SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE Fakulta elektrotechniky a informatiky

Evidenčné číslo: FEI-104412-8510

Antikolízny radar

Diplomová práca

Študijný program: elektronika a fotonika Študijný odbor: 5.2.13. elektronika Školiace pracovisko: Ústav elektroniky a fotoniky Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Martin Tomáška, PhD. Konzultant: doc. Ing. Martin Tomáška, PhD.

Bratislava 2017

Bc. Ľubomír Klinko

Slovenská technická univerzita v Bratislave Ústav elektroniky a fotoniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky Akademický rok: 2016/2017 Evidenčné číslo: FEI-104412-8510



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent:	Bc. Ľubomír Klinko
ID študenta:	8510
Študijný program:	elektronika a fotonika
Študijný odbor:	5.2.13. elektronika
Vedúci práce:	doc. Ing. Martin Tomáška, PhD
Konzultant:	doc. Ing. Martin Tomáška, PhD
Miesto vypracovania:	UEF FEI STU Bratislava

Názov práce: Antikolízny radar

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

1. Navrhnite a realizujte pasívne štruktúry potrebné k realizácii integrovaného obvodu antikolízneho radaru v pásme 25GHz.

2. Vyšetrite vplyv technológie výroby na vlastnosti realizovaných štruktúr.

3. Na základe nameraných vlastností realizovaných pasívnych prvkov identifikujte parametre použitého modelu substrátu a technológie.

4. S využitím výsledkov identifikácie resimulujte a optimalizujte už navrhnuté obvody antikolízneho radaru.

5. Upravte metodiku návrhu s prihliadnutím na zistené odchýlky pri výrobe a simuláciách pri ďalšom návrhu obvodov pre antikolízny radar.

6. Vykonajte analýzu a aplikujte vhodné riešenia pre sfunkčnenie realizovaných obvodov antikolízneho radaru,

Riešenie zadania práce od:	13.02.2017
Dátum odovzdania práce:	19.05.2017

L. S.

Bc. Ľubomír Klinko študent

prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc. vedúci pracoviska SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE Fakulta elektrorechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava -2-

Q.

prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc. garant študijného programu

ANOTÁCIA

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky

Študijný program:	ELEKTRONIKA A FOTONIKA
Autor:	Bc. Ľubomír Klinko
Názov diplomovej práce:	ANTIKOLÍZNY RADAR
Vedúci diplomovej práce:	doc. Ing. Martin Tomáška, PhD.
Rok odovzdania:	máj 2017

Práca sa zaoberá návrhom a realizáciou pasívnych mikropásikových a koplanárnych prvkov pre účely merania obvodov antikolízneho radaru. Analýzou realizovaných pasívnych obvodov sú vyšetrené vplyvy technológie výroby a fyzikálne vlastnosti substrátu. Mikroskopickými meraniami boli nájdené skutočné geometrické rozmery realizovaných obvodov. Výsledný identifikovaný model substrátu a metodológia postupu sú použité pre analýzu zosilňovača antikolízneho radaru. Návrh a softvérové analýzy boli vykonávané v prostredí Advenced design system od spoločnosti Keysight Technologies.

ANNOTATION

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA Faculty of Electrical Engineering and Information Technology Institute of Electronics and Photonics

Curriculum:	ELECTRONICS AND PHOTONICS			
Author:	Bc. Ľubomír Klinko			
Title of the diploma thesis:	ANTICOLLISION RADAR			
Supervisor:	doc. Ing. Martin Tomáška, PhD.			
Year of the submission:	May 2017			

The master's thesis deals with the design and manufacturing of passive microstrip/coplanar elements for the purpose of measurement of anti-collision radar circuits. By analysis of prepared passive circuitrs are explored impacts of manufacturing technology and physical properties of substrate. Real geometric parameters of the realized circuits were found by microscopic measurements. Finaly identified substrate model and methodology are used for analysis of amplifier of anti-collision radar. Design and software analysis were performed in Advanced design system of Keysight Technologies.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne s využitím uvedených zdrojov literatúry.

.....

vlastnoručný podpis

V Bratislave, dňa

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať môjmu vedúcemu práce doc. Ing. Martinovi Tomáškovi PhD za jeho odbornú pomoc a rady, ktoré významne prispeli k riešeniu problematiky a úrovni tejto práce, ďalej sa chcem poďakovať Ing. Ivanovi Novotnému, PhD z UEF FEI STU za merania drsnosti, ako aj Ing. Danielovi Haškovi, PhD a Ing. Jaroslavovi Brunckovi, PhD z Medzinárodného laserového centra za mikroskopické merania.

