz. Sprežnik koristi linije dužina $3\lambda/4$ okružene metalnim stubićima PMC površine. Za pobudu sprežnika iskorišćena je tranzicija iz [20].

Na slici 3.84, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara kvadratnog sprežnika i dat je izgled fabrikovanog kola.



(a) *(b)*

Slika 3.83 Kvadratni sprežnik realizovan u grebenastom talasovodu na bazi procepa: a) model, b) raspodela električnog polja, [77]



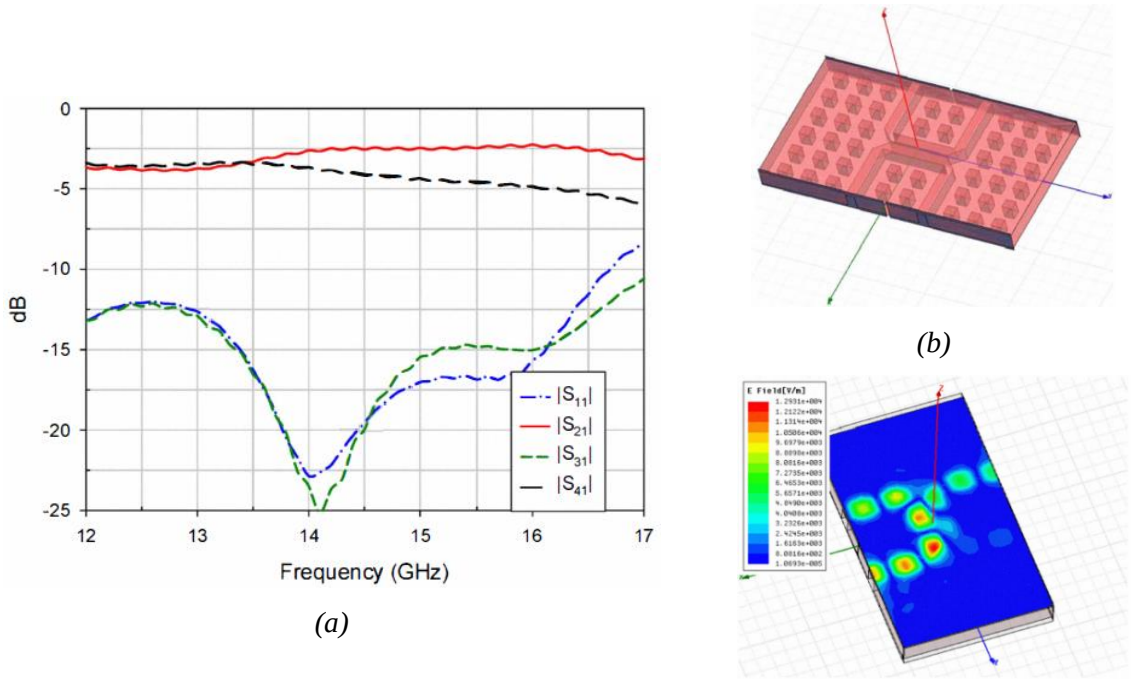
(a) *(b)*

Slika 3.84 Kvadratni sprežnik realizovan u grebenastom talasovodu na bazi procepa: a) simulirani i izmereni S parametri, b) izgled fabrikovanog kola, [77]

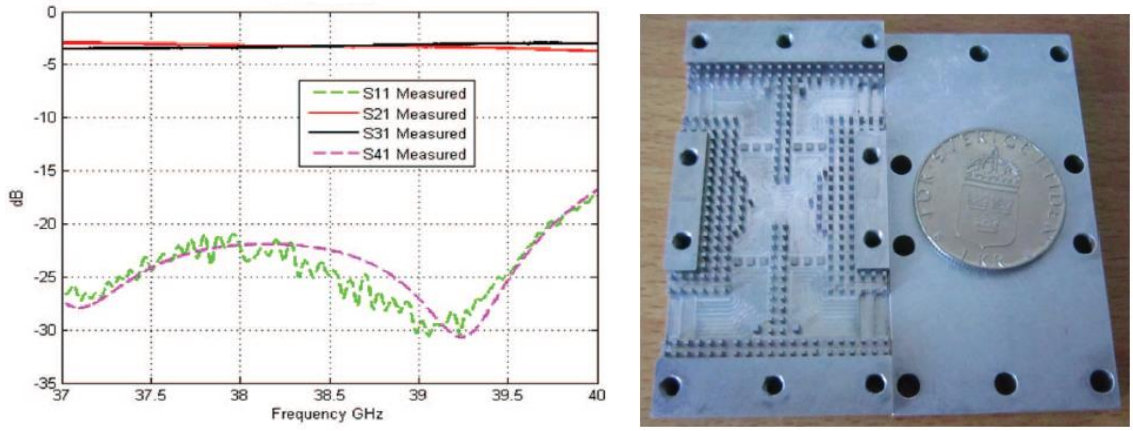
Kvadratni sprežnik [77], okarakterisan je dobrim slaganjem simuliranih i izmerenih rezultata, sa povratnim gubicima boljim od 24 dB, na učestanosti od 15 GHz i unesenim slabljenjem spregnutih linija od 2,2 dB i 4,2 dB. Predložen sprežnika ima radni opseg od 3% na -10 dB.

Naredna predložena struktura u [77], prikazan na slici 3.85, predstavlja direkcioni sprežnik sa spregnutim linijama realizovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa. Sprežnik je okružen metalnim stubićima kako bi se zadržale osobine talasovoda na bazi procepa.

Optimizacija ovakvih sprežnika moguća je promenom razmaka između spregnutih grebena, dužina grebena i širine grebena. Sprežnik je okarakterisan izolacijom većom od 23 dB i direktivnošću od 20 dB na učestanosti od 14 GHz, [77]. Dodatno, na slici 3.86, prikazani su simulirani *S* parametri sprežnika i raspored električnog polja na učestanosti od 14 GHz.

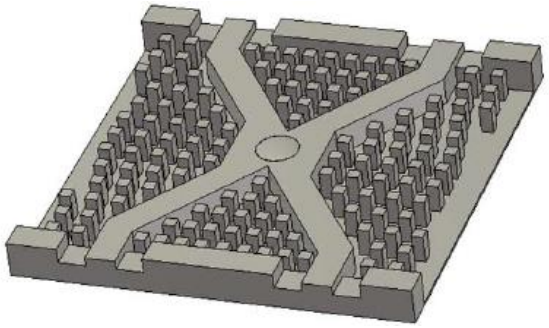


Slika 3.85 Direkcioni sprežnik projektovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) simulirani S parametri, b) model sprežnika, c) raspodela električnog polja, [77]



(a) *(b)*

Slika 3.86 Hibridni sprežnik realizovan u tehnologiji talasovoda na bazi procep sa kanalom: a) simulirani i izmereni S parametri, b) izgled fabrikovanog kola, [78]

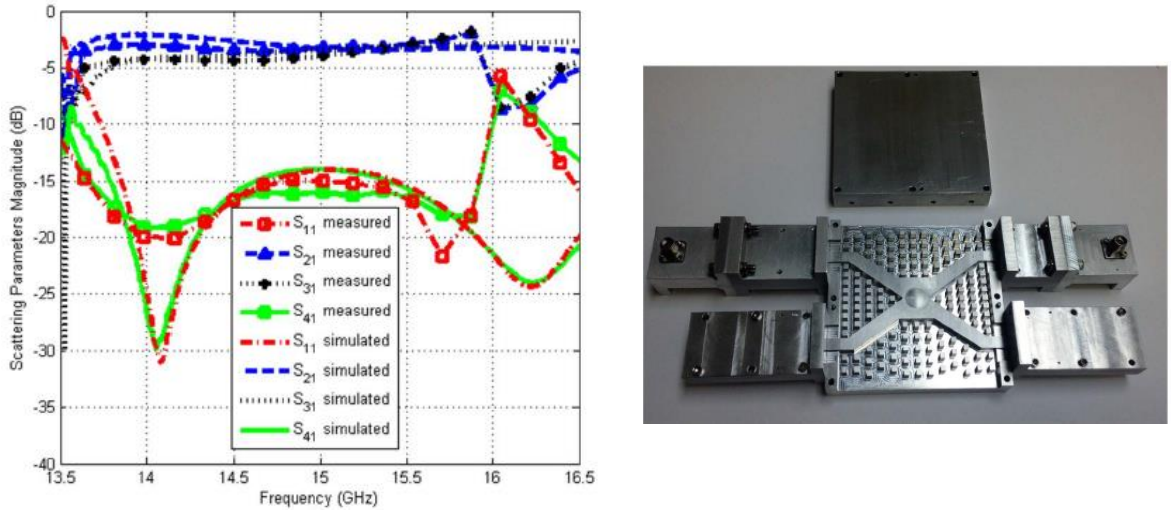


Slika 3.87 Model hibridnog 3-dB sprežnika, [79]

Hibridni sprežnik sa kratkim otvorom realizovan je u [78] na radnoj učestanosti od 38 GHz, u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom. Sprežnik je projektovan postavljanjem dva talasovodna kanala jedan pored drugog, koje razdvajaju dva reda metalnih stubića, kao što je prikazano na slici 3.86(b). U sredini sprežnika, uklonjeno je nekoliko metalnih stubića kako bi se ostvario provodan put između dva talasovoda. Dužina uklonjenih metalnih stubića utiče na spregu, zajedno sa dodatnim metalnim stubićima u srednjem delu strukture, u blizini zidova talasovodnih kanala.

Sprežnik je okarakterisan radnim opsegom od 37 GHz do 40 GHz, spregom od 3 dB, izolacijom i povratnim gubicima od 20 dB. Sprežnik je pobuđen talasovodom WR-28, [78].

Hibridni 3-dB sprežnik, projektovan i realizovan je u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa, [79]. Sprežnik je projektovan korišćenjem analize parnog i neparnog moda, korišćenjem modela sa idealnom PMC površinom i na kraju je uvedena realna PMC površina načinjena od metalnih stubića. Model sprežnika prikazan je na slici 3.87. Centralni deo hibridnog sprežnika sadrži kapacitivnu kupolu, koja zajedno sa širinom srednjeg dela sprežnika, ima ulogu elementa za podešavanje balansiranog izlaza, [79].



(a) *(b)*

Slika 3.88 Hibridni 3-dB sprežnik: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, b) realizacija sprežnika sa tranzicijama i podešenim opterećenjem, [79]

Na slici 3.88, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara predloženog 3-dB sprežnika zajedno sa izgledom fabrikacije. Za pobudu sprežnika iskorišćena je tranzicija [49]. Tokom merenja iskorišćena su dva podešena opterećenja, [79].

Sprežnik je okarakterisan radnim opsegom od 14%, u opsegu od 13,8 GHz do 15,8 GHz, sa centralnom učestanosti na sredini opsega od 14.8 GHz. Amplitude izlaznih portova su balansirane sa tolerancijom od ± 5 dB, u radnom opsegu od 7%. Oscilacije unesenog slabljenja su do 0,7 dB, [79].

Naredni sprežnik predložen u literaturi u [80], realizovan je u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom. Sprežnik koristi zakrivljene otvore, pod odgovarajućim uglom, kako bi se omogućila sprega između dva talasovoda. Ovakav pristup sa zakrivljenim otvorima, uobičajeno se koristi kod talasovodnih sprežnika [80], gde se promenom zakrivljenih otvora može uticati na promenu koeficijenta sprege.

Prednost korišćenja tehnologije talasovoda na bazi procepa za razliku od konvencionalnih talasovoda, kod ovakvog tipa sprežnika, postoji u tome da delovi talasovoda na bazi procepa ne moraju striktno da budu u čvrstom kontaktu sa ostalim delovima strukture. Prema tome, ako je na primer potrebno da se promeni sprega, dovoljno je samo da se zameni zajednički zid sa otvorima koji određuju spregu.

Na slici 3.89, prikazana je ilustracija predloženog sprežnika iz [80]. Talasovod na bazi procepa sa kanalom projektovan je za prostiranje horizontalno polarizovanog talasa, [19].

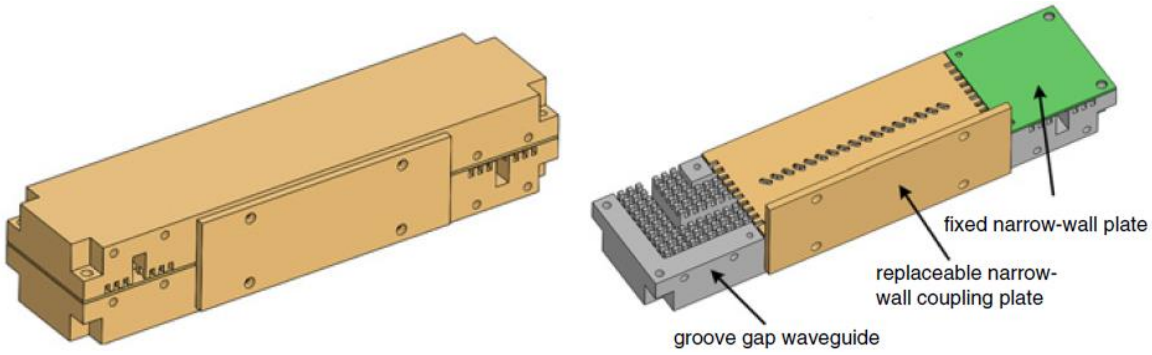
Sprežnik predložen u [80], sastoji se od dve sekcije talasovoda na bazi procepa sa kanalom, dve fiksne zajedničke provodne ploče i jedne zamenljive ploče sa zakrivljenim otvorima za spregu, slika 3.89. Svrha zajedničke povodne ploče je da obezbedi talas odgovarajuće polarizacije i uvede ga u sekciju u kojoj dolazi do sprezanja. Ivice zamenljive ploče i fiksne zajedničke ploče nisu u provodnom

kontaktu, što stvara diskontinuitet između ploča, koji može da unese gubitke usled zračenja. Da bi se gubici sprečili, stranice zamenjive ploče su modifikovane na način prikazan na slici 3.89(b), [80].

Sprežnik je projektovan u radnom opsegu od 30 do 40 GHz, sa podesivom spregom. Sprega je u funkciji debljine zajedničke metalne ploče, tako da se koeficijent sprege povećava sa smanjivanjem debljine ploče. Takođe, povećavanjem ugla zakrivljenosti otvora, povećava se koeficijent sprege. Simulacijama je utvrđeno da se za uglove zakrivljenosti od 15˚ do 45˚, dobijaju koeficijenti sprege od 19 dB i 10 dB. Prema tome, ako projektujemo zamenljive ploče sa različitim uglovima zakrivljenosti od 15˚ do 45˚, možemo ostvariti bilo koji koeficijent sprege od 10 do 19 dB.

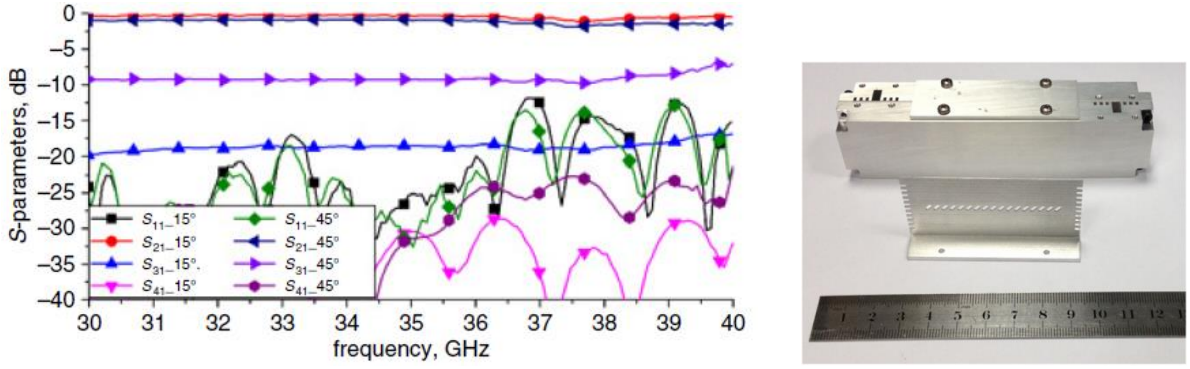
Na slici 3.90, prikazani su izmereni *S* parametri za predloženi sprežnik, kao i fabrikovani sprežnik. Sprežnik je pobuđen sekcijom konvencionalnog talasovoda sa koaksijalnom tranzicijom.

Fabrikovane su dve zamenljive ploče sa zakrivljenim otvorima, od 15˚ i 45˚, sprežnik A i B, respektivno. Izmereni *S* parametri pokazuju prosečan koeficijent sprege od 18,5 dB za sprežnik A, sa povratnim gubicima do 17 dB u opsegu učestanosti od 30 do 36,5 GHz. Za sprežnik B, prosečan koeficijent sprege iznosi 9 dB, sa povratnim gubicima do 12 dB u opsegu učestanosti od 36,5 do 40 GHz. Izmerena izolacija (S_{41} parametar) za sprežnik A i B iznosi 27 dB i 22 dB, respektivno, [80].



(a) *(b)*

Slika 3.89 Ilustracija sprežnika sa zakrivljenim otvorima,: a) cela struktura, b) deo strukture sa prikazanom zajedničkom provodnom pločom i zamenljivom sprežnom pločom, [80]

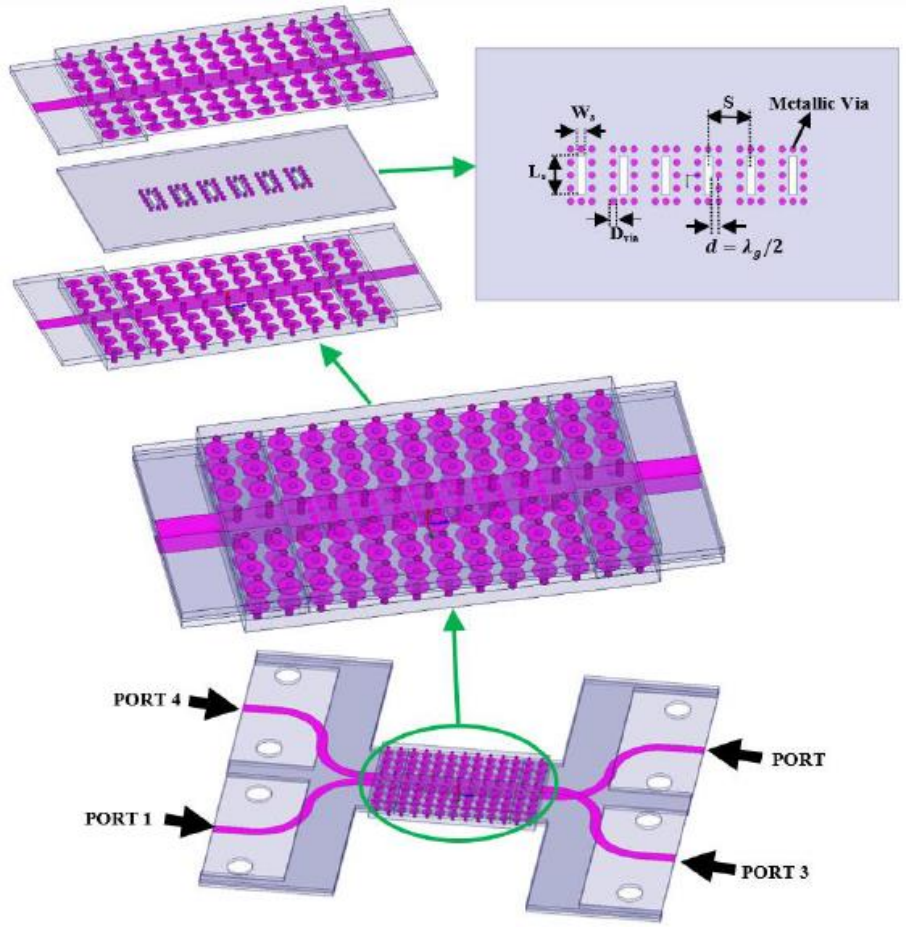


(a) *(b)*

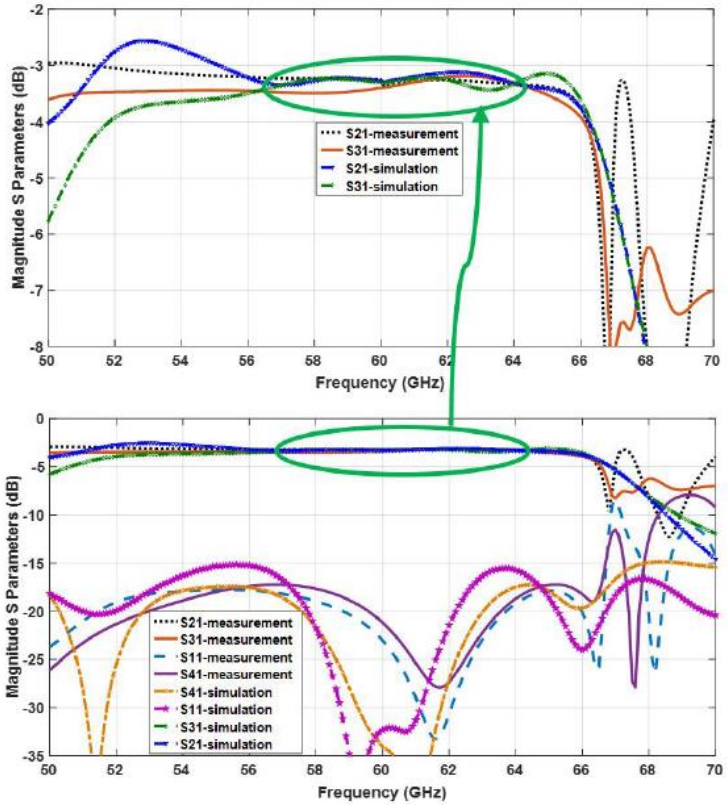
Slika 3.90 Sprežnika sa zakrivljenim otvorima: a) izmereni S parametri, b) fotografija fabrikovanog kola, [80]

Naredna struktura 3-dB 90˚ hibridnog sprežnika sa višestrukim otvorima i malim gubicima, projektovana je u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [81]. Da bi se povećao radni opseg sprežnika iskorišćeni su višestruki redni otvori za spregu, [82]. Takođe, sprežnik je projektovan sa kompenzacijom faze što kao rezultat daje malu grešku faze na izlazu. Teorija i analitička analiza predložene u [81], iskorišćene su za projektovanje inicijalne veličine otvora za spregu. Sprega između talasovoda se vrši kroz šest uzastopnih otvora koji su realizovani u gornjem provodnom sloju, kao što je prikazano na slici 3.91.

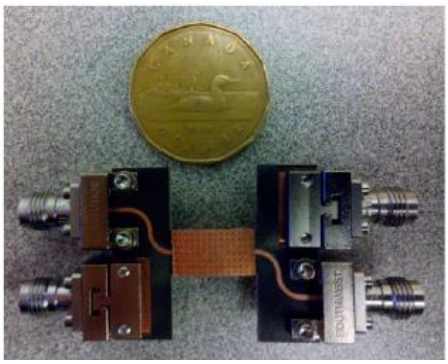
Za pobudu sprežnika iskorišćena je tranzicija iz [37]. Na slici 3.92, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara, realizacija predloženog sprežnika i odziv faze na izlazu sprežnika. Sprežnik je okarakterisan radnim opsegom od 57 do 64 GHz, sa karakteristično malim gubicima od 3,5 dB, i malom greškom u fazi na izlazu koja je manja od 1˚, [81].



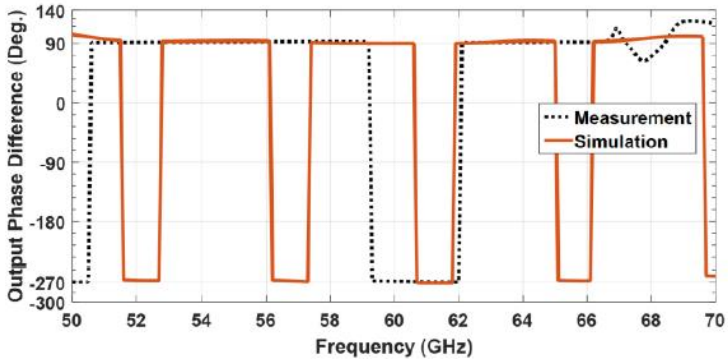
Slika 3.91 Ilustracija 3-dB 90˚ hibridnog sprežnika realizovanog u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [81]



(a)

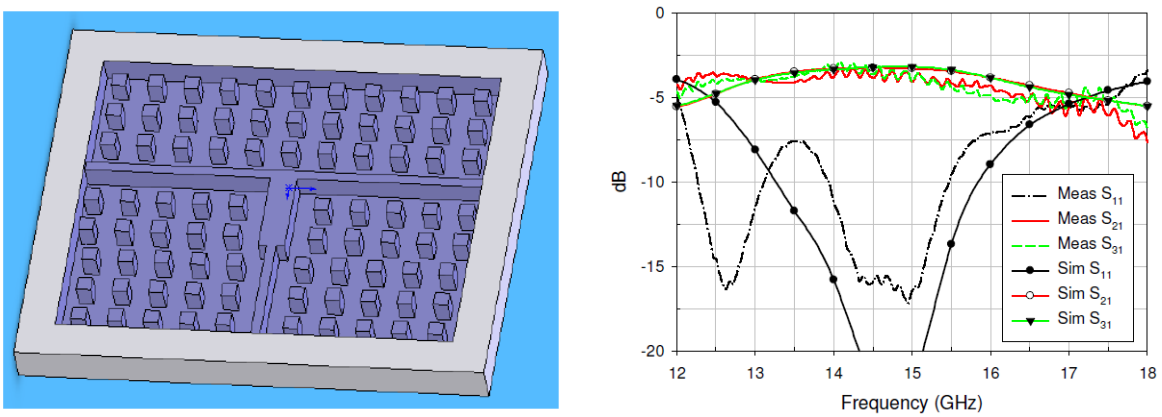


(b)



(c)

Slika 3.92 3-dB 90˚ hibridni sprežnik realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda: a) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, b) fabrikovano kolo, c) odziv faze na izlazu, [81]



(a) *(b)*

Slika 3.93 Predložen delitelja snage: a) ilustracija strukture, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, [83]

U literaturi [83], predložen je jednostavan delitelj snage realizovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa. Delitelj snage je projektovan na radnoj učestanosti od 15 GHz. Dužina prilagodne mreže izabrana je da bude 3λ/4 na učestanosti od 15 GHz. Pobuda je izvršena tranzicijom iz [20].

Na slici 3.93, prikazana je ilustracija predloženog delitelja snage i poređenje simuliranih i izmernih *S* parametara.

Delitelj snage iz [83], okarakterisan je povratnim gubicima boljim od 15 dB i unesenim slabljenjem od oko 4 dB, u radnom opsegu od 14,3 do 15,2 GHz, [83].

U tehnologiji talasovoda na bazi procepa predloženo je par rešenja sprežnika i delitelja snage. Kvadratni sprežnik realizovan u tehnologija grebenastog talasovoda na bazi procepa [77], odlikovan je nivoima sprege na izlaznim portovima od 2,2 dB i 4,2 dB, na radnoj učestanosti od 15 GHz. Tehnologija grebenastog talasovoda iskorišćena je takođe za projektovanje direkcionog sprežnika sa spregnutim grebenima [77], i hibridnog 3-dB sprežnika, [79]. Direkcioni sprežnik okarakterisan je izolacijom većom od 23 dB i direktivnošću većom o 20 dB, na radnoj učestanosti od 14 GHz. Hibridni 3-dB sprežnik na radnoj učestanosti od 14,8 GHz, odlikovan je unesenim slabljenjem od 14 dB u radnom opsegu od 7%, u okolini radne učestanosti.