Obsah

1	Úvo	od		3
2	Ant	ikolí	zny radar	4
2	2.1	Prin	ncíp FMCW radaru	4
2	2.2	Hyb	pridné mikrovlnné integrované obvody	5
	2.2. (HI	1 O)	Základné typy vedení používané v hybridných integrovaných	obvodoch 5
	2.2.	2	Mikropásikové vedenie	6
	2.2.	3	Uzemnený koplanárny vlnovod	7
3	Náv	rh pa	asívnych prvkov pre meranie obvodov antikolízneho radaru	7
3	3.1	Pou	žitý substrát	7
3	3.2	Náv	rh adaptéra	
	3.2.	1	Metóda riešenia	
3	3.3	Náv	/rh antény	14
	3.3.	1	Metóda návrhu	14
	3.3.	2	Anténa so štyroma vyžarovacími elementmi	16
	3.3.	3	Anténa s ôsmimi vyžarovacími elementmi	
3	3.4	Rea	lizované aktívne obvody antikolízneho radaru	19
4 sim	Pore	ovna ami.	nie elektrických meraní pasívnych prvkov s elektromag	netickými 20
4	l.1	Mer	ranie adaptérov:	
	4.1.	1	Adaptér 1:	
	4.1.	2	Adaptér 2:	
	4.1.	3	Adaptér 3:	
	4.1.	4	Adaptér 4:	
4	1.2	Mer	ranie radiálneho úseku vedenia	
4	1.3	Mer	ranie antén:	
	4.3.	1	Štvorprvková anténa	
	4.3.	2	Osemprvková anténa	
4	1.4	Mer	ranie interdigitálneho kondenzátora:	
V	/vhoc	inote	enie resimulácií pasívnych prykov :	
5	Mik	rosk	opické merania	

5	5.1	Drs	10sť povrchu	
5	5.2	Mer	anie optickým mikroskopom	
5	5.3	Mer	anie optickým interferenčným profilometrom Contour GT-K1	
	5.3.	1	Meranie výšky metalizácie	
	5.3. odd	2 eleni	Meranie interdigitálneho kondenzátora (väzobného člena pre	galvanické 41
	5.3.	3	Meranie radiálneho úseku vedenia :	
	5.3.	4	Meranie adaptérov :	
5	5.4	Mer	anie optickým metalografickým mikroskopom METAM	
	5.4.	1	Meranie interdigitálneho kondenzátora	
	5.4.	2	Meranie Radiálnych úsekov vedenia:	
	5.4.	3	Meranie adaptérov a antén:	
5	5.5	Vyh	odnotenie mikroskopických meraní	
5	5.6	Mer	anie stôp po meracích sondách na meracích adaptéroch	
6	Opä	itovn	é resimulácie zahŕňajúce poznatky z mikroskopických meraní	
6	5.1	Тур	y portov	
6	5.2	Res	mulácie meracích adaptérov	
	6.2.	1	Adaptér 30,6 mm	
	62			
	0.2.	2	Adaptér 80,6 mm	
	6.2.	2 3	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm	58 61
	6.2. 6.2.	2 3 4	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm	58 61 61
6	6.2. 6.2. 6.2. 5.3	2 3 4 Res	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm mulácie antén	58 61 61
6	6.2. 6.2. 6.2. 5.3 6.3.	2 3 4 Rest	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény	
6	6.2. 6.2. 6.2. 5.3 6.3. 6.3.	2 3 4 Res 1 2	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény	
6	6.2. 6.2. 6.3 6.3. 6.3. 5.4	2 3 4 Res 1 2 Res	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény mulácia radiálnych úsekov vedenia	
6 6 6	6.2. 6.2. 6.3 6.3. 6.3. 5.4	2 3 4 1 2 Res Res	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény imulácia radiálnych úsekov vedenia imulácia interdigitálneho kondenzátora	
6 6 6 7	6.2. 6.2. 6.3 6.3 6.3. 6.3. 5.4 5.5 Ider	2 3 4 Res 1 2 Res ntifik	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény imulácia radiálnych úsekov vedenia imulácia interdigitálneho kondenzátora ácia výsledného modelu substrátu	
6 6 7 8	6.2. 6.2. 6.3 6.3 6.3 6.3 5.4 5.5 Iden Met	2 3 4 Rest 1 2 Rest ntifik	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény imulácia radiálnych úsekov vedenia imulácia interdigitálneho kondenzátora ácia výsledného modelu substrátu ógia	
6 6 7 8 9	6.2. 6.2. 6.2. 5.3 6.3. 6.3. 5.4 5.5 Iden Met Ana	2 3 4 Rest 1 2 Rest ntifik todol	Adaptér 80,6 mm Adaptér 35,6 mm Adaptér 45,8 mm imulácie antén Resimulácia štvorprvkovej antény Resimulácia osemprvkovej antény imulácia radiálnych úsekov vedenia imulácia interdigitálneho kondenzátora ácia výsledného modelu substrátu ógia VF zosilňovača antikolízneho radaru	