Tehnologija talasovoda na bazi procepa sa kanalom iskorišćena je za realizaciju hibridnog sprežnika, [78], kod kojeg se sprega između talasovoda reguliše malim otvorom u sredini kanala. Sprežnik je odlikovan radnim opsegom od 37 do 40 GHz, spregom od 3 dB i izolacijom i povratnim gubicima boljim od 20 dB. Takođe, u talasovodima sa kanalom realizovan je sprežnik sa zakrivljenim otvorima, [80], kojim se reguliše sprega između talasovoda. Talasovodi su realizovani za prostiranje horizontalno polarizovanog talasa, između kojih je postavljena zamenljiva ploča sa zakrivljenim otvorima. Promenom ploče sa različitim uglovima zakrivljenih otvora, od 15˚ do 45˚, moguće je menjati koeficijent sprege u opsegu od 10 dB do 19 dB, u opsegu učestanosti od 30 d 40 GHz.

Sličan pristup sprežnika sa otvorima realizovan je u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [81]. Naime, projektovan 3-dB hibridni sprežnik sa uzastopnim otvorima u gornjem provodnom sloju , okarakterisan je radnim opsegom od 57 do 64 GHz, sa gubicima od 3,5 dB i malom faznom greškom na izlazu od 1˚.

U literaturi je predložen i jednostavan delitelja snage, realizovan u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa, [83]. Delitelj snage odlikuje se povratnim gubicima od 15 dB i unesenim slabljenjem od oko 4 dB na radnoj učestanosti od 15 GHz.

3.5 Zaključak

U ovoj glavi, detaljno su predstavljene dve osnovne tehnologije talasovoda na bazi procepa, grebenasti talasovod na bazi procepa i talasovod na bazi procepa sa kanalom. Razmatrane su njihove sličnosti i razlike sa stanovišta geometrije, prostiranja modova primenom disperzionih dijagrama, i raspodele vertikalne električne komponente polja talasa koji se prostire duž talasovoda. Takođe, navedene su i razmatrane različite modifikacije osnovnih talasovoda na bazi procepa; mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, invertovanog mikrostrip talasovod na bazi procepa i geometrija talasovoda na bazi procepa sa kanalom, koje podržavaju vertikalno i horizontalno polarizovane talase.

U drugom delu predstavljene su strukture, *tranzicije*, koje se koriste za pobudu kola realizovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Razmatrane su tri vrste tranzicija, definisane na osnovu njihovog relativnog položaja u odnosu na talasovod na bazi procepa: linijske tranzicije, vertikalne tranzicije i tranzicije zasnovane na sprezi kroz otvore. Pokazano je da linijske tranzicije po performansama i jednostavnim izvedbama predstavljaju najbolje rešenje. Vertikalne tranzicije uglavnom su korišćene na nižim učestanostima za pobudu grebenastih talasovoda na bazi procepa, dok su tranzicije kroz otvore najčešće primenjivane na milimetarskim opsezima učestanosti, za pobudu mikrostrip grebenastih i mikrostrip invertovanih talasovoda na bazi procepa.

U trećem delu detaljno su razmatrana filtarska rešenja realizovana u talasovodima na bazi procepa. U literaturi najzastupljeniji su filtri u talasovodima na bazi procepa sa kanalom, dobijeni jednostavnom realizacijom rezonantnih šupljina i njihovom međusobnom spregom. Preostale dve tehnologije talasovoda na bazi procepa, zastupljene su u literaturi kroz par filtarskih rešenja.

Filtri trećeg, četvrtog i petog reda u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom pokazuju dobre performanse, ali su značajno većih dimenzija u odnosu na filtre realizovane u grebenastom i mikrostrip grebenastom talasovodu na bazi procepa. Filtri realizovani u mikrostrip grebenastim talasovodima na bazi procepa, usled korišćenja dielektričnih materijala, omogućuju značajno smanjivanje dimenzija, ali usled korišćenih dielektričnih materijala pokazuju značajne gubitke. Takođe, realizacija slaganjem rezonatora jedan na drugi u filtrima zasnovanim na grebenastim talasovodima i talasovodima sa kanalom može da doprinese značajnom smanjenju dimenzija filtara.

U četvrtom delu ove glave, predloženi su sprežnici i delitelj snage realizovani u talasovodima na bazi procepa. Realizovane strukture pokazuju dobre performanse i mogućnost uspešne primene tehnologije talasovoda na bazi procepa u svrhu realizacije kvadratnih sprežnika, direkcionih sprežnika, hibridnih 3-dB sprežnika i jednostavnih realizacija delitelja snage.

Razmatranjem svih navedenih filtara i sprežnika snage iz literature, došlo se do zaključka da tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa nije dovoljno primenjivana u realizaciji kola u talasovodima na bazi procepa. Naime, samo su tri filtra realizovana u ovoj tehnologiji i jedan sprežnik snage. Prema tome, stanje u literaturi daje mogućnost istraživanja i projektovanja kola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

U nastavku disertacije, pažnja je prevashodno usmerena ka projektovanju filtara u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa. Doprinos ove disertacije prikazan je projektovanjem singl- i dual-mod rezonatora, koje su potom iskorišćene za projektovanje filtara vrhunskih performansi. Predstavljen je pristup smanjenja gubitaka koji karakterišu sva kola iz literature realizovana u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa. Primenom ovog pristupa dobijene su mnogo bolje performanse filtara projektovanih u disertaciji, koje su uporedive sa performansama filtara realizovanih u tehnologijama grebenastog talasovoda i talasovoda na bazi procepa sa kanalom.

Pored realizovanih filtara, doprinos disertacije je takođe u prvi put predloženom i projektovanom konceptu 0-dB direkcionog sprežnika odlaznog talasa u literaturi.

Glava 4. Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa

Kao što je opisano u trećoj glavi, uvođenjem talasovodnog elementa u obliku mikrostrip grebena unutar PMC površine, dolazi do formiranja mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i do prostiranja kvazi-TEM moda između paralelnih ploča, PEC-PEM. Talas koji se prostire predstavlja dominantni mod realizovanog talasovoda, i on je vrlo sličan kvazi-TEM modu invertovanog mikrostrip voda.

Primenom super ćelije talasovoda na bazi procepa talas koji se prostire duž grebena može se jednostavno analizirati. Prema tome, jedinična ćelija i super ćelija talasovoda služe kao odličan alat kojim se na vrlo jednostavan način dobija uvid u širinu opsega zabranjene zone kao i mod koji se pobuđuje uvođenjem talasovodnog elementa.

U prvom delu ove glave biće predstavljena detaljna analiza projektovanja osnovnih gradivnih elemenata mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa; jedinične ćelije i super ćelije talasovoda.

Iako jedinična ćelija i super ćelija daju optimalne vrednosti opsega učestanosti zabranjene zone i opsega koji pokriva mod koji se prostire duž mikrostrip grebena, na konačni odziv talasovoda na bazi procepa neizostavno utiče primenjena tranzicija, odnosno način na koji je pobuđen talasovod na bazi procepa. Naime, usled ne idealnog prilagođenja različitih nivoa impedanse u celom opsegu učestanosti zabranjene zone, tranzicije ograničavaju iskorišćenje opsega zabranjene zone.

S tim u vezi, u drugom delu ove glave biće predstavljeno projektovanje nove vrste vertikalne tranzicije za pobudu mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

U trećem delu ove glave biće predstavljeno projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, na osnovu projektovanih gradivnih elemenata i predložene tranzicije. Projektovani mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa poslužiće prvobitno za karakterizaciju predložene tranzicije, pa zatim zajedno sa predloženom tranzicijom za pobudu u filtrima, koji će biti predstavljeni u glavama pet i šest.

Fabrikacija i rezultati merenja projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa biće predstavljeni u četvrtom delu ove glave.

4.1 Osnovni gradivni elementi mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Projektovanje i analiza osnovnih gradivnih elemenata, neizostavan je korak u projektovanju kola u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Naime, osnovni gradivni elementi, jedinična ćelija i super ćelija talasovoda, obezbeđuju informacije potrebne za projektovanje PMC površina, a kasnije i za projektovanje talasovoda na bazi procepa, koji se dalje koriste u realizaciju komponenti kao transmisione linije u filtrima za pobudu rezonatora ili u sprežnicima snage.

Projektovanje započinje analizom jedinične ćelije koja daje uvid u ponašanje cele oblasti visoke impedanse sa aspekta opsega učestanosti zabranjene zone, a potom analizom super ćelije talasovoda. Super ćelija talasovoda je dobijena uvođenjem talasovodnog elementa unutar PMC površine i pomoću nje se ostvaruje uvid u ponašanje moda koji se prostire unutar zabranjene zone.

Za projektovanje i analizu geometrijskih parametara gradivnih elemenata iskorišćen je softverski alat *CST Microwave Studio, Eigenmode Solver,* [28]. Pre analize potrebno je za svaki gradivni element definisati odgovarajuće granične uslove. Naime, periodični granični uslovi zajedno sa faznim pomerajem definišu se u pravcima u kojima je potrebno da se gradivni element periodično ponavlja. Graničnim uslovima idealnog električnog provodnika definišu se gornja i donju provodna ploča gradivnog elementa.

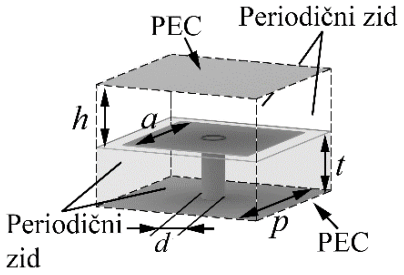
Sa odgovarajuće definisanim graničnim uslovima, pristupa se *Eigenmode* analizi i kao rezultat dobija se disperzioni dijagram gradivnog elementa. Disperzioni dijagram prikazuje modove propagacije za različite fazne konstante na određenim učestanostima, gde za svaki mod propagacije imamo različitu faznu brzinu, grupnu brzinu i vektore elektromagnetskog polja.

Za projektovanje osnovnih gradivnih elemenata mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, iskorišćena je dielektrična podloga *Taconic TLY-5*, debljine t = 1,52 mm, permitivnosti ε_r = 2,2 i dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009.

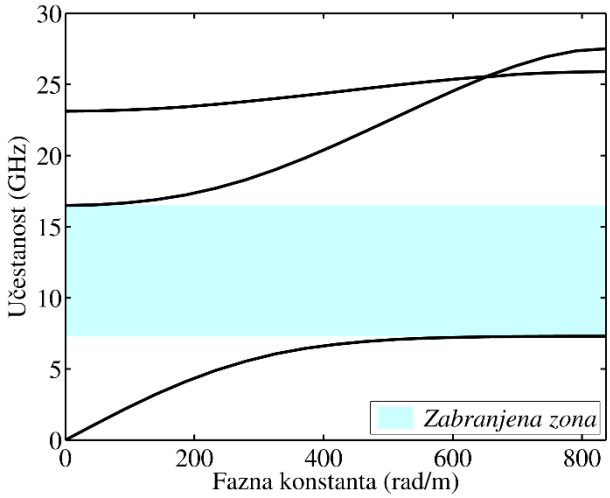
4.1.1 Projektovanje jedinične ćelije

Primer jedinične ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, granični uslovi i ključni geometrijski parametri, prikazani su na slici 4.1. S obzirom na jednostavnu geometriju predložene jedinične ćelije, ista će se koristiti u nastavku ove teze, u svim predloženim kolima. U pojedinim slučajevima biće potrebno skaliranje dimenzija jedinične ćelije radi pomeranja opsega učestanosti zabranjene zone u spektru.

Jedinična ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sastoji se od kvadratnog peč rezonatora dimenzija a, postavljenog na dielektričnu podlogu bočnih dimenzija p i debljine t, uzemljenog metalnom vijom prečnika d. Sa gornje strane jedinične ćelije, na udaljenosti h, postavljena je gornja PEC površina, dok je sa donje strane ispod dielektrične podloge postavljena donja PEC površina. Donja i gornja strana jedinične ćelije, shodno tome, definisane su graničim uslovima idealnog električnog provodnika. Prostor između uzemljenog peč rezonatora i gornje PEC ploče ispunjen je vazduhom, dok u pojedinim slučajevima može biti ispunjen i drugim dielektričnim materijalom.



Slika 4.1 Model jedinične ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa geometrijskim parametrima i definisanim graničnim uslovima



Slika 4.2 Disperzioni dijagram jedinične ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa za optimizovane geometrijske parametre: a = 3,5 mm, p = 3,75 mm, d = 0,6 mm i h = 0,5 mm

Bočni zidovi jedinične ćelije definisani su periodičnim graničnim uslovima. Kada se definišu periodični granični uslovi, softverski alat posmatra jediničnu ćeliju kao objekat koji se periodično ponavlja u svim pravcima, u kojima su definisani periodični granični uslovi. Tokom definisanja periodičnih graničnih uslova, potrebno je definisati i parametre faznog pomeraja.

Eigenmode analizom jedinične ćelije dobijen je disperzioni dijagram prikazan na slici 4.2, za optimizovane geometrijske parametre. Geometrijski parametri PMC površine, ali dominantno udaljenost gornje PEC površine od PMC površine, određuje opseg učestanosti u kojem je zabranjeno prostiranje modova strukture sa paralelnim pločama, odnosno zabranjena zona. Zabranjena zona, na slici 4.2, prikazana je plavom bojom i definisana je kao opseg učestanosti između frekvencijskog maksimuma prvog i frekvencijskog minimuma drugog moda prostiranja strukture sa paralelnim pločama.

Optimizacijom geometrijskih parametara jedinične ćelije, sa slike 4.1, dobijen je širok opseg učestanosti zabranjene zone od 7.3 do 16.5 GHz, koji će u narednim koracima omogućiti dosta slobode tokom projektovanja filtara. Zabranjena zona projektovana je da obuhvati X i Ku opsege, koji se prostiru od 8 do 18 GHz.

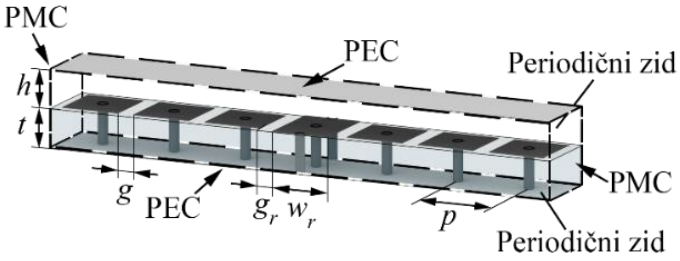
4.1.2 Projektovanje super ćelije talasovoda

Uvođenjem talasovodnog elementa, odnosno mikrostrip grebena, unutar PMC površine dolazi do pobuđivanja kvazi-TEM moda talasa koji se prostire na učestanostima unutar zabranjene zone. Za analizu moda prostiranja koristi se super ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, prikazana na slici 4.3 zajedno sa graničnim uslovima i ključnim geometrijskim parametrima.

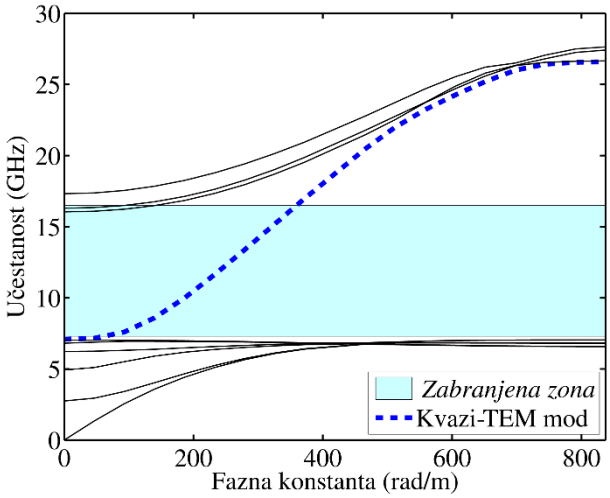
Super ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda sa slike 4.3, sastoji se od uzemljenog mikrostrip grebena širine w_r, položenog na dielektričnu podlogu debljine t, koji je okružen sa bočnim jediničnih ćelijama (slika 4.1) i gornje i donje PEC površine. Tri bočne jedinične ćelije, na međusobnom rastojanju g sa obe strane uzemljenog mikrostrip grebena, dovoljno dobro definišu oblast odsecanja paralelnih ploča, čime je omogućeno da talas ostane lokalizovan u prostoru između mikrostrip grebena i gornje PEC površine. Uzemljeni mikrostrip greben udaljen je od prve bočne jedinične ćelija za rastojanje g_r.

Zidovi super ćelije talasovoda normalni na pravac prostiranja talasa definisani su graničnim periodičnim uslovima. Kao i kod jedinične ćelije, kada se definišu periodični granični uslovi, softverski alat posmatra super ćeliju kao objekat koji se periodično ponavlja u svim pravcima definisanog periodičnog uslova. Prilikom definisanja periodičnih graničnih uslova, potrebno je i definisati parametre faznog pomeraja. Bočni zidovi super ćelije talasovoda su definisani kao idealni magnetski provodnici.

Kao rezultat *Eigenmode* analize super ćelije talasovoda za optimizovane geometrijske parametre, dobija se disperzioni dijagram, prikazan na slici 4.4. Disperzioni dijagram prikazuje mod koji se prostire unutar opsega učestanosti zabranjene zone. Na učestanost odsecanja i karakteristike moda koji se prostire unutar zabranjene zone, utiče promena širine talasovodnog elementa w_r i rastojanje elementa od prve jedinične ćelije PMC površine, g_r.



Slika 4.3 Model super ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa geometrijskim parametrima i definisanim graničnim uslovima



Slika 4.4 Disperzioni dijagram super ćelije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procep, za optimizovane geometrijske parametre: w_r = 3,5 mm, p = 3,75 mm, h = 0,5 mm i g = g_r = 0,25 mm



Slika 4.5 Normalna komponenta električnog polja moda prostiranja mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa na učestanosti od 11.6 GHz

Kritični geometrijski parametri super ćelije talasovoda, w_r i g_r, optimizovani su kako bi se dobio mod prostiranja koji se proteže širinom celog opsega učestanosti zabranjene zone, što će u daljim koracima projektovanja omogućiti dodatnu slobodu prilikom odabira centralne učestanosti filtra.

Mod prostiranja na disperzionom dijagramu sa slike 4.4, prikazan plavom isprekidanom linijom, pokriva celu širinu opsega učestanosti zabranjene zone. Raspodela električnog polja moda koji se prostire unutar zabranjene zone, vrlo je slična raspodeli kvazi-TEM moda invertovanog mikrostrip voda.

Na slici 4.5, prikazana je normalna komponenta električnog polja moda koji se prostire unutar zabranjene zone na učestanosti od 11,6 GHz. Raspodela električnog polja dobijena je simulacijama u softverskom alatu *CST Microwave Studio, Transient Solver* [28]. Električno polje moda je većim delom lokalizovano iznad mikrostrip grebena i gornje PEC površine, unutar vazdušnog procepa. Međutim, na ivicama mikrostrip grebena može se primetiti malo curenje polja u dielektrik ispod mikrostrip grebena. To curenje polja je zanemarljivo malo u odnosu na energiju iznad mikrostrip grebena. Takođe, usled vrlo blisko postavljene gornje PEC površine, širenje polja u oblast iznad bočnih ćelija je u potpunosti potisnuto.

4.2 Projektovanje vertikalne koaksijalne tranzicije

Kako bi se iskoristila što veća širina opsega učestanosti zabranjene zone, projektovana je nova vertikalna koaksijalna tranzicija sa SMA konektora na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, koja na odgovarajući način pobuđuje kvazi-TEM mod prostiranja talasovoda i pruža odlično prilagođenje impedanse u širokom opsegu učestanosti.

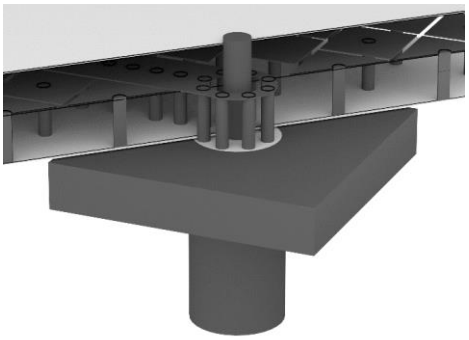
Naime, u dosadašnjim radovima iz literature, kao što je detaljno predstavljeno u trećoj glavi, samo pojedine tranzicije su pokazale odgovarajuće procente iskorišćenja opsega učestanosti zabranjene zone. Projektovanjem nove predložene tranzicije pored poboljšanih performansi, velikog iskorišćenja opsega učestanosti zabranjene zone i malog unesenog slabljenja, ostvaren je i jednostavan način realizacije.

Na slici 4.6, prikazan je poprečni presek predložene tranzicije sa SMA konektora na mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, [84]. SMA konektor je sa svojim spoljašnji delom postavljen sa donje strane strukture, sa kojim ostvaruje provodni kontakt. Središnji vod SMA konektora prolazi kroz kružni otvor u dielektričnoj podlozi i ostvaruje provodan kontakt sa gornjom provodnom pločom. Otvori u dielektričnoj podlozi izvedeni su na samim krajevima talasovoda. Oko otvora u dielektričnoj podlozi na odgovarajućem rastojanju postavljene su vije, koje spajaju greben sa donjim provodnim slojem. Vije zajedno sa središnjim vodom SMA konektora formiraju koaksijalni vod kroz dielektričnu podlogu.

Projektovana tranzicija prvi je primer u literaturi, vertikalnog tipa koaksijalne tranzicije postavljene sa donje strane talasovoda, projektovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Ideja za projektovanje predložene tranzicije dobijena je iz literature [50], [51].

Predloženom tranzicijom dobijen je veliki procenat iskorišćenja opsega učestanosti zabranjene zone u odnosu na skoro sve vrste vertikalnih tranzicija, kao i tranzicija realizovanih u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Takođe, postavljanjem konektora sa donje strane strukture postignuta je jednostavna realizacija i izbegnuti su problemi koji mogu da nastanu montažom konektora sa gornje strane strukture.

Prednosti koje nudi nova predložena tranzicija biće predstavljeni u narednim glavama disertacije, gde će se tranzicija zajedno sa mikrostrip talasovodom na bazi procepa, iskoristi za pobudu rezonatora u filtrima i za pobudu parnih i neparnih modova u 0-dB direkcionom sprežniku snage.



Slika 4.6 Poprečni presek predložene vertikalne koaksijalne tranzicije, [84]

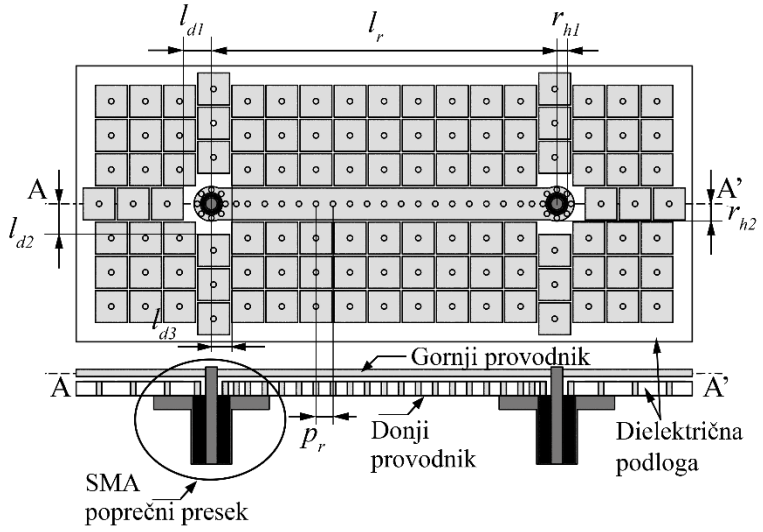
4.3 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Kako bi se okarakterisala predložena tranzicija, projektovan je mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, prikazan na slici 4.7, koji će se zajedno sa predloženom tranzicijom iskoristiti za pobudu novih filtarskih topologija projektovanih u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [84].

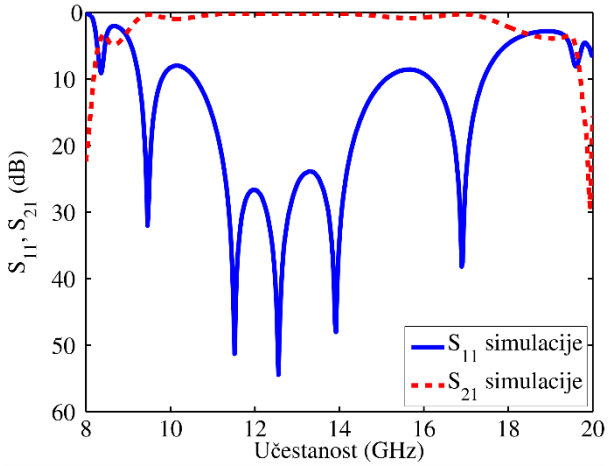
Mikrostrip greben predloženog talasovoda na bazi procepa, projektovan je kao mikrostrip linija, položena na dielektričnu podlogu (*Taconic TLY-5*), uzemljena periodično raspoređenim vijama u sredini mikrostrip linije. Vije su postavljene na rastojanju od p_r = 1.875 mm, čime je istovremeno obezbeđeno efektivno ponašanje mikrostrip grebena i izbegnuto gusto pakovanje vija. Dužina predloženog talasovoda je izabrana da bude 11p, odnosno jedanaest perioda PMC površine, čime je postignuto odgovarajuće prostiranje kvazi-TEM moda duž mikrostrip grebena. Mikrostrip greben je okružen sa tri reda jediničnih ćelija, što je dovoljno za bočno ograničenje elektromagnetske energije i lokalizaciju duž grebena.

Pogled od gore i poprečni presek projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa prikazan je na slici 4.7, sa kritičnim geometrijskim parametrima. Kao dobra aproksimacija gornje i donje PEC ploče iskorišćen je bakar, na slici 4.7 označen kao gornji i donji provodnik.

Projektovani mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, pobuđen je sa predloženim vertikalnim tranzicijama, čiji je pogled od gore i poprečni presek takođe prikazan na slici 4.7. Kako bi se ostvarile što bolje performanse predložene tranzicije, odnosno što bolje prilagođenje impedanse između SMA konektora i mikrostrip grebena, i omogućila što veća pokrivenost opsega učestanosti zabranjene zone, optimizovani su sledeći geometrijski parametri: prečnik otvora u dielektričnoj podlozi r_{h1}, spoljašnji prečnik prstena vija r_{h2}, rastojanje između središnjih vodova SMA konektora l_s, i rastojanje središnjeg voda SMA konektora od bočnih jediničnih ćelija, l_{d1}, l_{d2} i l_{d3}.



Slika 4.7 Mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek A-A',



Slika 4.8 Rezultati S parametra simulacije mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa predloženom tranzicijom, [84]

Analiza predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa izvršena je pomoću softverskog alata *CST Microwave Studio, Transient Solver*, [28]. Model SMA konektora je projektovan i iskorišćen u toku analize mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, kako bi se uračunao uticaj SMA konektora na krajnji odzive strukture.

S parametri dobijeni simulacijama predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, prikazani su na slici 4.8. Korišćenjem predložene tranzicije dobijena je pokrivenost opsega učestanosti zabranjene od 10,97 do 14,57 GHz, odnosno 39%, sa povratnim gubicima boljim od 15 dB i unesenim slabljenjem boljim od 0,35 dB.

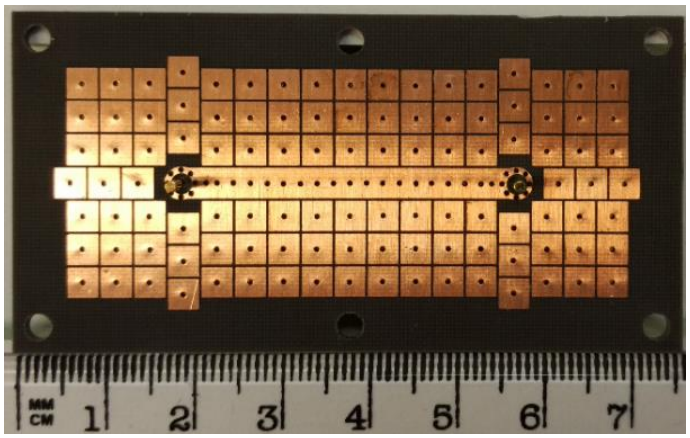
Iako predložena tranzicija ne omogućava pokrivenost celog opsega učestanosti zabranjene zone, ona svojim osobinama sa stanovišta unesenog slabljenja i povratnih gubitaka, zadovoljava potrebe za korišćenjem u filtarskim topologijama. Takođe, predložena tranzicija nadmašuje po pitanju pokrivenosti opsega zabranjene zone, unesenog slabljenja i povratnih gubitaka tranzicije iz [50], [51].

4.4 Fabrikacija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i rezultati merenja

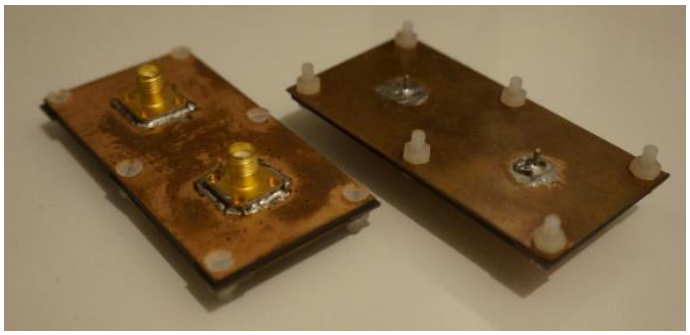
Predloženi mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa fabrikovan je korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča, realizovan na dielektričnoj podlozi *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2, dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009 i debljine t = 1,52 mm. Gornja provodna ploča realizovana je od bakra debljine 0,8 mm.

Na slici 4.9 prikazana je fotografija pogleda od gore i sastavljenog kola fabrikovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [84]. Slika 4.9(b), prikazuje donju i gornju stranu kola. Kolo je sastavljeno korišćenjem najlonskih vijaka, podloški i navrtki. Kao što se može videti sa slike 4.9(b), spoljašnji deo SMA konektora zalemljen je za donji provodnik kola. Sa druge strane, središnji vod SMA konektora provučen je kroz otvor u dielektričnoj podlozi i zalemljen je za gornji provodnik kola.

Na slici 4.10, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara fabrikovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, sa slike 4.9. Rezultati merenja su dobijeni korišćenjem vektorskog analizatora mreža, *Agilent N5230A*. Pre merenja izvršena je elektronska kalibracija vektorskog analizatora mreža, korišćenjem modula *Keysight N4693A*.

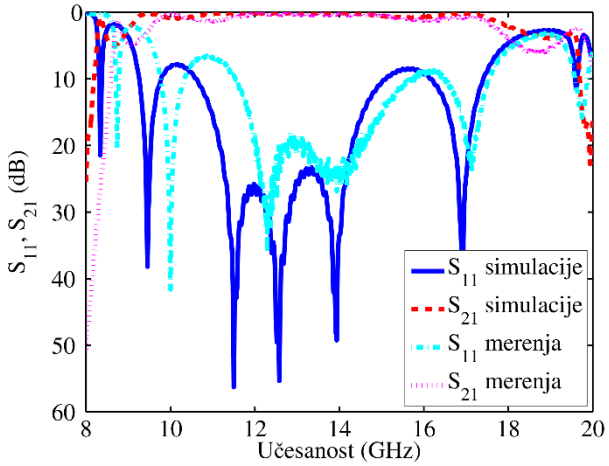


(a)



(b)

Slika 4.9 Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa: a) fabrikovano kolo, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) sastavljeno kolo sa najlonskim vijcima i SMA konektorima (pogled sa leva na desno: donji deo kola i gornji deo kola), [84]



Slika 4.10 Poređenje simuliranih i izmerenih S parametara mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [84]

Dobijena su dobra slaganja između simuliranih i izmerenih rezultata u opsegu učestanosti od 11,85 do 15 GHz, sa malim gubicima. Ovaj opseg je pogodan za projektovanje filtara.

U tabeli 4.1, dato je poređenje performansi predložene tranzicije i ostalih relevantnih tranzicija iz literature.

TABELA 4.1 POREĐENJE PERFORMANSI PREDLOŽENE TRANZICIJA I OSTALIH RELEVANTNIH TRANZICIJA IZ LITERATURE

Literatura	***Topologija tranzicije***	***Opseg zabranjene zone [GHz]***	***Tip rezultata***	***Pokrivenost (RL = 10 dB) [%]***	***Pokrivenost (RL = 15 dB) [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***
[50]	Vertikalna	10 – 23	Simulacija	27,7	17,7	2
[51]	Vertikalna	22 – 29,5	Simulacija	26	20	-
[37]	Linijska	20,8 – 44,6	Simulacije	64,8	47,2	1
[5]	Kroz otvore	151 – 190	Simulacije	50	40	2,5
[59]	Kroz otvore	45 – 75	Simulacije	76,6	22,3	2,5
[22]	Linijska	5 - 15	Merenja	60	20,5	1
[31]	Kroz otvore	45 – 72	Merenja	35,2	17,26	2,2
[58]	Kroz otvore	151 – 190	Simulacije	50	40	2,5
[60]	Kroz otvore	50,55 – 75	Merenja	81	36,2	3
[84]	***Vertikalna***	***7,3 – 16,5***	***Merenja***	***45***	***39***	***0,35***

U poređenju sa ostalim, do sada predloženim tranzicijama, realizovanim u tehnologiji mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa, predložena tranzicija [84] ne zahteva dodatne slojeve poput tranzicija iz [37], [58]–[60] i složene realizacije [22], [31]. Takođe, predložena tranzicija pokazala se kao najbolje rešenje po pitanju pokrivenosti učestanosti zabranjene zone, unesenog slabljenja i povratnih gubitaka, od svih do sada u literaturi objavljenih tranzicija u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, kao i od tranzicija od kojih je proistekla ideja, [50], [51].

4.5 Zaključak

U ovoj glavi predstavljen je princip projektovanja mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, počevši od osnovnih gradivnih elemenata, jedinične ćelije i super ćelije talasovoda, preko nove predložene vertikalne koaksijalne tranzicije, i na kraju projektovanog i fabrikovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

Projektovanje osnovnih gradivnih elemenata predstavlja inicijalni korak prilikom projektovanja talasovoda na bazi procepa. Ovaj korak karakterističan je za sve vrste talasovoda na bazi procepa, i predstavljen je u ovoj glavi detaljno. U narednim glavama, korak projektovanja osnovnih gradivnih elemenata neće biti detaljno razmatran.

U drugom delu ove glave predložena je i projektovana nova vertikalna koaksijalna tranzicija, koja predstavlja doprinos ove doktorske teze. Predložena tranzicija je prvi put objavljena u literaturi i po svojim performansama u velikom meri prevazilazi predložene tranzicije u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

Mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa projektovan je korišćenjem predložene tranzicije u trećem delu ove glave, dok je u četvrtom delu predstavljena fabrikacija talasovoda u standardnoj tehnologiji štampanih ploča, zajedno sa poređenjem simuliranih i izmerenih rezultata. Postoji dobro slaganje između simuliranih i izmerenih rezultata.

Predloženi mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, zajedno sa tranzicijama i konektorima biće iskorišćen u narednim delovima disertacije za pobudu rezonantnih struktura u filtrima i za pobudu parnih i neparnih modova u 0-dB direkcionom sprežniku snage.

Glava 5. Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa zasnovani na modifikacijama uzemljenih peč rezonatora

U ovoj glavi biće predstavljeni novi filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, zasnovani na modifikacijama uzemljenih peč rezonatora, [84]. Rezonatori su realizovani kao defekti unutar PMC površina, dobijeni modifikacijom dimenzija samo jednog peča, jedne jedinične ćelije PMC površine. Predloženi rezonatori vrlo su kompaktni i dozvoljavaju značajnu fleksibilnost prilikom projektovanja. Takođe, ne zahtevaju modifikaciju PMC elemenata niti dodatne provodne slojeve za dobijanje odgovarajuće filtarske topologije.

U prvom delu ove glave predstavljen je detaljan način projektovanja rezonatora, korišćenjem predložene super ćelije rezonatora. Predložena super ćelija rezonatora biće iskorišćena za projektovanje filtara u narednim sekcijama ove glave. Takođe, u prvom delu dato je poređenje sa aspekta gubitaka, predloženog rezonatora sa rezonatorima sličnih dimenzija, projektovanim u tehnologiji mikrostrip voda i talasovoda integrisanih u podlogu (engl. *Substrate Integrated Waveguide* -SIW).

Projektovanje filtara prvog, drugog, četvrtog i petog reda, predstavljeno je u drugom delu ove glave. Filtar prvog reda poslužiće kao koncept koji bi trebalo da ilustruje mogućnost projektovanja filtara korišćenjem predloženih rezonatora. Takođe, u drugom delu ove glave biće predstavljeni filtri drugog i četvrtog reda zasnovani na direktno spregnutim predloženim rezonatorima, u linijskoj konfiguraciji. Dodatno, biće razmotren način smanjenja sprege između rezonatora uvođenjem jedinične ćelije, od koje je načinjena okolna PMC površina. Filtar petog reda predstaviće najsloženiju filtarsku topologiju dobijenu unakrsnom spregom predloženih rezonatora.

U trećem delu ove glave predstavljena su fabrikovana kola predloženih filtarskih topologija primenom standardne tehnologije štampanih ploča. Takođe, fabrikovani filtri su izmereni i rezultati merenja su upoređeni sa rezultatima simulacija.

Poređenje predloženih filtara sa drugim filtrima realizovanim u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, dato je u četvrtom delu ove glave.

Potrebno je naglasiti, da je za pobudu rezonatora u predloženim filtrima u ovoj glavi iskorišćen mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa predložen u četvrtoj glavi, zajedno sa predloženim vertikalnim koaksijalnim tranzicijama i SMA konektorima. Takođe, sve kritične dimenzije jedinične ćelije, super ćelije talasovoda, kao i dimenzije predloženog talasovoda i tranzicije iz četvrte glave, iskorišćene su prilikom projektovanja super ćelije rezonatora i svih predloženih filtara u ovoj glavi.

5.1 Projektovanje super ćelije rezonatora

Kako bi se stvorio preduslov za formiranje filtara u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, potrebno je da se na odgovarajući način pobude rezonatori realizovani između paralelnih ploča, PEC-PMC. Kao što je navedeno u trećoj glavi, rezonatori u talasovodima na bazi procepa mogu se realizovati uklanjanjem ili modifikacijom metalnih stubića, odnosno uzemljenih peč rezonatora, unutar PMC površine.

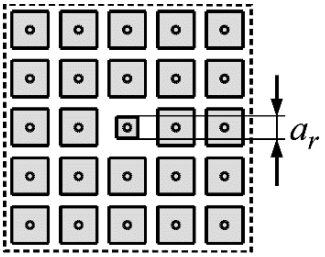
Pomoćni gradivni element koji je od važnosti prilikom projektovanja filtara u talasovodima na bazi procepa, jeste super ćelija rezonatora. Super ćelija rezonatora daje uvid u ponašanje i broj rezonantnih modova koji se pobuđuju na različitim učestanostima unutar zabranjene zone, kada se unutar PMC površine unese defekt, odnosno kada se periodičnost PMC površine poremeti odgovarajućom nepravilnošću.

Kao što je predloženo u [84] za projektovanje super ćelije rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, iskorišćena je dielektrična podloga *Taconic TLY-5*, debljine t = 1,52 mm, permitivnosti ε_r = 2,2 i dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009.

Na slici 5.1, prikazana je super ćelija rezonatora dobijena modifikacijom odnosno smanjivanjem jednog peč rezonatora unutar PMC površine, promenom njegove dimenzije a_r. Radi jednostavnosti, prikazan je izgled super ćelije rezonatora od gore, odnosno bez gornje PEC površine. Ovakvu modifikaciju posmatramo kao defekt unesen u PMC površinu, koji remeti periodičnost PMC-a i prouzrokuje stvaranje rezonantnog efekta.

Super ćelija predloženog rezonatora sastoji se od modifikovanog peč rezonatora okruženog sa dva reda jediničnih ćelija. Dva reda jediničnih ćelija u super ćeliji rezonatora dovoljni su da lokalizuju rezonantni mod u prostor modifikovanog peče rezonatora i pruže odgovarajuće rezultate analize. Na slici 5.1 nije prikazano, mada se smatra da super ćelija rezonatora sadrži i gornju i donju PEC površinu, dielektričnu podlogu debljine t i pripadajući vazdušni procep visine h, između PMC površine i gornje PEC površine.

Predloženi rezonator zauzima vrlo malo prostora i za njegovo formiranje nije potrebna modifikacija PMC površine. Isprekidana linija, kojom je uokvirena super ćelija, predstavlja granični uslov idealnog magnetskog provodnika.



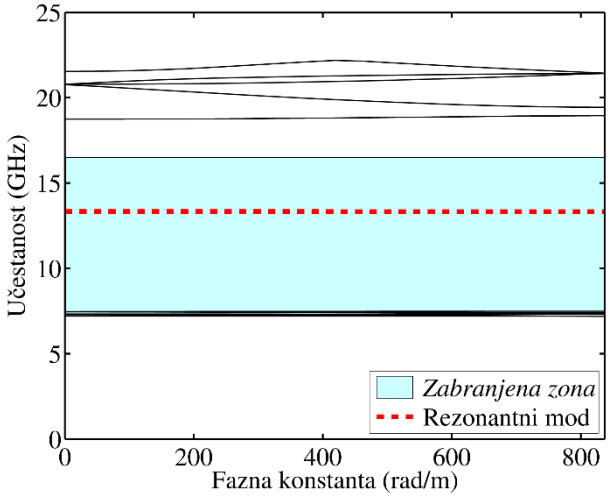
Slika 5.1 Super ćelija rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa; pogled od gore bez gornje PEC površine, [84]

Na slici 5.2, prikazan je disperzioni dijagram dobijen analizom predložene super ćelije rezonatora, pomoću softverskog alata *CST Microwave Studio, Eigenmode Solver*, [28]. Pošto su iskorišćene iste dimenzije jedinične ćelije kao u glavi četiri, opseg učestanosti zabranjene zone proteže se od 7,3 do 16,5 GHz. Rezonantni mod koji pobuđuje modifikovani peč rezonator, prikazan je na slici 5.2 crvenom isprekidanom linijom unutar zabranjene zone, dobijen na učestanosti od 13,5 GHz za dimenzije peča a_r = 1,5 mm.

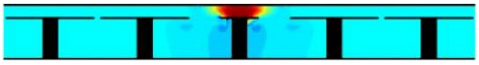
Rezonantni efekat koji uzrokuje modifikovani peč rezonator, može se demonstrirati raspodelom električnog polja rezonantnog moda. Na slici 5.3, prikazana je normalna komponenta električnog polja rezonantnog moda, sa elektromagnetskom energijom lokalizovanom između modifikovanog peč rezonatora i gornje PEC površine, na učestanosti od 13,5 GHz. Sa slike 5.3, može se zaključiti da iako predloženi rezonator u suštini predstavlja rezonantnu šupljinu, raspodela električnog polja predloženog rezonatora realizovanog u mikrostrip grebenastom talasovodu na bazi procepa, razlikuje se u odnosu na klasične rezonantne šupljine.

Fleksibilnost koju nudi predloženi rezonator jeste promena rezonantne učestanosti, promenom parametra a_r. Naime, promenom parametra a_r učestanost rezonatora može se menjati skoro u celom opsegu učestanosti zabranjene zone, kao što je prikazano na slici 5.4. Međutim, kada se veličina peča smanji na dimenzije prečnika vije, rezonantna učestanost izlazi iz opsega učestanosti zabranjene zone.

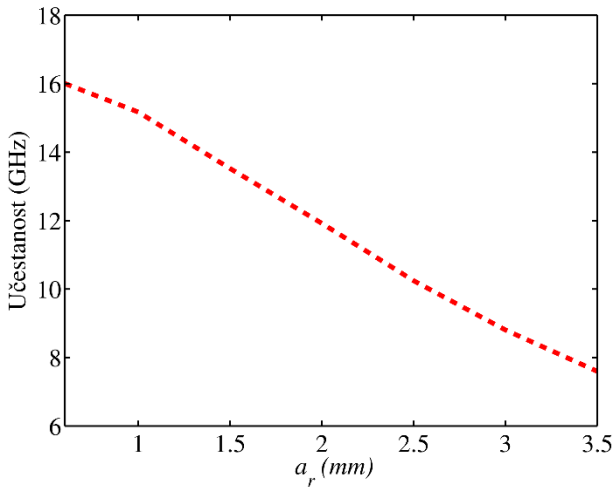
Prednosti koje nudi ovakav rezonator u odnosu na druge tipove konvencionalnih tehnologija biće predstavljane u narednoj sekciji.



Slika 5.2 Disperzioni dijagram super ćelije rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procep za rezonantni mod na 13,5 GHz, dobijen za dimenzije geometrijskog parametra a_r = 1,5 mm



Slika 5.3 Raspodela električnog polja rezonantnog moda super ćelije rezonatora mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, na učestanosti od 13,5 GHz



Slika 5.4 Zavisnost rezonantne učestanosti od promene parametra a_r

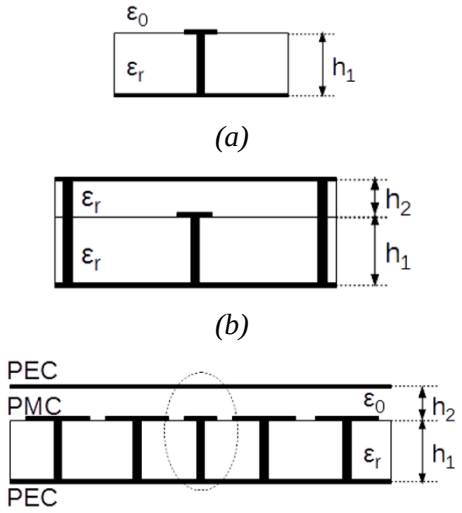
5.1.1 Poređenje rezonatora realizovanih u tehnologijama mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, mikrostrip voda i talasovoda integrisanih u podlogu (SIW)

Tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, može se posmatrati kao alternativa široko primenjivanim i veoma atraktivnim tehnologijama mikrostrip voda i talasovodima integrisanim u podlogu (*engl. Surface Integrated Waveguide*). Međutim, ono što tehnologiju mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa izdvaja od navedenih tehnologija jeste ostvarivanje većih faktora dobrote, posebno na višim učestanostima.

Naime, iako tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa koristi dielektrične podloge, kao i druge navedene tehnologije, u takvim strukturama najveći deo elektromagnetske energije ostaje lokalizovan unutar vazdušnog procepa, između talasovodnog elementa i gornje PEC ploče. Prema tome, dielektrični gubici nisu toliko izraženi kao kod mikrostrip voda i talasovoda integrisanog u podlogu, kod kojih veliki procenat elektromagnetske energije prolazi kroz dielektrik i utiče na povećane dielektrične gubitke.

Kako bismo uporedili faktore dobrote navedenih tehnologija, projektovani su peč rezonatori istih dimenzija u tehnologijama mikrostrip voda, talasovoda integrisanog u podlogu i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, prikazani na slici 5.5. Analiza neopterećenog faktora dobrote izvršena je pomoću softverskog alata *CST Microwave Studio, Eigenmode Solver*, [28], i rezultati su dati u tabeli 5.1. Tokom analize, u svim topologijama rezonatora korišćen je dielektrični materijal *Taconic TLY-5*, debljine t = 1,52 mm.

Iz tabele 5.1, može se videti da peč rezonator realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa ima veće faktore dobrote što proizilazi iz činjenice da osobine tehnologije ne zavise od dielektričnih gubitaka. Najizraženije dielektrične gubitke ima mikrostrip, dok su gubici kod rezonatora realizovanog u tehnologiji talasovoda integrisanih u podlogu nešto viši u odnosu na rezonator realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda.



Slika 5.5 Topologije peč rezonatora realizovanih u tehnologijama: a) mikrostrip, b) talasovoda integrisanih u podlogu, c) mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Još jedna prednost jeste činjenica da je fabrikacije mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa u odnosu na proces fabrikacije talasovoda integrisanih u podlogu, manje osetljiva na odstupanja u fabrikaciji, pošto talasovodi sa mikrostrip grebenom ne zahtevaju višeslojnu fabrikaciju, pri kojoj je neophodno postavljanje dielektričnih slojeva jedan na drugi, poravnavanje vija i mogućnost nastanka vazdušnih džepova između dielektričnih slojeva.

Na kraju, tehnologija talasovoda na bazi procepa je skalabilna, u odnosu na tehnologije mikrostrip voda i talasovoda integrisanih u podlogu. Naime, skaliranje dimenzija kola realizovanih u talasovodima na bazi procepa, moguće ih je transformisati za rad na višim učestanostima.

TABELA 5.1 POREĐENJE NEOPTEREĆENIH FAKTORA DOBROTE PEČ REZONATORA U TEHNOLOGIJAMA MIKROSTRIP VODA, TALASOVODA INTEGRISANOG U PODLOGU I MIKROSTRIP GREBENASTOG TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Tehnologija	***h_1 [mm]***	***h_2 [mm]***	***Neopterećeni Q faktor***
Mikrostrip	1,52	-	448
SIW	0,76	0,76	739,15
Predloženi rezonator, [84]	***1,52***	***0,5***	***853***

5.2 Projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Analiza super ćelije rezonatora i osnovnih gradivnih elemenata, jedinične ćelije i super ćelije talasovoda, predstavlja veoma pouzdane inicijalne korake u projektovanju filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Projektovani filtri, u nastavku ove glave, zasnovani su na predloženom mikrostrip grebenastom talasovodu na bazi procepa iz četvrte glave, koji je namenjen za pobudu rezonatora. Takođe, predložena tranzicija i SMA konektori, predstavljaju sastavni deo filtara.

Predloženi su filtri propusnici opsega prvog, drugog, četvrtog i petog reda, [84]. Filtri prvog, drugog i četvrtog reda oslanjaju se na direktno spregnute rezonatore, dok filtar petog reda zasnovan na unakrsno spregnutim rezonatorima, pokazuje eliptičan odziv. Sva predložena filtarska rešenja odlikuju se dobrim performansama.

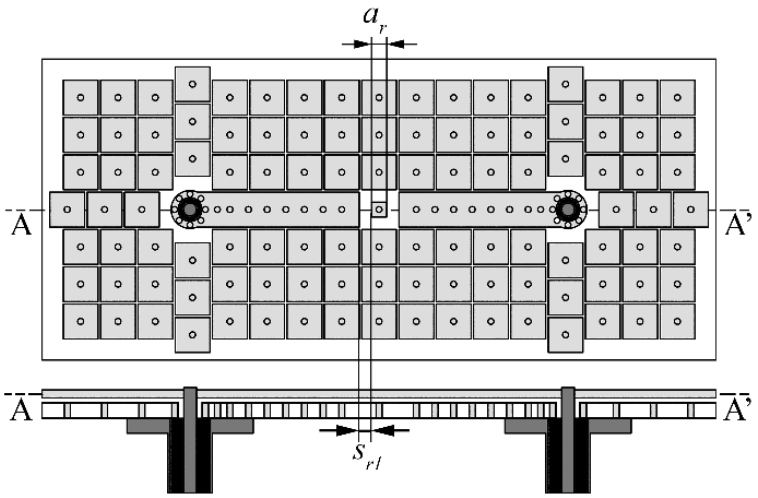
5.2.1 Filtra prvog reda propusnika opsega

Filtar propusnik opsega prvog reda projektovan je kao koncept, sa namerom da se dokaže mogućnost projektovanja filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa, korišćenjem predloženog rezonatora. Za projektovanje filtra, iskorišćeno je okruženje predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa iz četvrte glave.

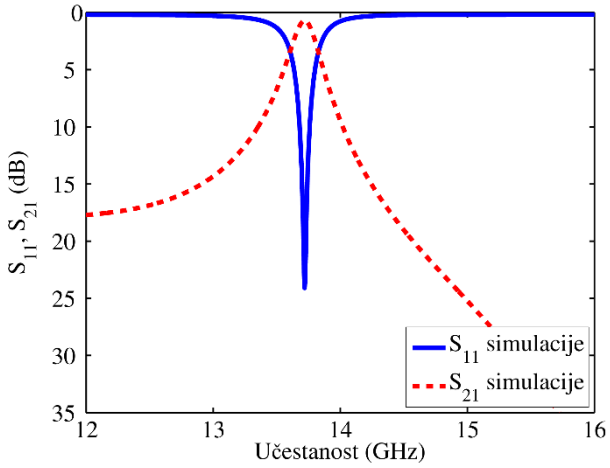
Na slici 5.6, prikazan je projektovan filtar prvog reda propusnik opsega sa rezultatima simulacija *S* parametara. Filtra prvog reda dobijen je uklanjanjem kratke sekcije mikrostrip grebena u koju je postavljen predložen rezonator. Za pobudu rezonatora iskorišćene su dve sekcije talasovoda, zajedno sa koaksijalnim tranzicijama i SMA konektorima.

Performanse filtra prvog reda optimizovane su rastojanjem s_{r1}, kojim je kontrolisana sprega uvodnih linija i rezonatora, i dimenzijama peč rezonatora a_r. Za vrednosti parametra s_{r1} = 1,25 mm i a_r = 1,5 mm, dobijen je filtarski odziv uskog propusnog opsega na centralnoj učestanosti od 13,72 GHz, sa odličnim karakteristikama unutar propusnog opsega; malim unesenim slabljenjem od 0,73 dB, povratnim gubicima od 24 dB i relativnom širinom propusnog opsega od 1,7% na centralnoj učestanosti.

Filtar prvog reda poslužio je kao koncept kojim je dokazano da ako se predložena rezonantna šupljina pobudi na odgovarajući način pomoću sekcija mikrostrip grebena, moguće ostvariti filtarske odzive dobrih performansi u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.



(a)



(b)

Slika 5.6 Filtar prvog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani S parametri, [84]

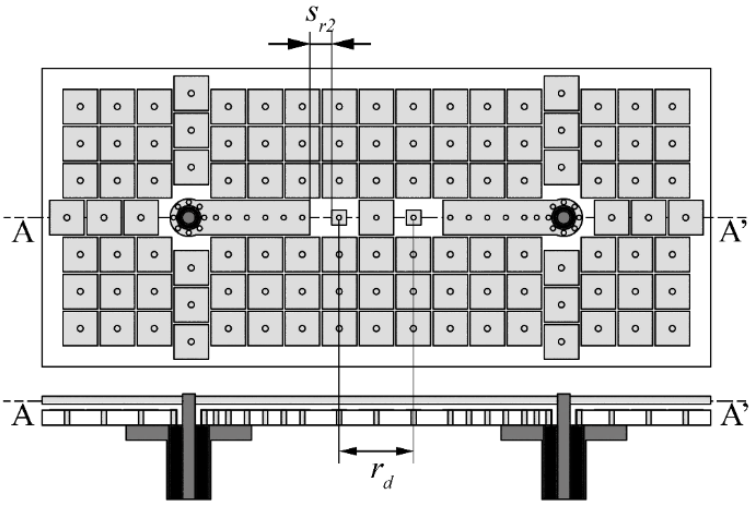
5.2.2 Filtar propusnik opsega drugog reda sa direktno spregnutim rezonatorima

Sledeći filtra realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa drugog reda, realizovan je sa direktno spregnutim rezonatorima. Naime, filtar je projektovan sprezanjem dva predložena rezonatora preko jedne jedinične ćelije PMC površine, postavljene između rezonatora. Rezonatori su pobuđeni sekcijama uvodnih linija, koje se sastoje od mikrostrip grebena, koaksijalnih tranzicija i SMA konektora. Za projektovanje filtra, iskorišćeno je okruženje predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa iz četvrte glave.

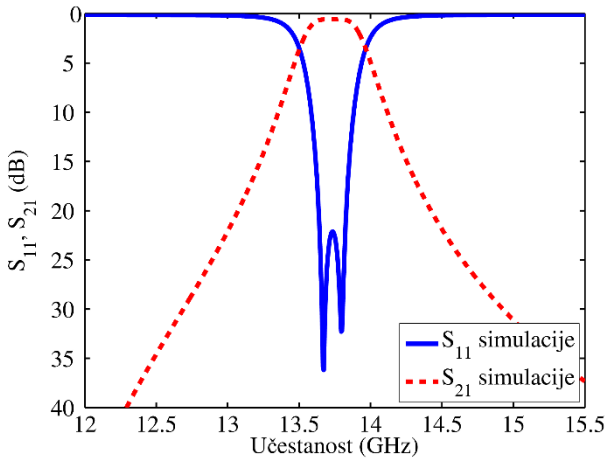
Predložene rezonatore možemo posmatrati kao rezonantne šupljine koje su po svojoj prirodi sklone jakoj međusobnoj sprezi. Jaku međusobnu spregu između dva predložena rezonatora moguće je smanjiti uvođenjem jedinične ćelija istih dimenzija kao okolne PMC ćelije, koja će razdvojiti rezonatore i postići odgovarajuće nivoe sprege. Jedinična ćelija postavljena između rezonantnih šupljina, pošto ima značajno drugačije dimenzije, ne spreže se sa modom rezonatora i prema tome ne utiče na konačnu

učestanost filtra. Međutim, potrebno je napomenuti da se sprega između dva rezonatora može dodatno kontrolisati promenom veličine jedinične ćelije postavljene između rezonatora. Pošto su takve promene male u odnosu na okolnu PMC površinu, one ne utiču značajno na rezonantne učestanosti predloženih rezonatora.

Na slici 5.7, prikazan je projektovani filtar propusnik opsega drugog reda sa simuliranim *S* parametrima. Za projektovanje filtra iskorišćena je dobro ustanovljena tehnika koja koristi krive keoficijenta sprege i spoljašnjeg faktora dobrote, [85]. Pošto je koeficijent sprege *K*, primarno određen rastojanjem između rezonatora, kriva koeficijenta sprege je dobijena za različite vrednosti geometrijskog parametra r_d. Spoljašnji faktor dobrote Q_e, dominantno određuje spregu rezonatora sa uvodnim linijama, pa je kriva spoljašnjeg faktora dobrote dobijena je za različite vrednosti geometrijskog parametra s_{r2}. Dobijene krive koeficijenta sprege *K* i spoljašnjeg faktora dobrote Q_e, prikazane su na slici 5.8.

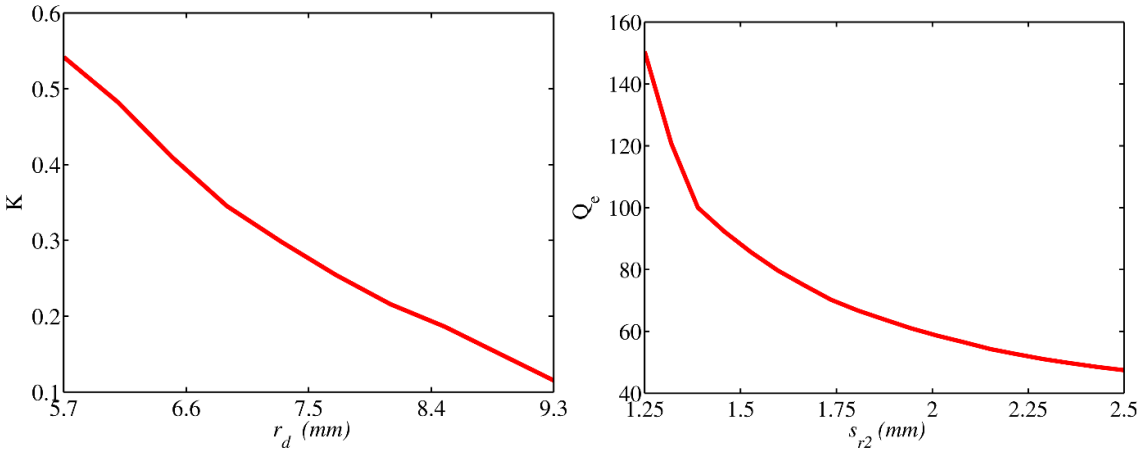


(a)



(b)

Slika 5.7 Filtar drugog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani S parametri, [84]



(a) *(b)*

Slika 5.8 Krive za projektovanje filtra drugog reda: a) koeficijent sprege K, b) spoljašnji faktor dobrote Q_e, [84]

Filtar drugog reda sa Čebiševljevom filtarskom karakteristikom, projektovan je da radi na centralnoj učestanosti od 13,74 GHz, sa relativnom širinom propusnog opsega od 3,4%. Korišćenjem krivih faktora sprege i spoljašnjeg faktora dobrote, za odgovarajuće vrednosti K = 0,2707 i Q_e = 47,45 dobijene su vrednosti geometrijskih parametara r_d = 7,55 mm i s_{r2} = 2,5 mm, respektivno. Dimenzije rezonatora nisu menjane i iznose a_r = 1,5 mm.

Rezultati simulacija za filtar drugog reda prikazani su na slici 5.7(b). Filtar je okarakterisan sa centralnom učestanosti od 13,74 GHz, sa malim unesenim slabljenjem u propusnom opsegu od 0,55 dB, povratnim gubicima od 22 dB i relativnom širinom propusnog opsega od 3,4% na centralnoj učestanosti filtra.

Pored filtra prvog reda, filtar drugog reda pokazao je novi potencijal projektovanja filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, projektovanjem složenije strukture i mogućnosti primene standardne filtarske tehnike; koeficijenta sprege i spoljašnjeg faktora dobrote.

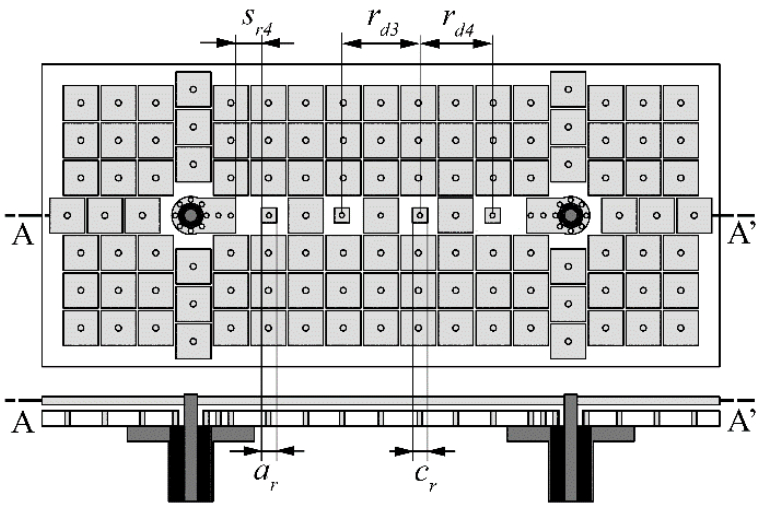
5.2.3 Filtra propusnik opsega četvrtog reda sa direktno spregnutim rezonatorima

Kako bi se demonstrirala mogućnost primene predloženih rezonatora u složenijim filtrima višeg reda, projektovan je filtar četvrtog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Izgled projektovanog filtra prikazan je na slici 5.9, zajedno sa rezultatima simulacija *S* parametara. Za projektovanje filtra, iskorišćeno je okruženje predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa iz četvrte glave.

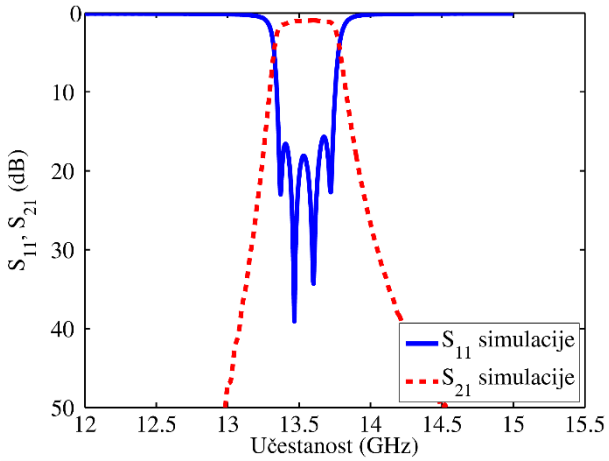
Filtar četvrtog reda propusnik opsega realizovan je na isti način kao i filtar drugog reda, sprezanjem rezonatora preko jedne jedinične ćelije PMC površine, kao što je prikazano na slici 5.9(a). Ostatak kratkih sekcija mikrostrip grebena, koaksijalnih tranzicija i SMA konektora iskorišćen je za pobudu filtra. Kao i kod filtar drugog reda, filtar četvrtog reda realizovan je sa direktno spregnutim rezonatorima.

Filtar četvrtog reda projektovan je korišćenjem krivih koeficijenta sprege i spoljašnjeg faktora dobrote, sa slike 5.8. Takođe, prilikom projektovanja korišćena je optimizacija bazirana na modelu električnog kola. Primenom metode numeričkog podešavanja parametara električnog modela kola, optimizovane su vrednosti sprega između pojedinih rezonatora i faktora dobrote, [85].

Filtar četvrtog reda projektovan je sa Čebiševljevom filtarskom funkcijom, na radnoj učestanosti od 13,55 GHz sa relativnom širinom propusnog opsega od 3,5%, talasanjem u propusnom opsegu od 0,5 dB i povratnim gubicima od 16,5 dB. Potrebno je napomenuti da jedinične ćelije postavljene između rezonantnih šupljina nisu modifikovane ni na koji način. Prilikom optimizacije filtarskog odziva izvršena je promena dimenzija peč rezonatora i njihovo pomeranje unutar šupljina.



(a)



(b)

Slika 5.9 Filtar četvrtog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani S parametri, [84]

Za dobijanje odziva sa slike 5.9(b) optimizovane su sledeće dimenzije filtra četvrtog reda: rastojanje između drugog i trećeg rezonatora r_{d3} = 7.8 mm, rastojanje između prvog i drugog, odnosno trećeg i četvrtog rezonatora r_{d4} = 7.28 mm, rastojanje između uvodnih linija i rezonatora s_{r4} = 2.72 mm i dimenzije drugog i trećeg rezonatora c_r = 1.485 mm. Dimenzije prvog i četvrtog rezonatora nisu modifikovane i iznose a_r = 1.5 mm.

Projektovanjem filtra četvrtog reda u linijskoj konfiguraciji sa direktno spregnutim rezonatorima, pokazana je mogućnost realizacije kompleksnih struktura u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda.

5.2.4 Filtra petog reda propusnik opsega sa unakrsno spregnutim rezonatorima

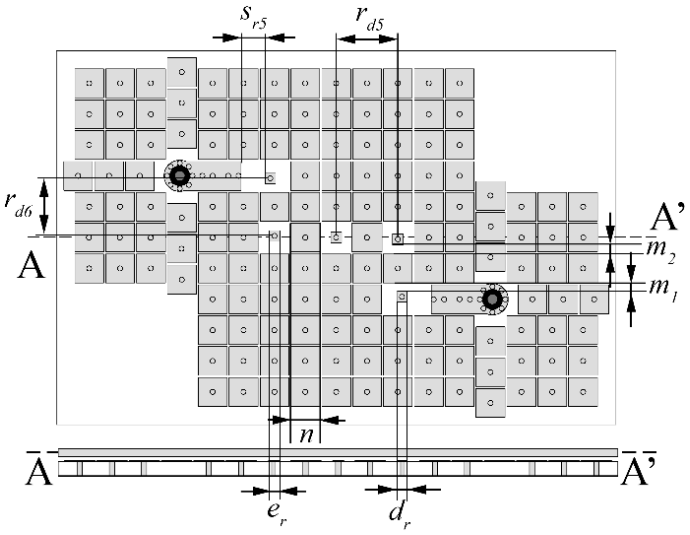
Radi dalje demonstracije potencijala mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, predložen je filtar petog reda sa unakrsnom spregom. Sprega između rezonatora i u ovom filtarskom rešenju izvršena je preko jediničnih ćelija. Takođe, pobuda rezonatora izvršena je pomoću uvodnih linija načinjenih od sekcije mikrostrip grebena, koaksijalne tranzicije i SMA konektora.

Projektovani model filtra petog reda i rezultati simulacija *S* parametara prikazani su na slici 5.10. Filtar sa unakrsno spregnutim rezonatorima, odlikuje se eliptičnim odzivom, uz transmisione nule na određenim učestanostima. Transmision nule daju strmije ivice propusnog opsega, a potiču od međusobnih sprega uvodnih linija i rezonatora, kao i samih rezonatora. Filtar je projektovan korišćenjem matrice sprege i optimizacijom modela kola [85], [86]. Šema matrica sprege predloženog filtra data je u prilogu slike 5.10(b).

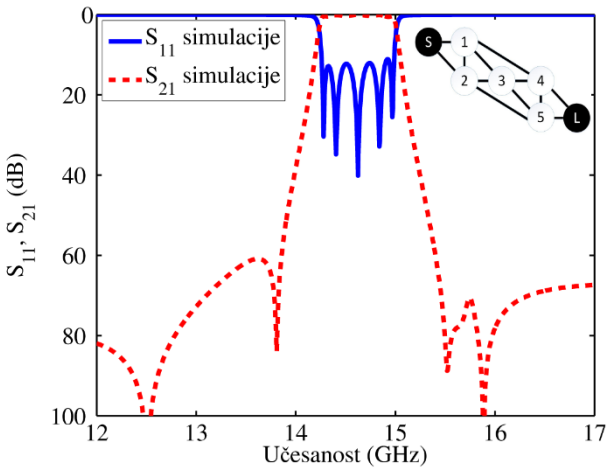
Filtar petog reda projektovan je na radnoj učestanosti od 14,63 GHz, sa četiri transmisione nule, relativnom širinom propusnog opsega od 5,2% i povratnim gubicima boljim od 12 dB. Optimizovani geometrijski parametri filtra petog reda su sledeći: rastojanje između trećeg i četvrtog, odnosno trećeg i drugog rezonatora r_{d5} = 7.5 mm, rastojanje između prvog i drugog, odnosno petog i četvrtog rezonatora r_{d6} = 7 mm, dimenzije prvog i petog rezonatora d_r = 1.25 mm, dimenzije drugog i četvrtog rezonatora e_r = 1.3 mm, rastojanje između uvodnih linija i rezonatora s_{r5} = 2.925 mm, udaljenost prvog rezonatora od prve jedinične ćelije m_1 = 1.075 mm, udaljenost drugog rezonatora od prve jedinične ćelije m_2 = 1.15 mm i širina druge jedinične ćelije preko koje se kontroliše sprega između rezonatora.

Normalizovana *N+2* x *N+2* matrica sprege predloženog filtra petog reda data je kao:

	S	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***L***
S	*0*	*0.8349*	*0.161*	*0*	*0*	*0*	*0*
1	*0.8349*	*-0.2274*	*0.703*	*-0.068*	*-0.033*	*0*	*0*
2	*0.161*	*0.703*	*0.2727*	*0.6039*	*0*	*-0.033*	*0*
3	*0*	*-0.068*	*0.6039*	*0.0874*	*0.6039*	*-0.068*	*0*
4	*0*	*-0.033*	*0*	*0.6039*	*0.293*	*0.703*	*0*
5	*0*	*0*	*-0.033*	*-0.068*	*0.703*	*-0.1799*	*0.161*
L	*0*	*0*	*0*	*0*	*0.161*	*0.8349*	*0.8349*



(a)



(b)

Slika 5.10 Filtar petog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) projektovan filtar, pogled od gore i poprečni presek A-A', b) simulirani S parametri, [84]

Složeni oblik matrice sprege potiče od specifične strukture mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, koja pored samih rezonatora uključuje i jedinične PMC ćelije, koje omogućuju dodatne sprege između ne susednih rezonatora, što je nekarakteristično kod filtara realizovanih konvencionalnim tehnologijama. Takođe, usled specifičnosti strukture mikrostrip grebenastog talasovoda, prva transmisiona nula u filtarskom odzivu potiče od sprege PMC jediničnih ćelija i sekcije mikrostrip grebena. Ostale tri transmisione nule potiču od šeme filtarske sprege.

Projektovanjem filtra petog reda, pokazano je da tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa nudi značajno kompleksnije filtarske topologije, gde unakrsna sprega rezonatora obezbeđuje formiranje transmisionih nula, čime je postignut eliptični odziv filtra. Kompleksnija topologija filtra petog reda zahteva veću površinu koji zauzima filtar, mada i pored toga zadržava uniformnost i ne narušava periodičnost okolne PMC strukture.

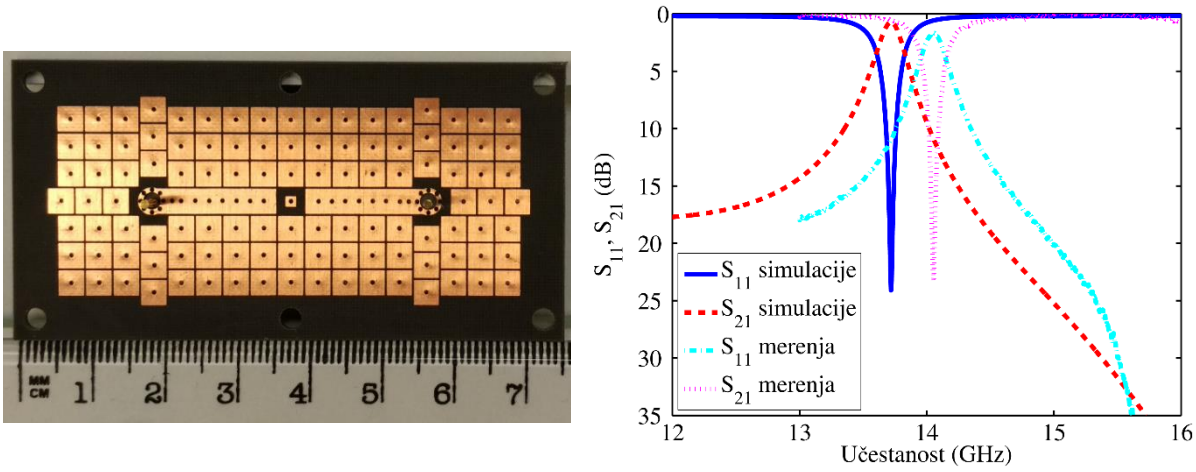
5.3 Fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara

Predloženi filtri projektovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovod na bazi procepa, fabrikovane su korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča, i realizovane na dielektričnoj podlozi *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2, dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009 i debljine t = 1,52 mm. Gornja provodna ploča, kod svih struktura, realizovana je od bakra debljine 0,8 mm.

Sklapanje fabrikovanih filtara izvršeno je korišćenjem najlonskih vijaka, podloški i navrtki. Spoljašnji deo SMA konektora zalemljen je za donji provodnik dielektrične podloge, dok je središnji vod SMA konektora, provučen kroz otvor u dielektričnoj podlozi i zalemljen za gornju bakarnu provodnu ploču.

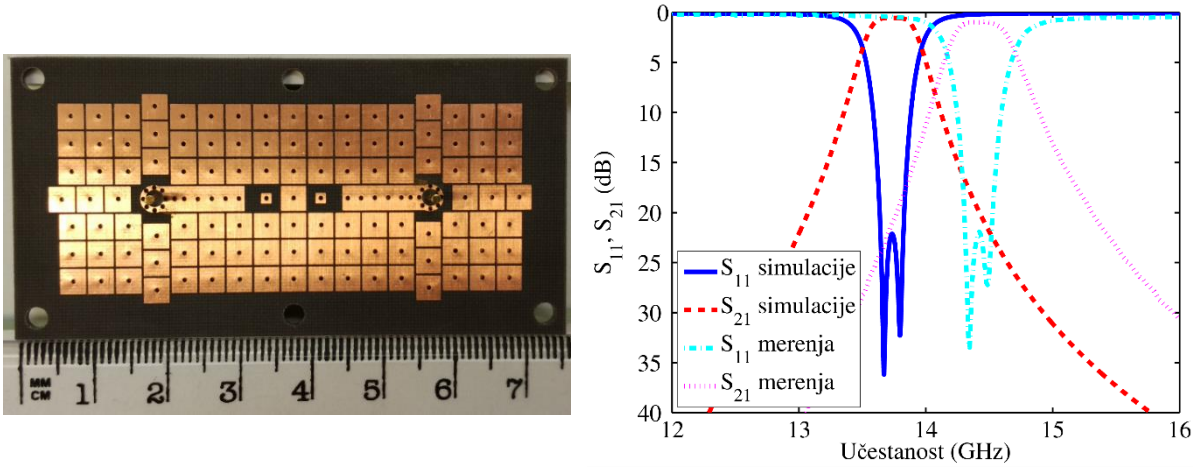
Rezultati merenja filtara dobijeni su korišćenjem vektorskog analizatora mreža, Agilent N5230A. Pre merenja izvršena je elektronska kalibracija vektorskog analizatora mreža, korišćenjem modula Keysight N4693A.

Na slici 5.11, prikazan je fabrikovan filtar prvog reda propusnik opsega zajedno sa poređenjem simuliranih i izmerenih *S* parametara odziva. Fabrikovani filtar prvog reda okarakterisan je unesenim slabljenjem od 1,65 dB, na centralnoj učestanosti od 14,05 GHz, koja je pomerena u odnosu na vrednost dobijenu simulacijama, za 2,35%, usled tolerancija fabrikacije, nesavršene montaže i stvarne vrednosti dielektrične konstante. Relativna širina propusnog opsega za filtar prvog reda iznosi 1,7%, što je identično simuliranim rezultatima.



(a) *(b)*

Slika 5.11 Filtar prvog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, [84]



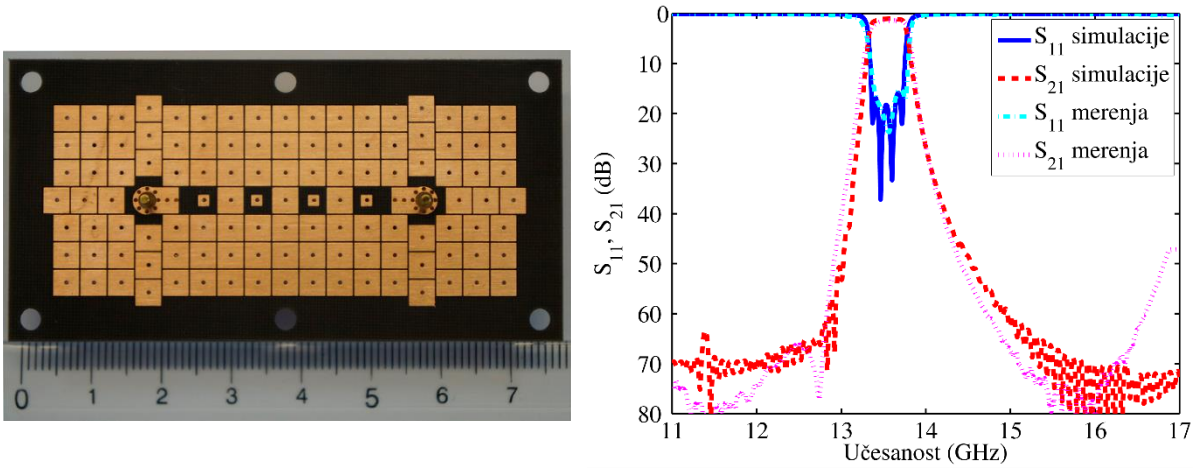
(a) *(b)*

Slika 5.12 Filtar drugog reda realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, [84]

Na slici 5.12 prikazana je fabrikacija filtra drugog reda i poređenje *S* parametara rezultata simulacija i merenja. Između rezultata simulacija i merenja postoji dobro slaganje, uz pomeraj centralne učestanosti merenja od 4,85%, usled tolerancija fabrikacije. Filtar propusnik opsega drugog reda okarakterisan je na centralnoj učestanosti od 14,43 GHz, relativnom širinom propusnog opsega od 3,7%, unesenim slabljenjem od 1,1 dB i izmerenim povratnim gubicima boljim od 23 dB. Ukupne dimenzije filtra sa uvodim linijama i okolnim PMC ćelijama iznose $3{,}18\lambda_0$ x $1{,}38\lambda_0$ na centralnoj učestanosti filtra, gde λ_0 predstavlja talasnu dužina u slobodnom prostoru.

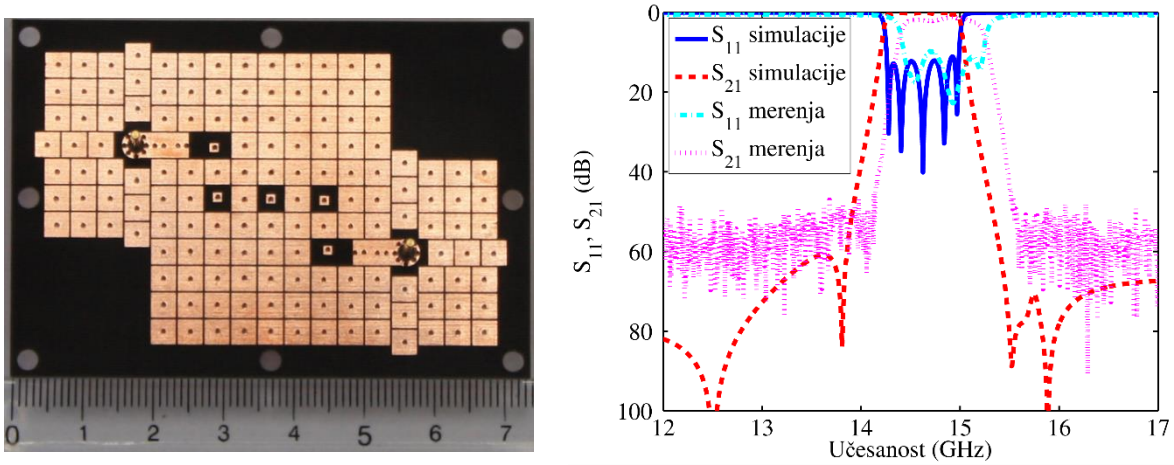
Na slici 5.13, prikazana je fabrikacija filtra propusnika opsega četvrtog reda, kao i poređenje rezultata simulacija i merenja *S* parametara. Između rezultata simulacija i merenja postoji odlično. Filtar četvrtog reda sa centralnom učestanosti od 13,57 GHz, okarakterisan je relativnom širinom propusnog opsega od 3,76%, sa odličnim unesenim slabljenjem od 1,41 dB i povratnim gubicima boljim od 15 dB. Filtar pokazuje odličnu selektivnost ispod 60 dB, izvan propusnog opsega.

Ukupne dimenzije filtra četvrtog reda iste su kao ukupne dimenzije filtra drugog reda, $3{,}18\lambda_0$ x $1{,}38\lambda_0$, pošto su ukupne dimenzije filtara uzete zajedno sa uvodnim linijama i okolnim PMC ćelijama. Kada bi posmatrali samo efektivnu površinu koju zauzimaju rezonatori, tada bi dimenzije filtra drugog i četvrtog reda bile $0{,}65\lambda_0$ x $1{,}38\lambda_0$ i $1{,}4\lambda_0$ x $1{,}38\lambda_0$, respektivno.



(a) *(b)*

Slika 5.13 Filtar četvrtog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, [84]



(a) *(b)*

Slika 5.14 Filtar petog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) fabrikacija, pogled od gore bez gornjeg provodnika, b) poređenje simuliranih i izmerenih S parametara, [84]

Na slici 5.14, prikazana je fabrikacija filtra propusnika opsega petog reda, zajedno sa poređenjem rezultata simulacija i merenja *S* parametara. Simulirani i izmereni rezultati za filtar petog reda propusnika opsega, koji je realizovan unakrsno spregnutim rezonatorima, prikazuje zadovoljavajuće slaganje, uz pomeraj izmerene učestanosti od 1,23%. Izmerena učestanost je pomerena usled nesavršenosti montaže kola i usled razlike između realne i simulirane vrednosti dielektrične konstante podloge. Filtar sa centralnom učestanosti od 14,8 GHz, okarakterisan je relativnom širinom propusnog opsega od 5,5%, unesenim slabljenjem od 1,35 dB i povratnim gubicima boljim od 10 dB. Ukupne dimenzije filtra na centralnoj učestanosti iznose $3{,}29\lambda_0$ x $2{,}16\lambda_0$.

5.4 Poređenje sa drugim filtrima fabrikovanim u tehnologiji talasovoda na bazi procepa

Predloženi filtri drugog, četvrtog i petog reda upoređeni su sa publikovanim filtrima iz literature, filtrima zasnovanim na: grebenastim talasovodima na bazi procepa [7], [8], talasovodima na bazi procepa sa kanalom [48], [64], [65], [67]–[71] i mikrostrip talasovodima na bazi procepa [72]–[74]. Osnovne karakteristike filtara objedinjene su u tabeli 5.2. U tabeli 5.2, predstavljeni su parametri centralne učestanosti f_c, reda filtra, relativna širina propusnog opsega, uneseno slabljenje i povratni gubici unutar propusnog opsega, tip rezultata i dimenzije filtra izražene u λ_0x λ_0. Pošto u pojedinim radovima iz literature, autori nisu naveli sve relevantne karakteristike predloženih filtara, iste su dobijene iz dostupnih rezultata merenja ili simulacija.

TABELA 5.2 POREĐENJE KARAKTERISTIKA PREDLOŽENIH FILTARA I OSTALIH PUBLIKOVANIH FILTARSKIH REŠENJA U TEHNOLOGIJI TALASOVODA NA BAZI PROCEPA

Lit.	***Centralna učestanost [GHz]***	***Red filtra***	***Relativni opseg [%]***	***Uneseno slabljenje [dB]***	***Povratni gubici [dB]***	***Tip rezultata***	***Dimenzije filtra [λ_0 x λ_0]***	***Talasovod na bazi procepa***
[64]	35	3	3	1	12	Merenja	1,7 x 1,55	***Greben***
[62]	42	3	1,1	0,7	12	Simulacije	2,52 x 1,83	
[48]	11,59	4	0,62	1	10	Merenja	14,91 x 4,1	***Kanal***
[69]	59,7	5	1,34	1,7	9	Merenja	19,72 x 5,8	
[71]	30,025	5	1,03	1,4	16	Simulacije	4,7 x 1,5	
[70]	14	4	2,85	1	17	Merenja	4,85 x 1,77	
[64]	35	3	1	1	9	Merenja	2,1 x 1,9	
[65]	13,95	3	1	1	20	Merenja	3,2 x 1,1	
[65]	13,95	5	1	1	11	Merenja	5,16 x 1,1	
[68]	39,6	4	2,5	1,1	19	Merenja	3,17 x 0,86	
[67]	61	5	1	1	13	Merenja	4,53 x 1,24	
[72]	30,75	5	4,55	2,3	11	Merenja	3,32 x 1,29	***Mikrostrip***
[73]	62,5	4	3,4	3	12,5	Merenje	22,73 x 1,3	
[74]	31	4	3	2,3	6	Merenja	0,7 x 0,7	
[84]	***14,43***	***2***	***3,7***	***1,1***	***20***	***Merenja***	***3,18 x 1,38***	
[84]	***13,57***	***4***	***3,76***	***1,41***	***15,1***	***Merenja***	***3,18 x 1,38***	
[84]	***14,8***	***5***	***5,5***	***1,35***	***10***	***Merenje***	***3,29 x 2,16***	

Predloženi filtri imaju uporedive karakteristike unutar propusnog opsega sa ostalim predloženim filtarskim rešenjima i jedni su od kompaktnijih filtara predloženih u literaturi. Međutim, filtri predloženi

u [64] i [74] nude manje ukupne dimenzije, ali treba uzeti u obzir da su oni realizovani slaganjem rezonatora jedan na drugi ili koriste dodatne dielektrične i provodne slojeve, na osnovu čega zahtevaju višeslojnu fabrikaciju.

Takođe, filtri predloženi u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa [64], [62] i talasovoda na bazi procepa sa kanalom [48], [64], [65], [67]–[71], zahtevaju složenije procese fabrikacije u odnosu na tehnologiju mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Dodatno, predloženi filtri iz ove disertacije nude veće širine relativnih opsega učestanosti.

Kada se predloženi filtri iz ove disertacije, uporede sa publikovanim filtrima realizovanim u tehnologiji mikrostrip talasovoda na bazi procepa, svodi se zaključak da predloženi filtri poseduju mnogo bolje karakteristike unutar propusnog opsega. Naime, filtar predložen u [72] jeste kompaktniji od predloženog filtra petog reda, međutim predloženi filtar petog reda nudi manje uneseno slabljenje i lošije performanse unutar propusnog opsega. Filtri četvrtog reda iz [73] i [74], za razliku od predloženih filtara, zahtevaju kompleksnije tehnike fabrikacije usled dodatnih dielektričnih slojeva, odnosno složenosti koje sa sobom nosi tehnologija invertovanog mikrostrip talasovoda.

5.5 Zaključak

U ovoj glavi predstavljen je glavni doprinos ove doktorske disertacije, [84]. Naime, projektovani su propusnici opsega učestanosti prvog, drugog, četvrtog i petog reda u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, zasnovane na sprezi predloženih rezonatora.

Predloženi rezonator projektovan je kao modifikovana jedinična ćelija uzemljenog peč rezonatora, unutar PMC površine, dobijena smanjivanjem dimenzija samo jednog peč rezonatora, čime je ostvaren rezonantni efekat između paralelnih ploča, PEC-PMC. Rezonator je projektovan da ne zahteva preraspodelu jediničnih ćelija okolne PMC površine, čime zadržava kompaktne dimenzije. Predloženi rezonator upoređen je sa topologijama peč rezonatora, sličnih dimenzija, realizovanim u tehnologijama mikrostrip voda i talasovoda integrisanih u podlogu. Sa stanovišta gubitaka, predložen rezonator pokazuje bolje performanse.

Prvi projektovani filtar poslužilo je kao koncept, kojim je dokazana mogućnost realizacije filtarskih rešenja korišćenjem predloženog rezonatora.

Predstavljen drugi filtar propusnik opsega drugog reda kod kojeg je prvi put demonstrirana sprega između dve predložena rezonatora, uključuje jednu jediničnu ćeliju PMC površine, postavljenu između rezonatora, čime su postignuti odgovarajući nivoi sprege. Filtar je projektovan korišćenjem standardne filtarske tehnike, koeficijenta sprege i spoljašnjeg faktora dobrote. Predloženi filtar drugog reda pokazao je dobre performanse i potvrdio je potencijal projektovanja složenijih filtarskih realizacija.

Treći filtar realizovan kao propusnika opsega četvrtog reda sa direktno spregnutim rezonatorima u linijskoj konfiguraciji. Za projektovanje filtra iskorišćena je optimizacija bazirana na standardnom modelu kola za direktno spregnute filtarske topologije. Ovo je poslednji projektovani filtar sa direktno spregnutim rezonatorima, i predstavlja najsloženiji filtar u linijskoj konfiguraciji. Predloženi filtar četvrtog reda pokazao je dobre performanse.

Četvrti filtar realizovan kao propusnik opsega petog reda sa unakrsno spregnutim rezonatorima, predstavlja najsloženiji filtar zasnovan na predloženom rezonatoru. Filtar je projektovan korišćenjem matrice sprege i optimizacijom modela kola. Takođe, filtar je okarakterisan eliptičnim odzivom, sa četiri transmisione nule, koje potiču od sprega između rezonatora i uvodnih linija, kao i od međusobnih sprega rezonatora. Predloženi filtar petog reda potvrdio je mogućnost projektovanja veoma složenih filtarskih rešenja odličnih performansi.

Sve predložene filtarske topologije su fabrikovane i izmereni rezultati pokazali su dobro slaganje sa rezultatima simulacija. U pojedinim slučajevima, za filtar prvog, drugo i petog reda, imamo pomeranje izmerene učestanosti u odnosu na simuliranu vrednost, što pripisujemo ne idealnoj montaži filtara i različitoj izmerenoj i simuliranoj vrednosti dielektrične konstante podloge.

Predloženi filtri [84], upoređeni su sa publikovanim filtarskim rešenjima iz literature, realizovanim u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Predloženi filtri imaju uporedive karakteristike unutar propusnog opsega u odnosu na filtre iz literature. U poređenju sa filtarskim rešenjima realizovanim u

tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, predloženi filtri nude jednostavniji proces izrade i bolje performanse, uz nešto veće ukupne dimenzije.

Predložena filtarska rešenja iz ove glave [84] publikovani su u časopisu *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, sa *Impact Factor*-om 2.897 (2016).

Glava 6. Filtri realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti

U prethodnoj glavi, prikazane su mogućnosti tehnologije mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa za realizaciju filtara realizovanim pomoću direktno i unakrsno spregnutih rezonantnih šupljina, [84]. Oblast u kojoj prednost tehnologije mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa posebno može doći do izražaja jeste milimetarski opseg učestanosti. Naime, u milimetarskom i pod-milimetarskom opsegu učestanosti, kada postoji potreba za linearnim kolima sa malim šumom i malim gubicima snage, uvek je prednost na strani pasivnih kola u odnosu na aktivna. Pasivna kola se uobičajeno realizuju u tehnologijama konvencionalnih talasovoda ili planarnim konfiguracijama, [87]. Tehnologija talasovoda rezultuje velikim fizičkim dimenzijama čime se utiče na konačne dimenzije kola, dok planarne realizacije usled korišćenja dielektričnih podloga unose dodatne gubitke.

Dielektrične podloge koje se koriste kod planarnih kola na nižim učestanostima ispod 10 GHz, ne mogu se efektivno iskoristiti u projektovanju milimetarski kola usled velikih dielektričnih gubitaka. Sa druge strane, tehnologije kao što su komplementarna metal-oksid poluprovodnička tehnologija (engl. *Complementary Metal-Oxide-Semiconductors* - CMOS), silicijum-germanijum tehnologija (engl. *Silicon-Germanium* - Si-Ge), tehnologija silicijum mikro-elektro-mehaničkih sistema (engl. *Silicon Microelectromechanical Systems* - Si-MEMS) i tehnologija standardnih štampanih ploča u silicijumu (engl. *Silicon Printed Circuit Boards* - Si-PCB) uobičajeno se koriste iznad učestanosti od 30 GHz, i takođe ne mogu da pruže male gubitke na učestanostima u milimetarskom opsegu.

Rešenje može da ponudi tehnologija talasovoda na bazi procepa, pošto može da reši zahteve za malim veličinama, kompatibilnoj integraciji, smanjenim gubicima i jeftinoj izradi. Pošto su mikrostrip grebenasti talasovodi na bazi procepa zasnovani na dielektričnim podlogama, oni mogu da ponude kompatibilnu integraciju i jeftinu izradu korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča, PCB. Takođe, pošto se talas kod mikrostrip grebenastih talasovoda prostire u prostoru između paralelnih ploča, prateći talasovodni element, većina elektromagnetske energije je zadržana u vazdušnom procepu, pa shodno tome dielektrični gubici su značajno smanjeni, čak i na učestanostima milimetarskog opsega. Dodatno, talasovodi na bazi procepa sa otvorenim bočnim zidovima omogućuju bolje hlađenje kola i dobro upravljanje snagom.

Navedena prednost i raznolikost filtara projektovanih i fabrikovanih u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, data je u prethodnim glavama ove disertacije. Međutim, svi predstavljeni filtari zasnovani su na singl-mod rezonatorima, koji obezbeđuju filtarske odzive spregom dva ili više rezonatora. Kako bi se smanjio broj rezonatora potreban da se ostvari filtarski odziv, može se iskoristiti dobro poznat i ustanovljen pristup projektovanju filtara korišćenjem dual-mod rezonatora, [88]–[91]. Degenerativni

modovi dual-mod rezonatora mogu biti spregnuti pomoću perturbacija, čim se smanjuje broj potrebnih rezonatora sa faktorom dva.

U ovoj glavi biće predstavljeni novi filtri namenjeni za rad u milimetarskom opsegu učestanosti. Filtri su realizovani pomoću dual-mod rezonatora projektovanim u tehnologiji mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa. Predloženi dual-mod rezonator realizovan je kao uvećani kvadratni peč unutar PMC površine. Po svojoj prirodi, dual-mod rezonatori ispoljavaju degenerativno ponašanje rezonantnih modova. Unošenjem perturbacije u dual-mod rezonator dva osnovna ortogonalna degenerativna moda rezonatora se razdvajaju u spektru, čime je omogućena realizacija filtara sa dva pola.

U prvom delu ove glave biće predstavljeni osnovni gradivni elementi talasovoda na bazi procepa; jedinične ćelije i super ćelije talasovoda. Osnovni gradivni elementi projektovani su za milimetarski opseg učestanosti. Takođe, u prvom delu biće predstavljen princip projektovanja super ćelije dual-mod rezonator za milimetarski opseg učestanosti.

Projektovanje i fabrikacija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa za rad na milimetarskom opsegu učestanosti, [92], biće predstavljeno u drugom delu ove glave. Sekcije mikrostrip grebenastog talasovoda, zajedno sa tranzicijama i konektorom, biće iskorišćene za pobudu predloženih rezonatora. Takođe, u ovom delu biće predstavljena modifikacija vertikalne tranzicije, iz glave tri, za rad u milimetarskom opsegu učestanosti.

Projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti, biće predstavljeno u trećem delu ove glave. Korišćenjem predloženih rezonatora projektovani su filtar sa dva pola i filtar sa četiri pola. Filtar sa dva pola koristi jedan dual-mod rezonator, dok filtar sa četiri pola koristi dva spregnuta dual-mod rezonatora.

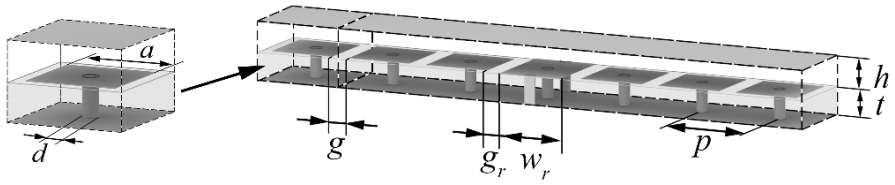
U četvrtom delu ove glave biće predstavljena fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara sa dual-mod rezonatorima.

6.1 Projektovanje gradivnih elemenata

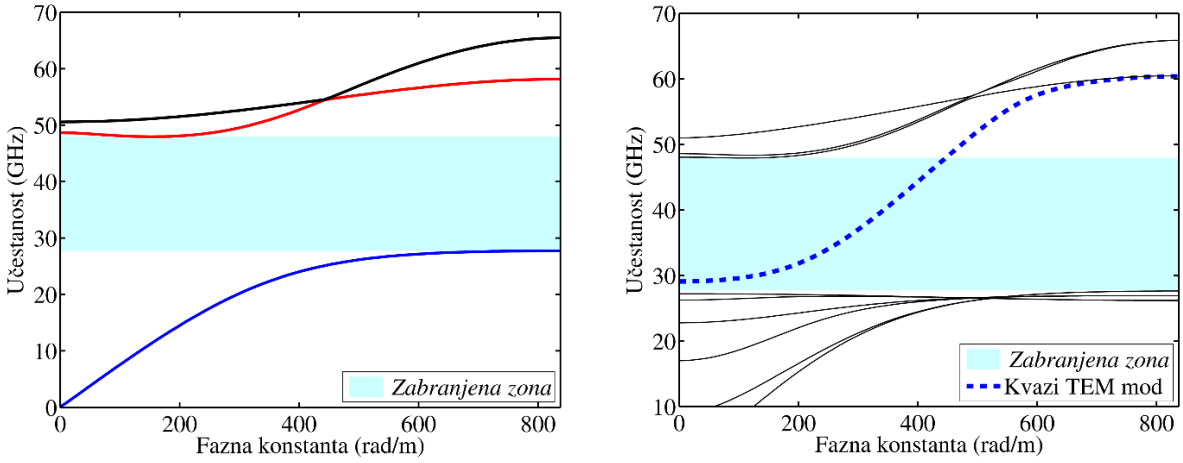
U inicijalnim koracima projektovanja talasovoda na bazi procepa koriste se osnovni gradivni elementi, jedinična ćelija i super ćelija talasovoda. Izgled osnovnih gradivnih elemenata mikrostrip talasovoda na bazi procepa, zajedno sa kritičnim geometrijskim parametrima prikazan je na slici 6.1. Detaljno projektovanje osnovnih gradivnih elemenata dato je u 4.1, pa prema tome detaljna analiza projektovanja neće biti razmatrana u ovoj glavi.

Prilikom projektovanja gradivnih elemenata mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa iskorišćena je dielektrična podloga *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2 i tangens ugla gubitaka $tan\delta$ = 0,0009.

Kao što je navedeno u glavi 4.1, za projektovanje i analizu geometrijskih parametara osnovnih gradivnih elemenata iskorišćen je softverskog alata *CST Microwave Studio, Eigenmode Solver*, [28]. Za svaki gradivni element pre analize definisani su granični uslovi. Optimizacijom geometrijskih parametara osnovnih gradivnih elemenata dobijeni su disperzioni dijagrami opsega učestanosti zabranjene zone i moda prostiranja unutar zabranjene zone, prikazani na slici 6.2. Disperzioni dijagrami osnovnih gradivnih elemenata, dobijeni su za sledeće optimizovane vrednosti geometrijskih parametara: visina vazdušnog procepa h = 0.51 mm, perioda jedinične ćelije p = 1.7 mm, dimenzija uzemljenog kvadratnog peča a = 1.5 mm, prečnik vije d = 0.4 mm, širina mikrostrip grebena w_r = 1.5 mm i razmaka između grebena i prve ćelije PMC površine, g_r = 0.2 mm.



Slika 6.1 Jedinična ćelija i super ćelija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa sa kritičnim geometrijskim parametrima



(a) *(b)*

Slika 6.2 Disperzioni dijagrami osnovnih gradivnih elemenata za optimizovane vrednosti geometrijskih parametara: a) jedinične ćelije, b) super ćelije talasovoda

Optimizacijom geometrijskih parametara jedinične ćelije dobijen je opseg učestanosti zabranjene zone od 27,7 do 48 GHz. Projektovani opseg učestanosti zabranjene zone, predstavljen plavom oblasti na disperzionim dijagramima, zadovoljava uslove za projektovanje filtara u milimetarskom opsegu učestanosti.

Učestanost odsecanja moda koji se prostire unutar zabranjene zone, prikazan na disperzionom dijagramu super ćelije talasovoda plavom isprekidanom linijom, slika 6.2(b), dobijena je optimizacijom geometrijskih parametara super ćelije talasovoda; širine mikrostrip grebena w_r, i rastojanja između mikrostrip grebena i prvog reda jediničnih ćelija g_r. Dominantni mod koji se prostire unutar zabranjene zone je kvazi-TEM. Modovi izvan opsega zabranjene zone nisu od interesa u daljem istraživanju.

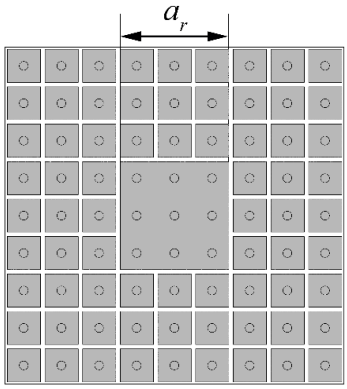
6.1.1 Projektovanje super ćelije dual-mod rezonatora

Korak koji sledi nakon projektovanja jedinične ćelije i super ćelije talasovoda, jeste projektovanje super ćelije rezonatora koji će dati dual-mod odziv. Uobičajeni načini realizacije rezonatora u tehnologiji talasovoda na bazi procepa jeste uklanjanjem, zamenjivanjem ili modifikacijom jedne ili više jediničnih ćelija PMC površine.

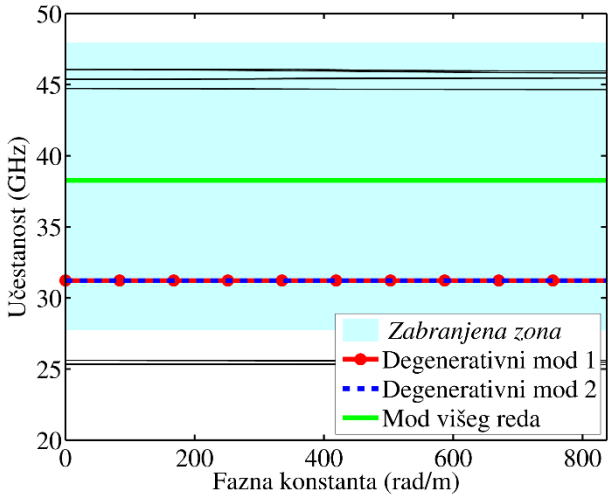
Super ćelija dual-mod rezonatora, prikazana je na slici 6.3, [92]. Dual-mod rezonator realizovan je ostvarivanjem provodnog kontakta između susednih jediničnih ćelija čime je dobijen jedan kvadratni uzemljeni peč koji zauzima površinu od 3x3 jedinične ćelije. Za njeno formiranje nije potrebno preuređivanje okolne PMC površine, stoga ovakav pristup projektovanja rezonatora pruža fleksibilnost, pri čemu se zadržava inicijalna pozicija i periodičnost vija.

Radi jednostavnosti, super ćelija dual-mod rezonatora na slici 6.3, prikazana je sa pogledom od gore, bez gornje PEC površine.

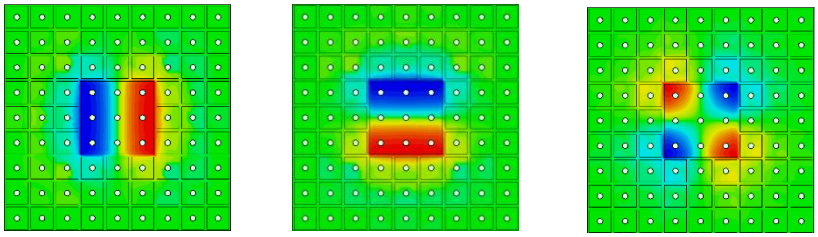
Na slici 6.4, prikazan je disperzioni dijagram super ćelije dual-mod rezonatora dobijen *Eigenmode* analizom, za dimenzije kvadratnog peča od a_r = 4,9 mm. Na disperzionom dijagramu, crvenom linijom sa kružićima i isprekidanom plavom linijom prikazani su osnovni rezonantni modovi predloženog dual-mod rezonatora na učestanosti od 31,2 GHz. Rezonantni mod prikazan zelenom linijom predstavlja mod višeg reda predloženog rezonatora na učestanosti od 38,3 GHz.



Slika 6.3 Super ćelija predloženog dual-mod rezonatora, [92]



Slika 6.4 Disperzioni dijagram super ćelije dual-mod rezonatora, [92]



(a) *(b)* *(c)*

Slika 6.5 Raspodela električnog polja super ćelija dual-mod rezonatora: a) degenerativni mod TM_{10}, b) degenerativni mod TM_{01}, c) mod višeg reda TM_{11}, [92]

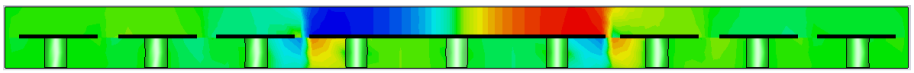
Kako bi potvrdili da se radi o dual-mod ponašanju rezonatora na učestanosti od 31,2 GHz, na slici 6.5, prikazana je raspodela električnog polja dual-mod rezonatora, u vazdušnom procepu, za sva tri relevantna moda sa slike 6.4.

Modovi prikazani na slici 6.5(a) i 6.5(b), predstavljaju međusobno ortogonalne modove na istoj učestanosti, koji odgovaraju osnovnim degenerativnim modovima TM_{10} i TM_{01}, [85]. Na slici 6.5(c), prikazan je mod višeg reda TM_{11}, koji nije od interesa tokom daljeg istraživanja jer su za potrebe projektovanja filtara zasnovanih na dual-mod rezonatorima dovoljni degenerativni modovi. Takođe, modovi koji se pojavljuju ispod zabranjene zone i iznad 45 GHz, nisu od interesa, pošto potiču od rezonantne prirode topologije super ćelije.

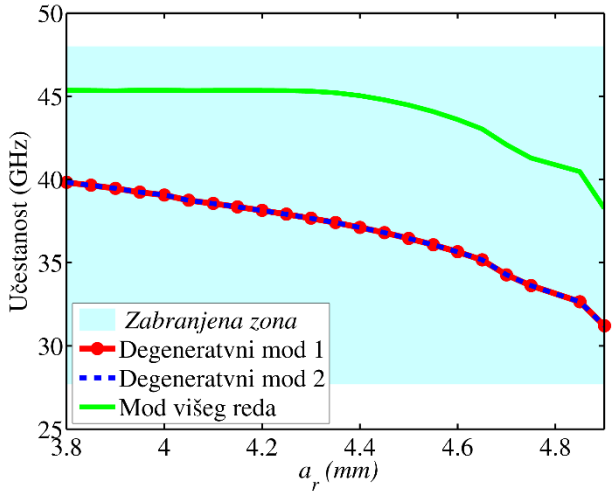
Na slici 6.6, prikazana je raspodela električnog polja jednog od osnovnih modova rezonatora, na poprečnom preseku super ćelije dual-mod rezonatora. Kao što se može primetiti, grupa vija iskorišćene za uzemljenje peč rezonatora koji se sastoji iz 3x3 jedinične ćelije, ograničava većinu električnog polja na oblasti između rezonatora i gornje PEC ploče, dok samo neznatna količina polja „curi“ u dielektrik na krajevima peča. Ovaj fenomen omogućava da gubici budu mali, pošto se prostiranje moda mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa odvija između grebena i gornje PEC površine.

Promenom veličine peč rezonatora, tj. geometrijskog parametra a_r, od 3,8 do 4,9 mm, pri čemu se ne utiče na pomeranje vija ispod peč rezonatora i promene njihove periodičnosti, rezonantna učestanost

degenerativnih modova može se menjati od 31,2 do 39,8 GHz. Dobijeni opseg učestanosti pokriva 43% opsega učestanosti projektovane zabranjene zone. Na slici 6.7, prikazana je zavisnost rezonantne učestanosti od geometrijskog parametra a_r.



Slika 6.6 Raspodela električnog polja osnovnog moda u poprečnom preseku dual-mod rezonatora, [92]



Slika 6.7 Zavisnost rezonantne učestanosti degenerativnih modova od geometrijskog parametra a_r, [92]

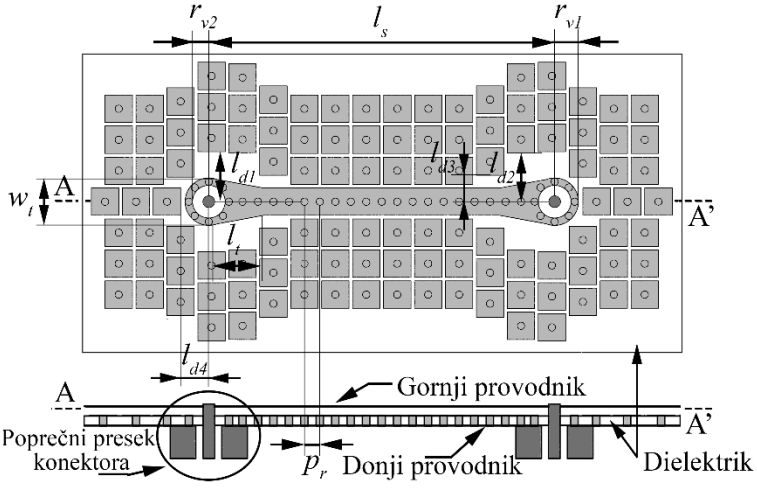
6.2 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti

Korak koji prethodi projektovanju filtara, jeste projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Cilj projektovanja mikrostrip grebenastog talasovoda je da se obezbede odgovarajuće uvodne linije za pobudu rezonatora, koje će osigurati male gubitke, odlično prilagođenje impedanse iskorišćene tranzicije i obezbediti odgovarajuću širinu radnog opsega učestanosti filtra.

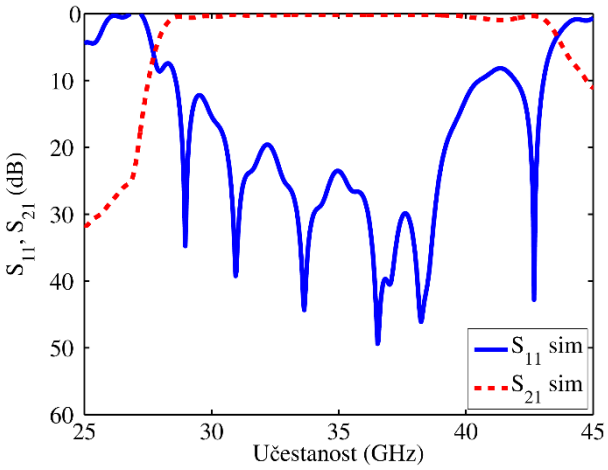
Projektovani mikrostrip grebenasti talasovod prikazan je na slici 6.8, [92]. Mikrostrip greben realizovan je korišćenjem uzemljene mikrostrip linije, sa vijama na rastojanju od $p_r = p = 0{,}85$ mm. Ovako raspoređene vije pružaju efektivno ponašanje grebena, koje ne zahteva gusto pakovanje vija.

Za pobudu kvazi-TEM moda mikrostrip grebena iskorišćena je modifikacija predložene vertikalne koaksijalne tranzicije iz četvrte glave, čime je omogućen odlično prilagođenje impedanse u širokom opsegu učestanosti i jednostavna implementaciju u topologiju mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. U tranziciji je korišćen konektor 2.92 mm, pošto SMA konektor nije predviđen za korišćenje na učestanostima iznad 18 GHz.

Modifikovana tranzicija koristi manje otvore kroz dielektričnu podlogu, kroz koje prolazi središnji vod 2.92 mm konektora. Prečnik otvora jednak je prečniku središnjeg voda iskorišćenog konektora. Takođe, sastavni deo tranzicije predstavljaju i sužene linije (engl. *Tapered lines*), postavljene između metalnog prstena na koji se oslanjaju vije koaksijalne tranzicije i mikrostrip grebena. Dimenzije suženih linija predstavljene su na slici 6.8, geometrijskim parametrima w_t *i* l_t. Središnji vod 2.92 mm konektora i kružno raspoređene vije, grade koaksijalni vod kroz dielektričnu podlogu.



Slika 6.8 Projektovani mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek, [92]



Slika 6.9 Simulirani S parametri projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu

Sledeći geometrijski parametri su optimizovani kako bi se postigla odgovarajuća sprega i nivoi prilagođenja impedanse između 2.92 mm konektora i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, u što širem opsegu učestanosti zabranjene zone: spoljašnji prečnik metalnog prstena r_{v1} = 1,3 mm, unutrašnji prečnik metalnog prstena r_{v2} = 0,85 mm, širina sužene linije w_t = 2,6 mm, dužina sužene linije l_t = 3 mm, udaljenost između središnjih vodova konektora i okolnih jediničnih ćelija l_{d1} = 2,75 mm, l_{d2} = 2,65 mm, l_{d3} = 1,45 mm i l_{d4} = 1,55 mm. Model konektora je delimično projektovan i iskorišćen prilikom procesa simulacije, kako bi se njegov uticaj uključio u krajnji odziv mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Na slici 6.9, prikazan je odziv projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, za navedene optimizovane parametre.

Projektovana tranzicija pokriva opseg učestanosti zabranjene zone od 48%, od 29,8 do 39,5 GHz, sa unesenim slabljenjem boljim od 15 dB i povratnim gubicima boljim od 0,35 dB. Predložena tranzicija predstavlja jednu od najboljih rezultata predloženih u literaturi, po kriterijumu unesenog slabljenja boljeg od 15 dB. Takođe, tranzicija omogućava zadovoljavajuće prilagođenje impedanse za projektovanje filtara u milimetarskom opsegu učestanosti.

6.2.1 Fabrikacija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa i rezultati merenja

Projektovani mikrostrip grebenast talasovod na bazi procepa fabrikovan je korišćenjem dielektričnog materijala *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2, dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009 i debljine t = 0,51 mm, korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča. Gornji provodnik fabrikovan je od bakarne ploče debljine 0,8 mm.

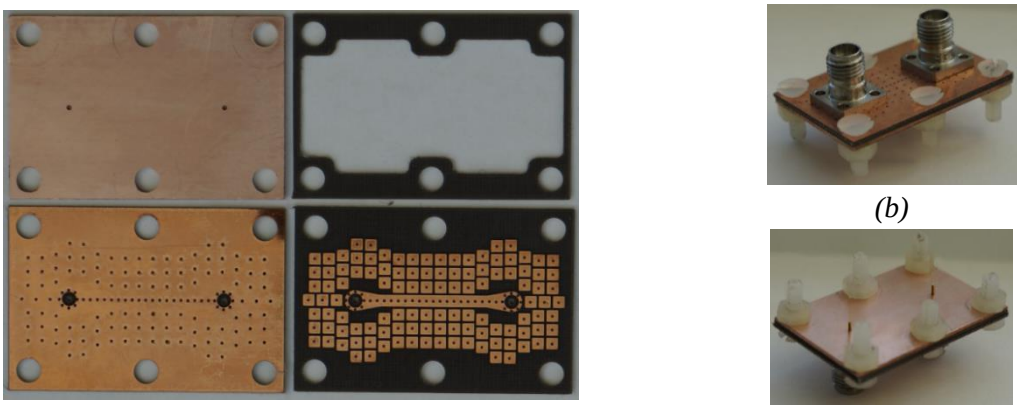
Na slici 6.10, prikazani su delovi fabrikovanog talasovoda na bazi procepa i izgled sastavljene fabrikovane strukture. Radi lakše montaže i poravnavanja gornjeg i donjeg dela talasovoda, iskorišćeno je šest otvora, u dielektričnoj podlozi i gornjem provodniku, slika 6.10(a). Otvori su korišćeni za sastavljanje talasovoda korišćenjem najlonskih vijaka i navrtki. Kako bi se održalo konstantno rastojanje između gornjeg i donjeg dela talasovoda napravljen je ram, od istog dielektričnog materijala

i iste debljine kao donji deo talasovoda, h = 0,51 mm. Ram je takođe realizovan sa otvorima, kao i sa uklonjenim metalizacijama, kako ne bi uticale na konačan odziv talasovoda.

Konektori 2.92 mm, postavljeni su spoljašnjim delom na donju provodnu stranu talasovoda, slika 6.10(b), dok je središnji vod, provučen kroz otvor u dielektričnoj podlozi i spojen sa gornjim provodnikom, slika 6.10(c).

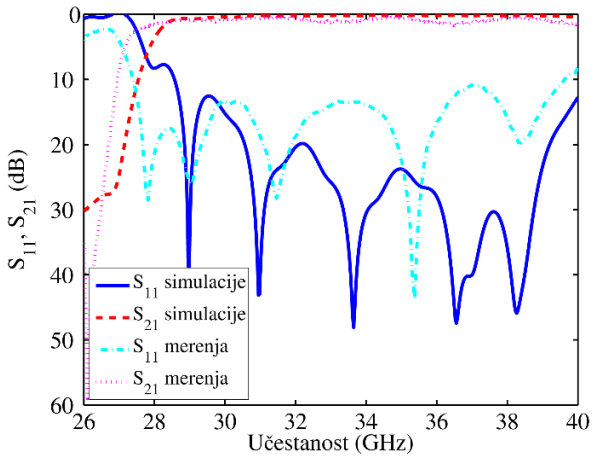
Merenja su izvršena korišćenjem vektorskog analizatora mreža Agilent N5230A, do 40 GHz, što predstavlja maksimalnu predviđenu učestanost na kojoj mogu da se koriste 2.92 mm konektori. Dobijeno je dobro slaganje između simuliranih i izmerenih *S* parametara, prikazano na slici 6.11. Mali pomeraj u učestanosti i neznatno povećani gubici, mogu da se pripišu realnoj i simuliranoj vrednosti dielektrične konstante podloge, ne uniformnoj debljini podloge i ne idealnoj montaži.

Fabrikovani mikrostrip grebenasti talasovod pokazuje dobre performanse u opsegu učestanosti od 27,5 do 36,5 GHz, sa unesenim slabljenjem boljim od 1,2 dB i povratnim gubicima boljim od 13 dB. Ovako projektovani talasovod na bazi procepa može se primeniti u filtrima za pobudu predloženih rezonatora.



(a) *(b)* *(c)*

Slika 6.10 Fabrikovani mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na sastavljeni talasovod sa donje strane sa 2.92 konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92]



Slika 6.11 Poređenje simuliranih i izmerenih odziva S parametra mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92]

6.3 Projektovanje filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u milimetarskom opsegu učestanosti

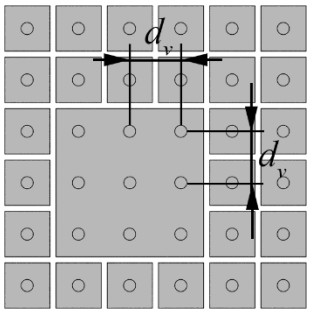
Projektovani filtri zasnovani su na predloženim dual-mod rezonatorima, koji su pobuđeni korišćenjem uvodnih linija projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Naime, projektovana su dva filtra, sa dva i sa četiri pola.

Filtarski odzivi u oba slučaja realizovani su unošenjem perturbacije u strukturu dual-mod rezonatora. Za razliku od uobičajenih metoda implementacije perturbacija, kao što su uvođenje poremećaja u metalni peč njegovim skraćivanjem u uglovima, u datom slučaju iskorišćena je drugačija vrsta perturbacije. Naime, da bi se iskoristila priroda dualnog moda, odnosno kako bi se razdvojile dve degenerativne učestanosti u spektru, iskorišćeno je pomeranje samo jedne vije u uglu rezonatora, promenom parametra d_v, kao što je prikazano na slici 6.12. Pomeraj vije utiče na mali deo elektromagnetskog polja koje curi u dielektrični materijal, kao što je prikazano na slici 6.6. To je vrlo malo curenje u poređenju sa poljem koncentrisano između metalnih ploča, ali značajno pošto može da izazove odgovarajuće promene.

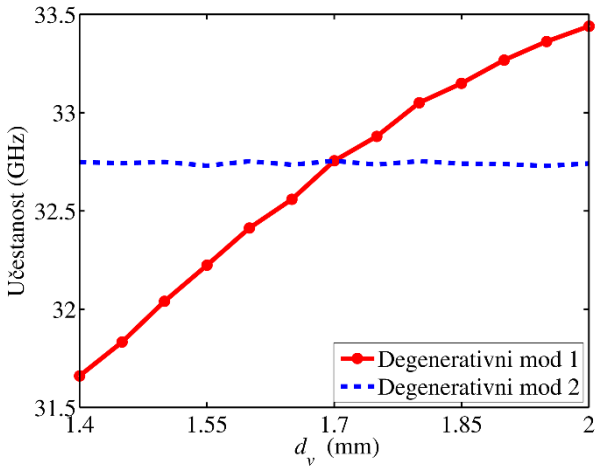
Prema tome, pomeranjem pozicije vija u uglovima peča, odnosno promenom parametra d_v, može se uticati na raspodelu polja degenerativnih modova. Pošto se vrši asimetrično pomeranje samo jedne vije, ne utiče se podjednako na oba degenerativna moda. Naime, uticaj pomeranja jedne vije ne utiče isto na raspodelu električnog polja oba degenerativna moda, odnosno na raspodelu polja na stranama rezonatora, pošto su modovi ortogonalni jedan na drugi. Usled ovakve perturbacije, degenerativni modovi se razdvajaju u spektru.

Na slici 6.13, prikazana je promena rezonantne učestanosti degenerativnih modova sa promenom geometrijskog parametrom d_v. Kao što se može videti, pomeranje vije promenom parametra d_v, jedan od osnovnih modova značajno menja učestanost, dok drugi mod ostaje u okolini osnovne učestanosti.

Potrebno je napomenuti da se vija pomera dijagonalno u odnosu na položaj rezonatora, kako bi se zadržala simetrija strukture.



Slika 6.12 Princip ostvarivanja perturbacije kod predloženog dual-mod rezonatora



Slika 6.13 Promena rezonantne učestanosti degenerativnih modova u funkciji geometrijskog parametra d_v

Korišćenjem predložene perturbacije, projektovan je filtar sa jednim dual-mod rezonatorom, koji daje filtarski odziv sa dva pola, i filtar sa dva spregnuta dual-mod rezonatora koji daje odziv filtra sa četiri pola.

6.3.1 Filtar propusnik opsega učestanosti sa dva pola

Projektovani filtar sa dva pola, prikazan je na slici 6.14. Filtar se sastoji od jednog dual-mod rezonatora spregnutog sa uvodnim transmisionim linijama, realizovanim sekcijama prethodno projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, tranzicije i 2.92 mm konektora.

Kako bi se ostvario željeni filtarski odziv, rezonator treba da bude pobuđen na odgovarajući način. Usled ortogonalnosti modova, uvodne transmisione linije su postavljene normalno jedna na drugu, relativno u odnosu na rezonator, kao što je prikazano na slici 6.14.

Filtar sa dva pola projektovan je korišćenjem dobro ustanovljene procedure koja se oslanja na metodu sinteze matrice sprege [85], [86]. Pozicija polova podešena je pozicijama vije, odnosno promenom parametra d_{v1}, dok su spoljašnji faktori dobrote, od kojih zavisi sprega uvodnih linija i rezonatora, podešeni parametrom s_{r1}. Usled specifičnosti predložene konfiguracije, odnosno usled asimetrije degenerativnih modova, promena parametra d_v ne utiče podjednako na ortogonalne modove. Prema tome, normalizovana $N+2$ matrica sprege za filtar sa dva pola može biti predstavljena u sledećoj formi:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.6471 & 0.6529 & -0.0198 \\ 0.6471 & -2.02 & 0 & -0.6471 \\ 0.6529 & 0 & 0 & 0.6529 \\ -0.0198 & -0.6471 & 0.6529 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.1}$$

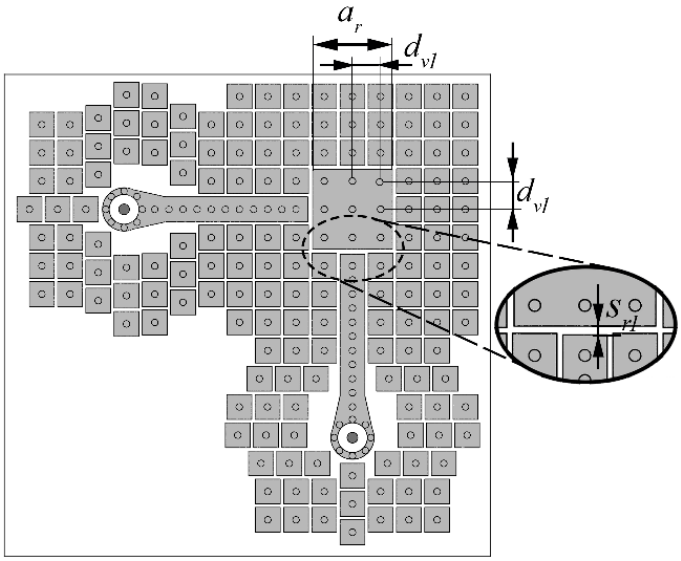
Na slici 6.15, prikazan je odziv filtra sa dva pola, za optimizovane geometrijske parametre: a_r = 4,9 mm, s_{r1} = 0,35 mm, i d_{v1} = 1,6 mm.

Filtar na centralnoj učestanost od 32,45 GHz je okarakterisan povratnim gubicima boljim od 32,5 dB, unesenim slabljenjem od 1,3 dB, relativnom širinom propusnog opsega učestanosti od 1,54%,

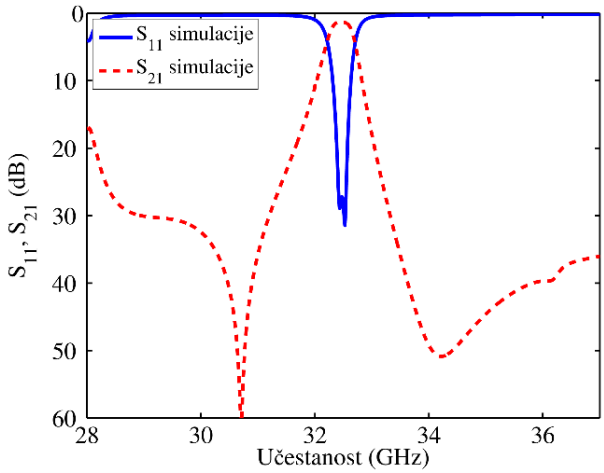
i sa dve transmisione nule postavljene sa obe strane propusnog opsega, koje doprinose dobroj selektivnosti filtra. Transmisione nule potiču od parazitnih sprega između ulaznih i izlaznih uvodnih linija (engl. *Source-Load Coupling*). Takođe, pored parazitnih sprega putanje viših modova odnosno površinski talasi mogu da prouzrokuju dodatne sprege između ulaza i izlaza, [93].

Ukupne dimenzije predloženog filtra sa uvodnim linijama i okolnom PMC strukturom jednaka je 28,57 mm x 28,75 mm, gde kvadratni peč rezonator zauzima 4,9 mm x 4,9 mm.

Predloženi filtar sa dva pola projektovan je za rad u milimetarskom opsegu učestanosti. Iako je centralna učestanost filtra bliska donjoj granici milimetarskog opsega, predloženi filtar jasno ukazuje na veliki potencijal koje nudi tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa za projektovanje filtara u milimetarskom opsegu.



Slika 6.14 Projektovani filtar sa dva pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa



Slika 6.15 Rezultati S parametra simulacija projektovanog filtra sa dva pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

6.3.2 Filtar propusnik opsega učestanosti sa četiri pola

Kako bismo dalje demonstrirali primenu predstavljenog dual-mod rezonatora, projektovan je filtar sa četiri pola, realizovan pomoću dva spregnuta dual-mod rezonatora, prikazan na slici 6.16. Uvodne linije, realizovane sekcijama prethodno projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, tranzicije i 2.92 mm konektora, postavljene su na suprotnim stranama kako bi se izbeglo formiranje dodatnih putanja između ulaza i izlaza, odnosno kako bi se izbeglo formiranje dodatnog para transmisionih nula koje bi mogle negativno da utiču na odziv filtra.

Filtar je projektovan korišćenjem matrice sprege i dobro ustanovljene procedure za projektovanje filtara, koja se oslanja na metodu sinteze matrice sprege [85], [86].

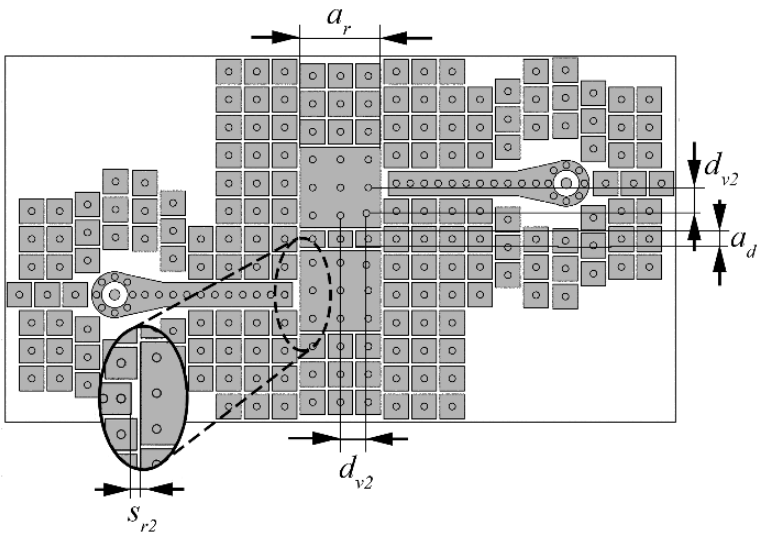
Dodatno, kako bi se ostvarila odgovarajuća sprega između rezonatora, filtar sa četiri pola je projektovan kao asimetričan. U predloženoj asimetričnoj konfiguraciji, kada su vije postavljene jedna blizu druge, sprega između rezonatora za parove degenerativnih modova je skoro identična. Intenzitet sprege između dva dual-mod rezonatora kontrolisan je promenom geometrijskog parametra a_d, koji utiče na širinu tri središnje PMC ćelije postavljene između rezonatora. Predloženom promenom parametra a_d, ne utiče se na promenu opsega učestanosti zabranjene zone, ali se utiče na spregu između rezonatora. Spoljašnji faktor dobrote optimizovan je geometrijskim parametrom s_{r2}.

Filtar sa četiri pola projektovan je na centralnoj učestanosti od 32,5 GHz, sa povratnim gubicima boljim od 10 dB i relativnom širinom propusnog opsega od 2,9%. Normalizovana N+2 matrica sprege za filtar sa četiri pola predstavljena je u sledećoj formi:

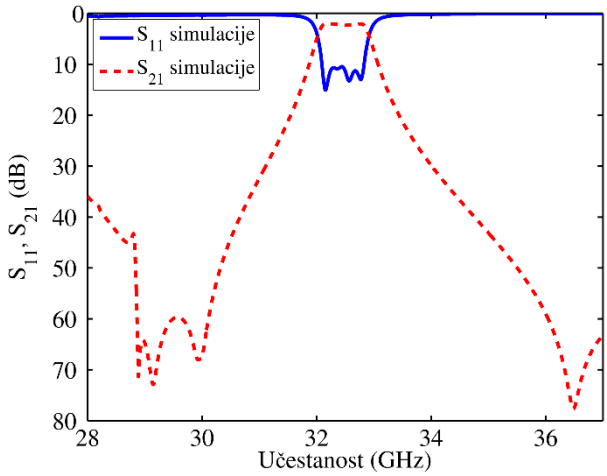
$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.83772 & 0.00034 & 0 & 0 & 0 \\ 0.83772 & 0 & 0.74589 & 0 & -0.0075 & 0 \\ 0.00034 & 0.74589 & 0 & 0.61835 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.61853 & -0.0235 & 0.74462 & -0.0336 \\ 0 & -0.0075 & 0 & 0.74462 & 0.05756 & 0.83704 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0336 & 0.83704 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

Na slici 6.17, prikazan je simulirani odziv S parametara filtra sa četiri pola, dobijen optimizacijom sledećih parametara: a_r = 4,9 mm, s_{r2} = 0,41 mm, d_{v2} = 1,17 mm i a_d = 1 mm. Centralna radna učestanost filtra je 32,5 GHz, sa povratnim gubicima boljim od 10 dB i unesenim slabljenjem od 2 dB.

Projektovana relativna širina opsega učestanosti iznosi 2,7%. Filtar je okarakterisan dobrom selektivnošću, sa dve transmisione nule sa obe strane propusnog opsega. Ukupne dimenzije filtra sa uvodnim linijama i okolnom PMC strukturom iznose 21,9 mm x 40,6 mm.



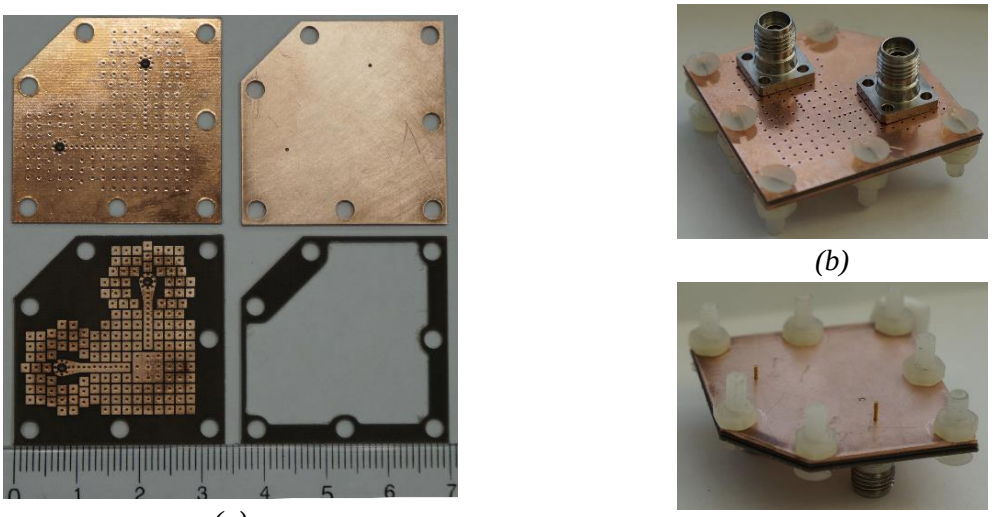
Slika 6.16 Projektovani filtar sa četiri pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92]



Slika 6.17 Rezultati S parametara simulacija projektovanog filtar sa četiri pola u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92]

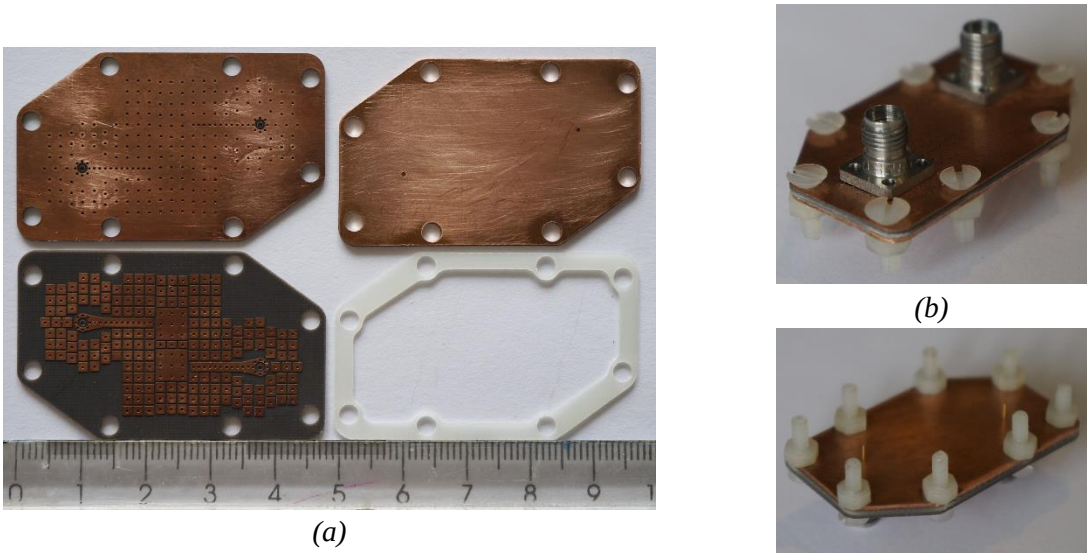
6.4 Fabrikacija i rezultati merenja predloženih filtara

Projektovani filtri sa dva i četiri pola, u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, fabrikovani su na dielektričnom materijalu *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2, dielektričnih gubitaka *tanδ* = 0,0009 i debljine *t* = 0,51 mm, korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča. Gornji provodnik fabrikovan je od bakarne ploče debljine 0,8 mm.



(a) *(b)* *(c)*

Slika 6.18 Fotografije filtra sa dva pola fabrikovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na montirani filtar sa donje strane sa 2.92 mm konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92]



(a) *(b)* *(c)*

Slika 6.19 Fotografije filtra sa četiri pola fabrikovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa: a) pojedinačni slojevi, b) pogled na montirani filtar sa donje strane sa 2.92 mm konektorima, c) pogled sa gornje strane, [92]

Na slikama 6.18 i 6.19, prikazani su delovi fabrikovanog filtra sa dva i četiri pola, respektivno. Radi lakše montaže i poravnavanja gornjeg i donjeg dela, iskorišćeno je sedam otvora za filtar sa dva pola i osam za filtar sa četiri pola, u dielektričnoj podlozi i gornjem provodniku. Otvori su iskorišćeni za sastavljanje filtra pomoću najlonskih vijaka i navrtki. Kako bi se održalo konstantno rastojanje između gornjeg i donjeg dela napravljeni su ramovi, za oba filtra, od istog dielektričnog materijala i iste debljine kao donji deo filtra, h = 0,51 mm. Ram je takođe realizovan sa otvorima, kao i sa uklonjenim metalizacijama, kako ne bi uticale na konačan odziv talasovoda.

Za povezivanje sa mernim instrumentom iskorišćeni su 2.92 mm konektori, postavljeni sa spoljašnjim delom na donju provodnu stranu talasovoda, slike 6.18(b)i 6.19(b), dok je središnji vod provučen kroz otvor u dielektričnoj podlozi i spojen sa gornjim provodnikom, slika 6.18(c) i 6.19(c).

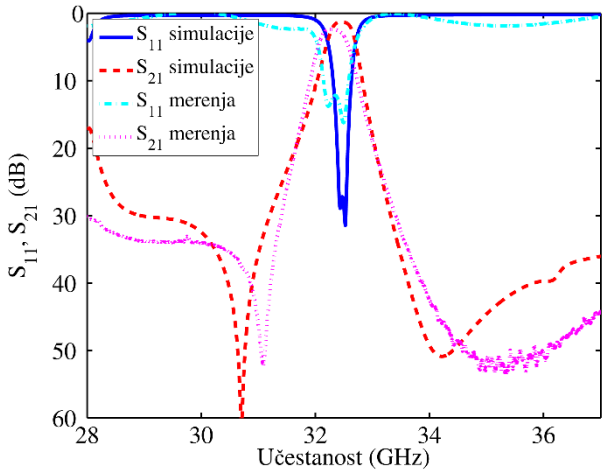
Za merenje je iskorišćen vektorski analizator mreža, Agilent N5230A. Merenja su urađena do 40 GHz, što predstavlja maksimalnu predviđenu učestanost na kojoj mogu da se koriste 2.92 mm konektori.

Dobro slaganje je dobijeno između izmerenih i simuliranih odziva predloženih filtara. Mali pomeraj u učestanosti i malo povećani gubici mogu se uočiti u izmerenim vrednostima, nastali usled različitih vrednosti realne i simulirane vrednosti dielektrične konstante, debljine podloge i ne idealne montaže.

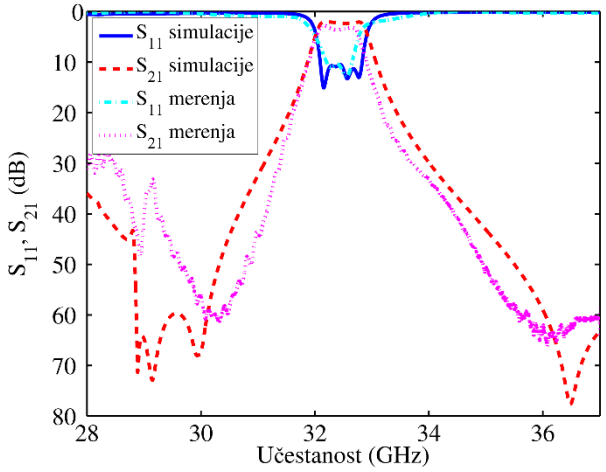
Na slici 6.20, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara predloženog filtra sa dva pola. Filtar je okarakterisan odličnim performansama, na centralnoj učestanosti od 32,32 GHz, povratnim gubicima boljim od 12,2 dB, unesenim slabljenjem od 2,38 dB i relativnom širinom propusnog opsega od 1,74%. Centralna učestanost filtra je pomerena za 0,4% u poređenju sa simuliranim rezultatima, što govori o odličnom slaganju simuliranih i izmerenih rezultata.

Na slici 6.21, prikazano je poređenje simuliranih i izmerenih *S* parametara predloženog filtra sa četiri pola. Filtar je takođe okarakterisan dobrim performansama, relativnom širinom propusnog opsega od 2,47% na centralnoj učestanosti od 32,39 GHz, povratnim gubicima boljim od 10 dB i unesenim gubicima od 2,7 dB. Centralna učestanost je pomerena u odnosu na simuliranu vrednost za 0,3%.

Predloženi filtri sa dva i četiri pola, okarakterisanu su transmisionim nulama sa obe strane propusnog opsega, čime je dobijena odlična selektivnost. Takođe, predstavljani filtri prva su rešenja ove vrste projektovana i fabrikovana u milimetarskom opsegu učestanosti, koji pokazuju potencijal primene tehnologija mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa za projektovanje filtara u milimetarskom opsegu učestanosti.



Slika 6.20 Poređenje simuliranih i izmerenih rezultata S parametara fabrikovanog filtra sa dva pola, [92]



Slika 6.21 Poređenje simuliranih i izmerenih rezultata S parametara fabrikovanog filtra sa četiri pola, [92]

6.5 Zaključak

Projektovani i fabrikovani filtri, predstavljaju prve predložene filtre sa dva i četiri pola realizovani u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, na milimetarskim učestanostima. Filtri služe kao dokaz koji potvrđuje potencijal primene pasivnih filtara u milimetarskom opsegu učestanosti u tehnologiji mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa. Pošto su filtri fabrikovani u standardnom procesu štampanih ploča i imaju male gubitke, dobre performanse unutar i izvan propusnog, zadovoljavaju zahteve za pasivinim filtrima u milimetarskom opsegu učestanosti.

Filtri su projektovani i fabrikovani u standardnoj tehnologiji štampanih ploča, unutar milimetarskog opsega na radnim učestanostima od 32,45 GHz i 32,5 GHz, sa malim gubicima i odličnim karakteristikama unutar i izvan propusnog opsega.

Predloženo rešenje približava prednosti PCB tehnologije na milimetarskim učestanostima i istovremeno omogućava kompaktna planarna rešenja sa malim gubicima i dobrim potiskivanjem izvan opsega od interesa.

Predloženi filtri iz ove glave [92] prihvaćeni su za publikaciju u časopisu *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, sa *Impact Factor*-om 2.540 (2016).

Glava 7. Direkcioni sprežnik sa 0-dB odlaznim talasom realizovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

U ovoj disertaciji, akcenat je prevashodno na projektovanju filtara u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Međutim, u ovoj glavi pažnja je posvećena drugom važnom pasivnom kolu, direkcionom sprežniku sa odlaznim talasom (engl. *Forward-wave directional couplers*)

Naime, direkcioni sprežnici sa odlaznim talasom široko su primenjivani u mikrotalasnim pasivnim kolima kao što su balansirani pojačivači, balansirani mikseri, transformatori i pomerači faze, koji se koriste za deljenje ili kombinovanje snage, [76]. Zbog primene u merenjima, za izolaciju izvora signala i za oklapanje (engl. *Shielding*) najviše pažnje privlače 0-dB sprežnici odlaznog talasa, usled činjenice da navedene primene ne mogu biti realizovane korišćenjem sprežnika sa povratnim talasima (engl. *Backward-wave couplers*). Različite topologije 0-dB sprežnika sa odlaznim talasom projektovane su u konvencionalnim tehnologijama, talasovodima, mikrostrip vodovima i u talasovodima integrisanim u podlogu, [94]–[96].

Tehnologija talasovoda na bazi procepa primenjena je u realizaciji nekoliko rešenja sprežnika predloženih u tehnologiji grebenastog talasovoda na bazi procepa [77], [79], u tehnologiji talasovoda na bazi procepa sa kanalom [78], [97], i u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa [81]. Od predloženih sprežnika ni jedan nije zasnovan na 0-dB sprežnicima sa odlaznim talasom.

Kako bi se demonstrirao potencijal mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, u ovoj glavi projektovan je novi 0-dB sprežnik odlaznog talasa, [98]. Sprežnik se sastoji od dva projektovana mikrostrip grebenasta talasovoda međusobno spregnuta preko niza uvećanih uzemljenih PMC ćelija. Predložena struktura predstavlja prvi sprežnik sa odlaznim talasom projektovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

U prvom delu ove glave predstavljeno je projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda, čija će se topologija koristiti u realizaciji sprežnika. Projektovani talasovod sastoji se od dva zakrivljena segmenta od po 90˚, koji omogućuju blisko postavljanje portova, zajedno sa suženim linijama (engl. *Tapered lines*) za prilagođenje impedanse tranzicije sa suženom središnjom sekcijom grebenastog talasovoda, kao što je predstavljeno u šestoj glavi.

Drugi deo ove glave posvećen je projektovanju 0-dB sprežnika odlaznog talasa. Za analizu spregnutih talasovoda projektovana je nova super ćelija, tzv. super ćelija sprežnika, koja daje uvid u ponašanje modova sprežnika. Naime, kada se dva talasovoda postave na male udaljenosti, dolazi do formiranja dva moda, koja se uporedo kreću u sprežniku. Ova dva moda se uobičajeno nazivaju parni i neparni mod. Korišćenjem fazne razlike parnog i neparnog moda sprežnika, proračunata je potrebna dužina sprezanja, koja određuje za koju dužinu talasovoda će elektromagnetska energija da pređe iz jednog talasovoda u drugi.

Dobijeni rezultati simulacija predloženog 0-dB sprežnika sa odlaznim talasom [98], odlikovani su dobrim performansama u pogledu nivoa sprege, izolacije, direktivnosti i opsega učestanosti.

7.1 Projektovanje mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

Projektovanje jedinične ćelije i super ćelije talasovoda predstavlja inicijalni korak u projektovanju kola u talasovodima na bazi procepa, pa tako i 0-dB sprežnika odlaznog talasa. Pošto je projektovanje jedinične ćelije i super ćelije talasovoda predstavljeno detaljno u prethodnim glavama, u nastavku će biti date vrednosti kritičnih geometrijskih parametara jedinične ćelije, super ćelije talasovoda i mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa.

Za projektovanje svih gradivnih elemenata i mikrostrip grebenastog talasovoda iskorišćena je dielektričnoj podloga *Taconic TLY-5*, permitivnosti ε_r = 2,2, dielektričnih gubitaka $tan\delta$ = 0,0009 i debljine t = 1,52 mm.

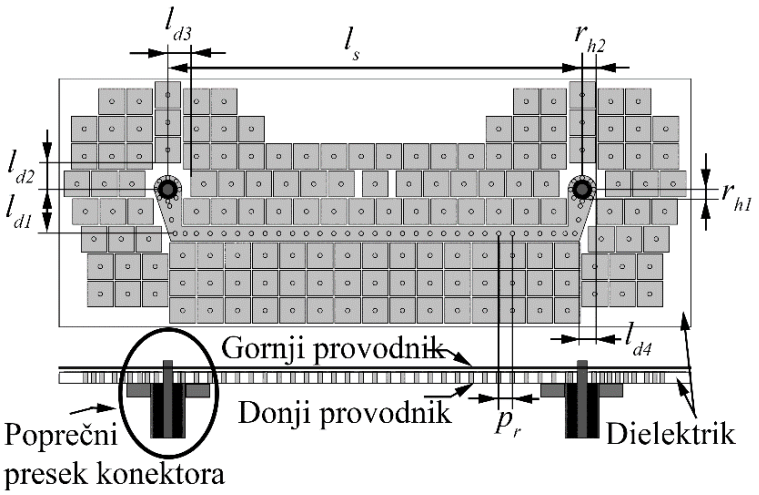
Projektovani opseg učestanosti zabranjene zone jedinične ćelije zasnovane na uzemljenom peč rezonatoru od 7,3 do 16,5 GHz, prikazan u četvrtoj glavi, zadovoljava dalje korake projektovanja. Kritični geometrijski parametri jedinične ćelije su sledeći: dimenzija kvadratnog peča a = 3,5 mm, perioda p = 3,75 mm, visina vazdušnog procepa h = 0,5 mm i prečnik vije d = 0,6 mm. Projektovani opseg zabranjene zone pokriva skoro ceo opseg X i Ku banda, tj. od 8 do 18 GHz.

Za analizu ponašanja talasovoda, iskorišćena je super ćelija talasovoda. Super ćelija talasovoda je projektovana sa kritičnim dimenzijama w_r = 2 mm i g_r = 0.,25 mm, koje su optimizovane tako da mod prostiranja pokriva ceo opseg učestanosti zabranjene zone.

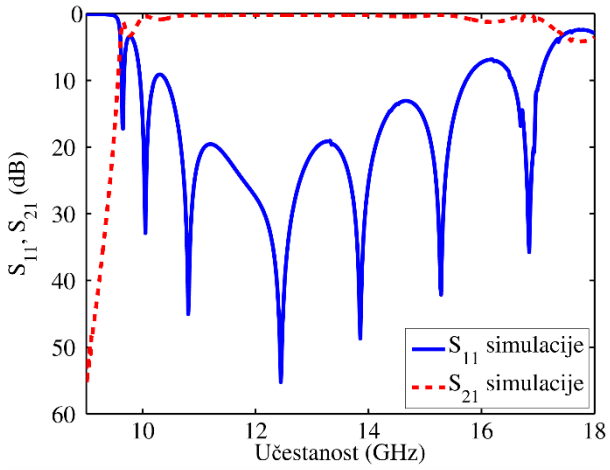
Mikrostrip grebenasti talasovod projektovan je uvođenjem mikrostrip grebena, unutar PMC površine, čime je dobijen mod prostiranja koji je sličan kvazi-TEM modu invertovanog mikrostrip voda. Učestanost odsecanja predloženog talasovoda određena je širinom mikrostrip grebena, w_r, i udaljenosti mikrostrip grebena od prvog reda jediničnih ćelija PMC površine, g_r.

Projektovani mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, prikazan je na slici 7.1. Talasovod je projektovan sa periodično postavljenim vijama, periode p_r = 1,875 mm, kojima je uzemljen mikrostrip vod širine w_r. Periodičnost vija omogućuje efektivno ponašanje mikrostrip grebena i smanjuje potrebu za gusto pakovanim vijama.

Dužina projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda proizvoljno je izabrana da bude 13 perioda PMC površine, što predstavlja dovoljan broj PMC ćelija koje obezbeđuju odgovarajuće prostiranje kvazi-TEM moda duž mikrostrip grebena. Takođe, mikrostrip greben je ograničena sa tri reda bočnih jediničnih ćelija što je dovoljan broj ćelija kako bi se ograničilo bočno širenje elektromagnetske energije talasa.



Slika 7.1 Projektovani mikrostrip grebenasti talasovoda na bazi procepa, pogled od gore i poprečni presek A-A', [98]



Slika 7.2 Simulirani odziv projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [98]

Kako bi se ostvarila izolacija između dva blisko postavljena ulaza, odnosno portova sprežnika, mikrostrip greben je realizovan pomoću dva zakrivljena segmenta od 90˚, kao što je prikazano na slici 7.1. Dodatno, sužene uvodne linije iskorišćene su za prilagođenje impedanse između realizovane tranzicije i središnje sekcije talasovoda širine w_r = 2 mm. Dokazano je da projektovani zakrivljeni segmenti od 90˚ ne utiču negativno na naponski odnos stojećeg talasa (engl. *Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR) mikrostrip grebena.

Da bi se iskoristio opseg zabranjene zone u što većoj meri, iskorišćena je vertikalna tranzicija predložena u četvrtoj glavi ove disertacije, [84]. Poprečni presek predložene tranzicije prikazan je na slici 7.1. Sledeći geometrijski parametri su fino podešeni i optimizovani kako bi se dobilo što bolje prilagođenje između SMA konektora i mikrostrip grebena: r_{h1} = 1,3 mm, r_{h2} = 1,9 mm, l_{d1} = 6 mm, l_{d2} = 3,65 mm, l_{d3} = 1,65 mm i l_{d4} = 2,3 mm i l_s = 56,55 mm.

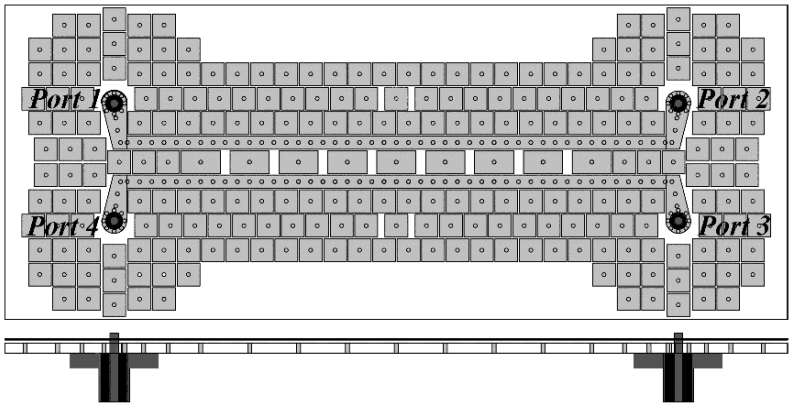
Na slici 7.2 prikazan je simuliran odziv projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Iz rezultata se može videti da je u opsegu od 10,4 do 15,72 GHz dobijeno uneseno slabljenje bolje od 0,8 dB i povratni gubici bolji od 10 dB.

7.2 Projektovanje sprežnika u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa

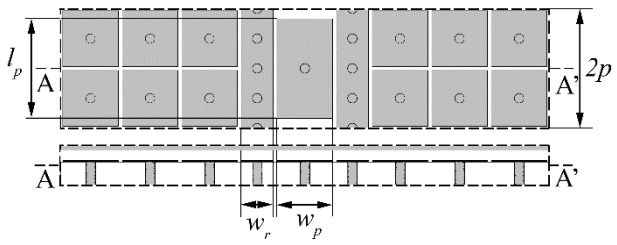
Za demonstraciju potencijala predloženog talasovoda, projektovan je 0-dB direkcioni sprežnik odlaznog talasa, [98], prikazan na slici 7.3. Sprežnik se sastoji od dva, prethodno projektovana mikrostrip grebenasta talasovoda, koji su međusobno spregnuti preko niza uvećanih uzemljenih PMC ćelija, većih od jediničnih ćelija koje grade PMC površinu. Veće dimenzije PMC ćelija izabrane su kako bi se omogućila odgovarajuća sprega između dva paralelna mikrostrip grebena i kako bi se onemogućilo nastajanje dodatnih rezonantnih modova unutar zabranjene zone, što je slučaj kada se koriste ćelije manje od jediničnih ćelija koje grade PMC površinu, što je pokazano predloženim rezonatorima u glavi pet ove disertacije.

Za analizu spregnutih grebena projektovana je super ćelija sprežnika, prikazana na slici 7.4. Super ćelija sprežnika sastoji se od dva mikrostrip grebena razdvojena jednom uvećanom PMC ćelijom. Usled većih dimenzija, super ćelija sprežnika uključuje dva uzastopna reda jediničnih ćelija PMC površine, postavljene sa bočnih strana grebena. Prema tome, dužina super ćelija sada iznosi 2*p,* za razliku od uobičajene dužine od jedne periode *p*, kod super ćelija talasovoda.

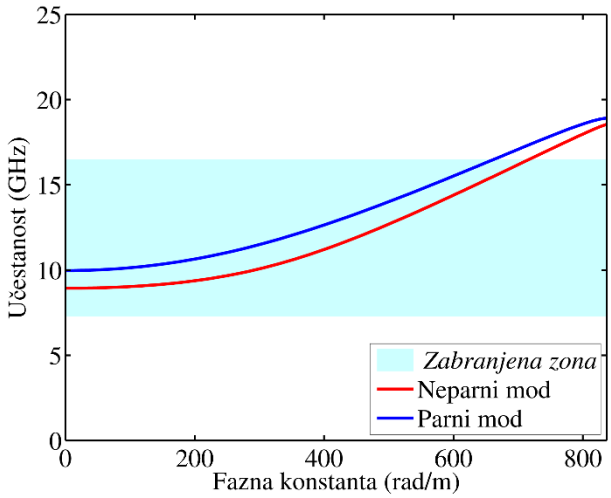
Pošto su dva mikrostrip grebena postavljena vrlo blizu, razdvojena uvećanim PMC ćelijama, usled njihove sprege dolazi do razdvajanja moda prostiranja u parni i neparni mod, koji su prikazani na disperzionom dijagramu super ćelije sprežnika, slika 7.5, za optimizovane geometrijske parametre super ćelije sprežnika: w_p = 3,5 mm i l_p = 6 mm.



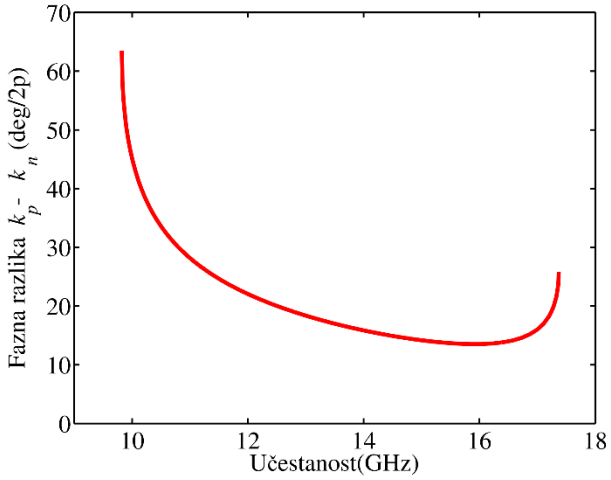
Slika 7.3 Projektovan 0-dB direkcioni sprežnika odlaznog talasa, pogled od gore i poprečni presek, [98]



Slika 7.4 Super ćelija sprežnika, pogled od gore i poprečni presek, A-A', [98]



Slika 7.5 Disperzioni dijagram super ćelije sprežnika, [98]



Slika 7.6 Razlika fazne konstante parnog i neparnog moda predloženog sprežnika, za dužinu uvećanog peča l_p = 6 mm, [98]

Na slici 7.6, prikazana je proračunata razlika fazne konstante parnog i neparnog moda. Kako bi se dobio 0-dB sprežnik sa širokim radnim opsegom, potrebno je da fazna razlika parnog i neparnog moda bude konstantna u širokom opsegu učestanosti. Takođe, za dobijanje male dužine sprezanja, odnosno da sprezanje elektromagnetske energije iz jednog u drugi sprežnik bude efektivnije za kraći pređeni put i fizičke dimenzije sprežnika budu manje, potrebna je da razlika fazne konstante parnog i neparnog moda bude što veća.

Sa krive fazne razlike može se primetiti da je najravniji deo krive oko 16 GHz. Prema tome, opseg učestanosti oko 16 GHz, gde je fazna razlika konstantna, predstavlja najbolji izbor opsega radne učestanosti 0-dB sprežnika, sa centralnom učestanosti od 16 GHz. Međutim, pošto je učestanost od 16 GHz vrlo blizu gornje granične učestanosti zabranjene zone, a i sudeći po simuliranim rezultatima mikrostrip grebenastog talasovoda, u okolini 16 GHz imamo značajne gubitke, za radnu učestanost sprežnika izabrana je učestanost od 13,5 GHz. U opsegu učestanosti oko 13,5 GHz postignut je najbolji balans performansi i širine opsega. Naime, opseg učestanosti oko 13,5 GHz nudi značajno manje

gubitke, uneseno slabljenje bolje od 0,5 dB i povratne gubitke bolje od 15 dB. Takođe, na učestanosti od 13,5 GHz, fazna razlika je značajno veća nego na učestanosti od 16 GHz, što garantuje manje dužine sprežnika.

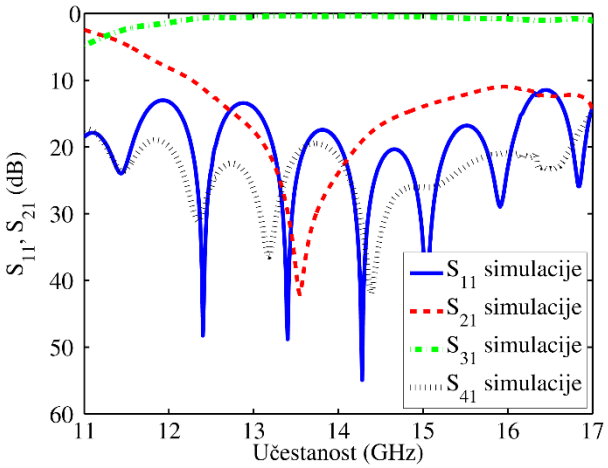
Dužina za koju se elektromagnetska energija iz jednog talasovoda prenese u drugi talasovod, u konfiguraciji spregnutih talasovoda, naziva se dužina sprezanja L_c (engl. *Coupling Length*). Dužina sprezanja kod sprežnika sa odlaznim talasom data je izrazom:

$$L_c = \frac{\pi}{k_p - k_n} \tag{7.1}$$

gde su k_p i k_n fazne konstante parnog i neparnog moda, respektivno. Prema izrazu (7.1), broj uvećanih PMC ćelija potreban da se ostvari sprega od 0 dB, na centralnoj učestanosti od 13,5 GHz jednak je broju od devet ćelija, što odgovara efektivnoj dužini spregnutih grebenastih talasovoda od 33,75 mm.

Simulirani *S* parametri projektovanog sprežnika prikazani su na slici 7.7. Najbolji nivo sprege od 0,3 dB dobijen je na učestanosti od 13,54 GHz, koja je veoma bliska projektovanoj centralnoj učestanosti od 13,5 GHz. Radni opseg sprežnika u skladu sa kriterijumom varijacija za parametar S_{31} od 1 dB, proteže se od 12 do 17,1 GHz. Međutim, prilikom izbora radnog opsega sprežnika treba uzeti u obzir da vrednosti drugih *S* parametra (S_{11}, S_{21} i S_{41}) treba da budu bolji od 10 dB. Prema tome, izabran je konačni radni opseg 0-dB sprežnika od 12,3 do 16 GHz, relativne širine opsega od 27%, na centralnoj učestanosti. Parametri S_{11} i S_{41} bolji su u ovom opsegu od 13 dB i 19,5 dB, respektivno, sa varijacijom S_{31} unutar opsega od 0,48 dB. Takođe, S_{21} i S_{31} unutar radnog opsega bolji su od 10 dB i 0,78 dB, respektivno.

Rezultati dobijeni simulacijama pokazuju da se sprežnik odlikuje velikim nivoom sprege unutar radnog opsega sa varijacijom od 0,48 dB, dobrom izolacijom i direktivnosti, i sa ukupnim dimenzijama od 5,18λ_0 x 2,14λ_0 na centralnoj učestanosti od 13,54 GHz, gde je λ_0 talasna dužina u slobodnom prostoru.



Slika 7.7 Odziv projektovanog 0-dB direkcionog sprežnika sa odlaznim talasom, [98]

Predloženi sprežnik [98], predstavlja prvi 0-dB sprežnik odlaznog talasa projektovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi u literaturi. Iako projektovani sprežnik pokazuje dobre performanse, dalja istraživanja su potrebna kako bi se unapredile performanse sprežnika i pronašao način smanjenja ukupnih dimenzije.

7.3 Zaključak

U ovoj glavi detaljno je predstavljena procedura projektovanja 0-dB sprežnik odlaznog talasa projektovanog u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda.

Prilikom projektovanja sprežnika, prvo je projektovan talasovod sa dva zakrivljena segmenta po 90˚ kako bi se omogućilo blisko postavljanje portova sprežnika, zajedno sa suženim linijama za prilagođenje impedanse tranzicije sa središnjom sekcijom grebenastog talasovoda.

Sprežnik je potom projektovan spregom dva predložena talasovoda preko uvećani uzemljenih PMC ćelija. Ćelije su većih dimenzija kako bi se ostvarila odgovarajuća sprega između talasovoda i onemogućilo dobijanje parazitnih modova unutar opsega učestanosti zabranjene zone. Za analizu ponašanja talasovoda projektovana je nova super ćelije, tzv. super ćelija sprežnika. Disperzioni dijagram super ćelije sprežnika nudi uvid u ponašanje talasovoda sa gledišta dva spregnuta moda, parnog i neparnog.

Predloženi 0-dB direkcioni sprežnika odlaznog talasa predstavlja prvi sprežnik ovog tipa realizovan u tehnologiji talasovoda na bazi procepa. Sprežnik je odlikovan dobrim performansama u pogledu nivoa sprege, izolacije, direktivnosti i opsega učestanosti.

Predloženi sprežnik iz ove glave [98] objavljen je na konferenciji *International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications* - TELSIKS, 2017.

8. Zaključak doktorske disertacije

U ovoj disertaciji predstavljeno je šest novih topologija filtara i jedna nova topologija 0-dB direkcionog sprežnika snage, realizovane u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Disertacija je obuhvatila projektovanje korišćenjem softverskih alata pomoću računara (CAD), analizu i optimizaciju projektovanih struktura. Takođe, disertacijom je obuhvaćena fabrikacija predloženih struktura, merenje njihovog odziva i poređenje rezultata dobijenih softverskim alatima i merenjima. Za projektovanje iskorišćen je softverski alat *CST Microwave Studio*. Sva predložena kola fabrikovana su korišćenjem standardne tehnologije štampanih ploča (engl. *Printed Circuit Board* - PCB).

Prve četiri topologije filtara, zasnovane su na rezonatoru koji je dobijen modifikacijom odnosno smanjivanjem jednog peč rezonatora unutar PMC površine, [84]. Predloženi rezonator je analiziran korišćenjem super ćelije rezonatora i kao rezultat dobijen je disperzioni dijagram koji prikazuje rezonantni mod rezonatora unutar opsega zabranjene zone. Dimenzije super ćelije rezonatora su optimizovane kao bi se dobio rezonantni mod na 13,5 GHz. Primenom predloženog rezonatora, projektovani i fabrikovani su filtar prvog, drugog, četvrtog i petog reda.

Za pobudu rezonatora iskorišćen je prethodno projektovan mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, [84]. Talasovod je projektovan na način ustanovljen u tehnologiji talasovoda na bazi procepa, korišćenjem osnovnih gradivnih elemenata, jedinične ćelije i super ćelije talasovoda. Dodatno, pošto talasovodi na bazi procepa zahtevaju odgovarajuće pobudne strukture kako bi ostvario veći radni opseg, projektovana je tranzicija između koaksijalnog SMA konektora i predloženog mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa. Projektovana tranzicija pokazala se kao najbolje rešenje po pitanju performansi u poređenju sa do sada objavljenim tranzicijama u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa u literaturi.

Nakon projektovanih tranzicija i mikrostrip grebenastog rezonatora, filtri su realizovani unošenjem rezonatora u kolo projektovanog mikrostrip grebenastog talasovoda, [84]. Sprega između rezonatora ostvarena je preko jedne jedinične ćelije PMC površine, koja se pokazala kao dobar način za podešavanje sprege. Filtri drugog i četvrtog reda, realizovani su direktnom spregom rezonatora preko jediničnih ćelija PMC površine, u linijskoj konfiguraciji, dok je filtar petog reda realizovan unakrsnom spregom rezonatora. Rezonatori su zatim pobuđeni sekcijama projektovanog mikrostrip voda, koje su zajedno sa predloženim tranzicijama i SMA konektorima, formirale pobudne linije.

Filtar prvog reda projektovan je optimizacijom rastojanja između uvodnih linija i rezonatora, kako bi se dobio odgovarajući odziv. Za projektovanje filtra drugog reda iskorišćena je dobro ustanovljena teorija filtara bazirana na krivama za koeficijente sprege (K) i spoljašnjeg faktora dobrote (Q_e). Filtar četvrtog reda projektovan je takođe korišćenjem koeficijenata sprege i spoljašnjeg faktora dobrote, i dodatno su primenom metode numeričkog podešavanja uz pomoć električnog modela kola,

optimizovane sprege između rezonatora i sprege sa uvodnim linijama. I na kraju, filtar petog reda projektovan je korišćenjem matrice sprege i optimizacijom modela kola.

Filtri su fabrikovani u standardnoj tehnologiji štampanih ploča. Svi predloženi filtari su fabrikovani i njihove karakteristike upoređene su sa ostalim relevantnim filtarskim rešenjima iz literature. Dokazano je da predloženi filtri imaju uporedive karakteristike sa ostalim filtarskim rešenjima iz literature i jedni su od kompaktnijih filtarskih rešenja.

Druga klasa filtara koji su projektovani u disertaciji, zasnovani su na dual-mod rezonatoru koji radi u milimetarskom opsegu učestanosti. Predloženi dual-mod rezonator realizovan je kao uvećani kvadratni peč rezonator dimenzija 3x3 ćelije PMC površine, okružen jediničnim ćelija PMC površine normalnih veličina. Periodičnost vija ispod predloženog rezonatora nije modifikovana.

U ovakvoj konfiguraciji, rezonator pobuđuje međusobno ortogonalne modove na istoj učestanosti, koji odgovaraju osnovnim degenerativnim medovima. Ovako ponašanje rezonatora je dokazano realizacijom super ćelije rezonatora i posmatranjem raspodele električnog polja rezonatora. Unošenjem perturbacije u vidu pomeranjem jedne vije u ćošku rezonatora, postignuto je razdvajanje degenerativnih modova u spektru, što je rezultovalo filtarskim odzivom.

Posebno za rad na milimetarskom opsegu učestanosti projektovan je mikrostrip grebenasti talasovod na bazi procepa, modifikacijom predviđene tranzicije i korišćenjem konektora za više učestanosti. Predložena struktura iskorišćena je za pobudu dual-mod rezonatora. Jedan dual-mod rezonator je iskorišćen za realizaciju filtra sa dva pola, dok je spregom dva rezonatora preko reda modifikovanih jediničnih ćelija PMC površine projektovan asimetrični filtar sa četiri pola.

Filtar sa dva pola projektovan je korišćenjem procedure koja se oslanja na metodu sinteze matrice sprega.

Predloženi filtri zasnovani na dual-mod rezonatoru, okarakterisani su transmisionim nulama sa obe strane propusnog opsega, čime je dobijena odlična selektivnost. Takođe, predloženi filtri zasnovani na dual-mode rezonatorima realizovanim u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, na milimetarskim učestanostima, predstavljaju prve filtre ovog tipa publikovane u literaturi. Filtri su fabrikovani primenom standardne tehnologije štampanih ploča.

Iako je akcenat u disertaciji prevashodno na projektovanju filtara, dodatno je predstavljen je direkcioni sprežnik sa 0-dB odlaznim talasom projektovan u tehnologiji mikrostrip grebenastog talasovoda na bazi procepa, [92].

Za potrebe sprežnika projektovan je mikrostrip grebenasti talasovod sa dva zakrivljena segmenta od po 90˚, koji će u topologiji sprežnika omogućiti blisko postavljanje portova. Prilikom projektovanja talasovoda, projektovane su i odgovarajuće tranzicije za koaksijalne SMA konektora.

Sprežnik je realizovan korišćenjem dva predložena mikrostrip grebenasta talasovoda međusobno spregnuta preko niza uvećanih uzemljenih PMC ćelija, koje su veće od jediničnih ćelija koje grade PMC površinu. Prilikom sprege talasovoda, dolazi do razdvajanja moda prostiranja u parni i neparni mod. Za analizu ovih modova predložena je tzv. super ćelija sprežnika, [98].

Iz rezultata koji su dobijeni analizom super ćelije sprežnika proračunata je razlika fazne konstante parnog i neparnog moda. Sa fazne konstante je izabrana centralna učestanost sprežnika od 13,5 GHz, koja je proračunavanjem dužine sprezanja za vrednosti parnog i neparnog moda na izabranoj učestanosti, rezultovala fizičkom dužinom sprežnika od 33,75 mm.

Ovde je važno naglasiti da su predloženi filtri publikovani u dva prestižna međunarodna časopisa, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* i *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, dok je predloženi sprežnik objavljen na međunarodnoj konferenciji *IEEE International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications* - TELSIKS.

Buduća istraživanja uključiće unapređenje predloženog direkcionog sprežnika, koji iako pokazuje dobre osobine zahteva dalje unapređenje performansi i manje ukupne dimenzija. Takođe, dalja istraživanja vezana za širokopojasne filtre mogu biti posebno interesantna imajući u vidu mogućnost ostvarivanja širokih opsega učestanosti zabranjene zone kod mikrostrip grebenastih talasovoda na bazi procepa.

9. Literatura

[1] N. (Nader) Engheta, R. W. Ziolkowski, and Institute of Electrical and Electronics Engineers., *Metamaterials : physics and engineering explorations*. Wiley-Interscience, 2006.

[2] P.-S. Kildal, "Erratum: Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 6, p. 366, 1988.

[3] P. S. Kildal, "Artificially Soft and Hard Surfaces in Electromagnetics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 10, pp. 1537–1544, 1990.

[4] E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel, and L. Inclan-Sanchez, "Planar Soft Surfaces and Their Application to Mutual Coupling Reduction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3852–3859, Dec. 2009.

[5] RongLin Li, G. DeJean, M. M. Tentzeris, J. Papapolymerou, and J. Laskar, "Radiation-pattern improvement of patch antennas on a large-size substrate using a compact soft-surface structure and its realization on LTCC multilayer technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 200–208, Jan. 2005.

[6] E. Lier and P.-S. Kildal, "Soft and hard horn antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 8, pp. 1152–1157, Aug. 1988.

[7] P. S. Kildal and A. Kishk, "EM modeling of surfaces with stop or go characteristics - Artificial magnetic conductors and soft and hard surfaces," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 32–40, 2003.

[8] A. Valero-Nogueira, E. Alfonso, J. I. Herranz, and P. S. Kildal, "Experimental demonstration of local quasi-TEM gap modes in single-hard-wall waveguides," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 536–538, 2009.

[9] E. Alfonso, P. S. Kildal, A. Valero, and J. I. Herranz, "Study of local quasi-TEM waves in oversized waveguides with one hard wall for killing higher order global modes," *2008 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Natl. Radio Sci. Meet. APSURSI*, no. 1, pp. 8–11, 2008.

[10] P.-S. Kildal, "Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves," *3rd Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2009)*, vol. 8, no. March, pp. 84–87, 2009.

[11] P.-S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, p. 262, 2011.

[12] P. S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 84–87, 2009.

[13] S. K. Koul and B. Bhat, "Inverted Microstrip and Suspended Microstrip with Anisotropic Substrates," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 10, pp. 1230–1231, 1982.

[14] J. S. Hong, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications: Second Edition*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[15] A. Polemi, S. MacI, and P. S. Kildal, "Dispersion characteristics of a metamaterial-based parallel-plate ridge gap waveguide realized by bed of nails," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 3, pp. 904–913, Mar. 2011.

[16] M. G. Silveirinha, C. A. Fernandes, and J. R. Costa, "Electromagnetic characterization of textured surfaces formed by metallic pins," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 2, pp. 405–415, 2008.

[17] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, N. G. Alexöpolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059–2074, 1999.

[18] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, p. 282, 2011.

[19] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Groove gap waveguide: A rectangular waveguide between contactless metal plates enabled by parallel-plate cut-off," in *Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010)*, 2010, pp. 1–4.

[20] P.-S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, p. 262, 2011.

[21] S. Rahiminejad, H. Raza, A. U. A. U. Zaman, S. Haasl, P. Enoksson, and P.-S. P.-S. Kildal, "Micromachined Gap Waveguides for 100 GHz Applications," *7th Eur. Conf. Antennas Propag. (EUCAP 2013)*, pp. 1935–1938, 2013.

[22] E. Pucci, E. Rajo-Iglesias, and P. S. Kildal, "New microstrip gap waveguide on mushroom-type EBG for packaging of microwave components," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 129–131, 2012.

[23] E. Pucci, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, and P.-S. Kildal, "New low loss inverted microstrip line using gap waveguide technology for slot antenna applications," *Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 979–982, 2011.

[24] A. A. Brazalez, E. R. Iglesias, and P. S. Kildal, "Investigation of transitions for use in inverted microstrip gap waveguide antenna arrays," in *8th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2014*, 2014, pp. 995–999.

[25] D. Deslandes and K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 68–70, Feb. 2001.

[26] E. Rajo-Iglesias, A. U. Zaman, and P.-S. Kildal, "Parallel Plate Cavity Mode Suppression in Microstrip Circuit Packages Using a Lid of Nails," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 31–33, Jan. 2010.

[27] M. N. M. Kehn and P. S. Kildal, "Miniaturized rectangular hard waveguides for use in multifrequency phased arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1 I, pp. 100–109, Jan. 2005.

[28] "*CST STUDIO SUITE Electromagnetic Field Simulation Software*"

[29] D. Pozar, *Microwave engineering 3rd edition*. 2005.

[30] E. Rajo-Iglesias, A. U. Zaman, E. Alfonso, and P. S. Kildal, "Alternative ridge gap waveguide design using a mushroom-type EBG surface," in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2009, pp. 1–4.

[31] H. Raza, J. Yang, P.-S. Kildal, and E. Alfonso Alos, "Microstrip-Ridge Gap Waveguide;Study of Losses, Bends, and Transition to WR-15," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 9, pp. 1943–1952, 2014.

[32] A. Berenguer, S. Member, V. Fusco, D. E. Zelenchuk, and S. Daniel, "Characteristics of Groove Gap Waveguide Below and Above Cutoff," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, pp. 27–36, 2016.

[33] P.-S. Kildal, A. Kishk, A. U. Zaman, E. Pucci, and E. Rajo-Iglesias, "Study of Q-factors of ridge and groove gap waveguide resonators," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 7, no. 11, pp.

900–908, 2013.

[34] M. Kobayashi and N. Sawada, “Analysis and Synthesis of Tapered Microstrip Transmission Lines,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 40, no. 8, pp. 1642–1646, 1992.

[35] A. Uz Zaman, T. Vukusic, M. Alexanderson, and P. S. Kildal, “Design of a simple transition from microstrip to ridge gap waveguide suited for MMIC and antenna integration,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1558–1561, 2013.

[36] A. Kishk, A. U. Zaman, and P.-S. Kildal, “Numerical Prepackaging with PMC lid − Efficient and Simple Design Procedure for Microstrip Circuits including the Packaging.”

[37] M. Sharifi Sorkherizi and A. A. Kishk, “Transition from microstrip to printed ridge gap waveguide for millimeter-wave application,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 2015–Octob, pp. 1588–1589, 2015.

[38] A. Algaba Brazalez, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, “Investigation of a Microstrip-to-Ridge Gap Waveguide transition by electromagnetic coupling,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 1–2, Jul. 2012.

[39] G. Strauss and W. Menzel, “Millimeter-wave MMIC interconnects using electromagnetic field coupling,” in *Proceedings of 1994 IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging*, pp. 142–144.

[40] A. Algaba Brazalez, J. Flygare, J. Yang, V. Vassilev, M. Baquero-Escudero, and P. S. Kildal, “Design of F-Band Transition from Microstrip to Ridge Gap Waveguide Including Monte Carlo Assembly Tolerance Analysis,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 4, pp. 1245–1254, 2016.

[41] G. Strauss and W. S. Menzel, “Millimeter-wave monolithic integrated circuit interconnects using electromagnetic field coupling,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. Part B*, vol. 19, no. 2, pp. 278–282, May 1996.

[42] R. W. Jackson and D. W. Matolak, “Surface-to-Surface Transition via Electromagnetic Coupling of Coplanar Waveguides,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 35, no. 11, pp. 1027–1032, Nov. 1987.

[43] T. J. Ellis, J. P. Raskin, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, “A wideband CPW-to-microstrip transition for millimeter-wave packaging,” in *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.99CH36282)*, 1999, vol. 2, no. c, pp. 629–632.

[44] A. A. Brazález, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, “Design of a coplanar waveguide-to-ridge gap waveguide transition via capacitive coupling,” *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2012*, pp. 3524–3528, 2012.

[45] A. U. Zaman, Jian Yang, and P.-S. Kildal, “Using Lid of pins for packaging of microstrip board for descrambling the ports of eleven antenna for radio telescope applications,” in *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010, pp. 1–4.

[46] A. A. Brazalez, A. U. Zaman, and P.-S. Kildal, “Improved Microstrip Filters Using PMC Packaging by Lid of Nails,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 7, pp. 1075–1084, Jul. 2012.

[47] A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and P.-S. Kildal, “Design of transition from coaxial line to ridge gap waveguide,” in *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2009, pp. 1–4.

[48] M. S. Sorkherizi, A. Khaleghi, and P. S. Kildal, “Direct-coupled cavity filter in ridge gap waveguide,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 490–495, Mar. 2014.

[49] S. I. Shams and A. A. Kishk, “Wideband Coaxial to Ridge Gap Waveguide Transition,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 12, pp. 4117–4125, 2016.

[50] M. Al Sharkawy and A. A. Kishk, “Wideband beam-scanning circularly polarized inclined slots using ridge gap waveguide,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 1187–1190, 2014.

[51] M. Al Sharkawy and A. A. Kishk, “Design of waveguide to ridge gap waveguide transition using probe excitation,” *8th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2014*, no. EuCAP, pp. 946–949, 2014.

[52] H. Raza, J. Yang, and P. Kildal, “Study of the Characteristic Impedance of Gap Waveguide Microstrip Line Realized With Square Metal Pins,” pp. 3001–3005, 2013.

[53] Y. Tikhov, I. Sang Song, J. Hwa Won, and J. Phill Kim, “Compact broadband transition from double-ridge waveguide to coaxial line,” *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 6, p. 530, 2003.

[54] M. E. Bialkowski, “Analysis of a coaxial-to-waveguide adaptor including a discended probe and a tuning post,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 43, no. 2, pp. 344–349, 1995.

[55] N. Rui-xing, L. En, G. Gao-feng, and W. Yi, “Simulation and design of 18–40GHz ridge waveguide to coaxial transition,” in *2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics*, 2011, pp. 183–185.

[56] X. Huang and K.-L. Wu, “A Broadband U-Slot Coupled Microstrip-to-Waveguide Transition,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 5, pp. 1210–1217, May 2012.

[57] B. Molaei and A. Khaleghi, “A novel wideband microstrip line to ridge gap waveguide transition using defected ground slot,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 91–93, 2015.

[58] C. A. Buendia, F. Gallée, A. Valero-nogueira, and C. Person, “Gap Waveguide Structure in LTCC for Millimeter- Wave Applications,” no. EuCAP, pp. 982–986, 2014.

[59] C. Arenas-buendia, F. Gallée, A. Valero-nogueira, and C. Person, “RF Sensor based on Gap Waveguide technology in LTCC for liquid sensing,” *9th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 1–4, 2015.

[60] A. A. Brazalez, E. Rajo-Iglesias, J. L. Vazquez-Roy, A. Vosoogh, and P. S. Kildal, “Design and Validation of Microstrip Gap Waveguides and Their Transitions to Rectangular Waveguide, for Millimeter-Wave Applications,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 12, pp. 4035–4050, 2015.

[61] M. S. Sorkherizi, A. A. Kishk, and A. Khaleghi, “Single and dual mode cavities based on defected bed of nails structure for ridge gap waveguide,” *8th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2014*, vol. 3, no. EuCAP, pp. 2669–2673, 2014.

[62] A. U. Zaman, A. A. Brazález, and P. Kildal, “Design of Band-Pass Filter Using Gap Waveguide Technology.”

[63] R. J. Cameron, *Microwave filters for communication systems*, vol. 2, no. 5. Wiley-Interscience, 2007.

[64] B. Ahmadi and A. Banai, “Direct Coupled Resonator Filters Realized by Gap Waveguide Technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 10, pp. 3445–3452, Oct. 2015.

[65] A. U. Zaman, P. Kildal, and A. A. Kishk, “Narrow-Band Microwave Filter Using High-Q Groove Gap Waveguide Resonators With Manufacturing Flexibility and No Sidewalls,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 1882–1889, Nov. 2012.

[66] P. Wade, “Rectangular Waveguide to Coax Transition Design,” *Qex*, pp. 10–17, 2006.

[67] A. Berenguer, M. Baquero-Escudero, D. Sanchez-Escuderos, B. Bernardo-Clemente, and V. E. Boria-Esbert, “Low insertion loss 61 GHz narrow-band filter implemented with Groove Gap Waveguides,” *Eur. Microw. Week 2014 Connect. Futur. EuMW 2014 - Conf. Proceedings; EuMC 2014 44th Eur. Microw. Conf.*, pp. 191–194, 2014.

[68] A. Del Olmo-Olmeda, M. Baquero-Escudero, V. E. Boria-Esbert, A. Valero-Nogueira, and A. J. Berenguer-Verdú, “A novel band-pass filter topology for millimeter-wave applications based on the groove gap waveguide,” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2013, pp. 1–4.

[69] M. Rezaee, A. U. Zaman, and P.-S. Kildal, “A groove gap waveguide iris filter for V-band application,” in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2015, pp. 462–465.

[70] D. Zarifi and M. Nasri, “Design of a Ku-band filter based on groove gap waveguide technology,” *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 76, no. April, pp. 71–76, 2018.

[71] F. F. Fangfang Fan, Z. Y. Zehong Yan, J. W. Jinhui Wang, and X. S. Xueyan Song, “Ka band-pass filter based on the microstrip-groove gap waveguide technology,” in *IET International Radar Conference 2015*, 2015, p. 5 .-5 .

[72] M. S. Sorkherizi and A. A. Kishk, “Lowloss planar bandpass filters for millimeter-wave application,” in *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–4.

[73] A. Vosoogh, A. A. Brazalez, and P. S. Kildal, “A V-Band Inverted Microstrip Gap Waveguide End-Coupled Bandpass Filter,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 26, no. 4, pp. 261–263, Apr. 2016.

[74] M. Sharifi Sorkherizi and A. A. Kishk, “Fully Printed Gap Waveguide with Facilitated Design Properties,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 26, no. 9, pp. 657–659, Sep. 2016.

[75] Meng Meng and K.-L. Wu, “An Analytical Approach to Computer-Aided Diagnosis and Tuning of Lossy Microwave Coupled Resonator Filters,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 12, pp. 3188–3195, Dec. 2009.

[76] R. Mongia and R. Mongia, *RF and microwave coupled-line circuits*. Artech House, 2007.

[77] E. Alfonso, M. Baquero, P.-S. Kildal, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias, and J. I. Herranz, “Design of microwave circuits in ridge-gap waveguide technology,” in *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2010, pp. 1544–1547.

[78] E. Alfonso, A. U. Zaman, E. Pucci, and P.-S. Kildal, “Gap waveguide components for millimetre-wave systems: Couplers, filters, antennas, MMIC packaging,” *Antennas Propag. (ISAP), 2012 Int. Symp.*, pp. 243–246, 2012.

[79] S. I. Shams and A. A. Kishk, “Design of 3-dB Hybrid Coupler Based on RGW Technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 10, pp. 3849–3855, Oct. 2017.

[80] D. Satyanarayana and A. Chakraborty, “Analysis of wide inclined slot coupled narrow wall coupler between dissimilar rectangular waveguides,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 42, no. 5, pp. 914–917, May 1994.

[81] M. Farahani, M. Akbari, M. Nedil, T. A. Denidni, and A. R. Sebak, “A Novel Low-Loss Millimeter-Wave 3-dB 90° Ridge-Gap Coupler Using Large Aperture Progressive Phase Compensation,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9610–9618, 2017.

[82] H. Schmiedel, “Series-configuration of multi-line directional-coupler sections with improved coupling,” in *2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535)*, pp. 339–342.

[83] E. Alfonso, M. Baquero, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz, and P. S. Kildal, “Power divider in ridge gap waveguide technology,” *EuCAP 2010 - 4th Eur. Conf. Antennas Propag.*, no. March

2014, 2010.

[84] S. Birgermajer, N. Jankovic, V. Radonic, V. Crnojevic-Bengin, and M. Bozzi, “Microstrip-Ridge Gap Waveguide Filter Based on Cavity Resonators With Mushroom Inclusions,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 1, pp. 136–146, Jan. 2018.

[85] J.-S. Hong, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[86] R. J. Cameron, A. C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems*, vol. 43, no. I. Wiley-Interscience, 2007.

[87] S. Chaturvedi, M. Božanic, and S. Sinha, “Millimeter wave passive bandpass filters,” *Microw. J.*, vol. 60, no. 1, pp. 98–108, 2017.

[88] A. Gorur and C. Karpuz, “Miniature Dual-Mode Microstrip Filters,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 37–39, Jan. 2007.

[89] I. Wolff, “Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator,” *Electron. Lett.*, vol. 8, no. 12, p. 302, 1972.

[90] Lei Zhu and Ke Wu, “A joint field/circuit model of line-to-ring coupling structures and its application to the design of microstrip dual-mode filters and ring resonator circuits,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 10, pp. 1938–1948, 1999.

[91] P. Chu *et al.*, “Dual-Mode Substrate Integrated Waveguide Filter With Flexible Response,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 3, pp. 824–830, Mar. 2017.

[92] S. Birgermajer, N. Jankovic, V. Crnojevic-Bengin, and V. Radonic, “Millimetre-Wave Dual-Mode Filters Realized in Microstrip-Ridge Gap Waveguide Technology,” *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 2018. - ***prihvaćen***

[93] S. Amari, “Comments on ‘Description of Coupling Between Degenerate Modes of a Dual-Mode Microstrip Loop Resonator Using a Novel Perturbation Arrangement and Its Dual-Mode Bandpass Filter Applications,’” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 9, pp. 2190–2192, Sep. 2004.

[94] S. Mori, M. Kishihara, K. Okubo, H. Takimoto, and I. Ohta, “Design of 0-dB forward coupler using half-mode groove waveguide for wireless power transmission,” in *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2012, pp. 1004–1006.

[95] J.-C. Yen, S.-K. Hsu, T.-H. Lin, and T.-L. Wu, “A Broadband Forward-Wave Directional Coupler Using Periodic Y-Shaped Ground Via Structures With Arbitrary Coupling Levels,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 1, pp. 38–47, Jan. 2013.

[96] A. Doghri, T. Djerafi, A. Ghiotto, and K. Wu, “Substrate Integrated Waveguide Directional Couplers for Compact Three-Dimensional Integrated Circuits,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 1, pp. 209–221, Jan. 2015.

[97] D. Sun and J. Xu, “Rectangular waveguide coupler with adjustable coupling coefficient using gap waveguide technology,” *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 3, pp. 167–169, Feb. 2017.

[98] S. Birgermajer, N. Jankovic, V. Crnojevic-Bengin, M. Bozzi, and V. Radonic, “Forward-wave 0 dB directional coupler based on microstrip-ridge gap waveguide technology,” in *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017 - Proceeding*, 2017, vol. 2017–Oct., pp. 154–157.