1 Úvod

S nárastom počtu automobilov na ceste a vývojom elektronických systémov je dnešný trend v doprave po cestných komunikáciách smerujúci k poloautonómnym až autonómnym systémom riadenia automobilov pre zvýšenie komfortu cestovania a predovšetkým zníženiu nehodovosti spôsobenej zdravotnými komplikáciami počas jazdy alebo zlyhaním ľudského faktora (nepozornosť, únava, agresivita, precenenie schopností). Autonómne systémy riadenia pracujú na princípe neustáleho sledovania a vyhodnocovania priestoru v okolí automobilu za pomoci radarových systémov, ktoré monitorujú vzdialenosti objektov v jazdnej dráhe automobilu. Hlavným radarovým systémom pre autonómne riadenie automobilu je antikolízny radar, ktorý nepretržite monitoruje priestor pred (približne 200m) a vyhodnocuje vzdialenosť objektov automobilom a rýchlosť vyskytujúcich sa v jazdnej dráhe automobilu. Na základe sledovania jazdnej dráhy dokáže udržiavať bezpečnú vzdialenosť a rýchlosť automobilu v cestnej premávke autonómne pri aktivovanej funkcii adaptívneto tempomatu, ktorý je dnes už štandardom v automobiloch vybavených týmto radarovým systémom. Antikolízny radar predovšetkým plní úlohu bdelého strážcu, ktorý v prípade hroziacej zrážky včas upozorní vodiča audiovizuálnymi signálmi prístrojového panela a v prípadne nezareagovania aj samočinne núdzovo zastaví vozidlo. Cieľom práce je zvýšiť bezpečnosť na cestách a predísť vážnym dopravným nehodám prispením k návrhu cenovo dostupnejšieho antikolízneho radaru navrhovanom na hybridnom vysokofrekvenčnom integrovanom obvode, ktorý by sa mohol stať štandardom aj pri najlacnejších autách, vďaka cenovej dostupnosti, jednoduchej konštrukcii a minimálnemu počtu diskrétnych súčiastok.

Práca sa detailnejšie zaoberá návrhom a realizáciou pasívnych štruktúr pre možnosti merania navrhnutých obvodov antikolízneho radaru na 25 GHz, a tiež prvkov pre overenie platnosti použitého modelu substrátu, metodológie návrhu, vplyvov materiálových vlastností a identifikáciu vplyvov technológie výroby na funkčnosť, reprodukovateľnosť a výťažnosť obvodov antikolízneho radaru. Ďalej je spätným inžinierstvom identifikovaný vplyv výroby na hybridnom integrovanom obvode zosilňovača antikolízneho radaru na 25 GHz.

Charakterizácia vyrobených obvodov, identifikovanie vplyvov výrobnej technológie a vplyvov materiálových vlastností je hlavným zámerom práce pre možnosť úpravy metodológie návrhu a optimalizácií obvodov so zahrnutím výrobných vplyvov, čo približuje možnosti návrhu k prototypovej realizácii obvodov.

2 Antikolízny radar

Antikolízny radar využíva architektúru frekvenčne modulovaného radaru s vysielaním spojitého signálu (FMCW) na získanie nie len informácie o rýchlosti meraného cieľa voči radaru, ale aj ich vzájomnej vzdialenosti.

2.1 Princíp FMCW radaru

Frekvenčne modulovaným radarom dokážeme získať informáciu o vzdialenosti meraného cieľu od radaru na základe frekvenčnej modulácie vysielaného signálu, ktorý má v čase prijatia a porovnania odrazeného signálu od objektu už zmenenú frekvenciu vplyvom modulácie.

Dopplerovým radarom získame informáciu o rýchlosti pohybu meraného cieľa voči radaru na základe zmeny frekvencie odrazeného spojitého signálu voči vysielanému vplyvom Dopplerovho javu.

FMCW radar kombinuje Dopplerov radar s radarom využívajúcim frekvenčne modulovaný signál. Tento typ radaru je často využívaný pre automobilové antikolízne radary vďaka jeho jednoduchosti, presnosti a hlavne možnosti súčasného merania rýchlosti a vzdialenosti. Bloková schéma FMCW radaru je zobrazená na obrázku 1.



Obr. 1. Bloková schéma FMCW radaru.

Vo FMCW radare je privádzaný modulačný signál f_0 na základe ktorého oscilátor generuje frekvenčne modulovaný signál, ktorý je zosilnený VF zosilňovačom a rozdelený v deliči výkonu na zložku postupujúcu do antény $f_1(t_1)$ a zložku postupujúcu do zmiešavača. Signál prijatý z antény $f_{RX} = f_1 \pm f_D(t_2)$ je frekvenčne posunutý (oneskorený) voči vysielanému signálu $f_{TX} = f_2(t_2)$ a je privedený na zmiešavač, kde sa zmiešava s práve vysielaným signálom. Na výstupe zmiešavača dostaneme výstupný signál okamžitej rozdielovej frekvencie $f_b = |f_{TX} - f_{RX}|$, ktorej spracovaním získame informáciu o rýchlosti a vzdialenosti meraného cieľa od radaru. Grafické znázornenie princípu činnosti FMCW radaru je zobrazené na obrázku 2 [1].



Obr. 2. Grafické zobrazenie princípu činnosti FMCW radaru.

Obvody antikolízneho radaru zobrazené v blokovej schéme na obrázku 1 sú realizované v práci [2] ako jednotlivé hybridné mikrovlnné integrované obvody so snahou o použitie čo najmenšieho počtu diskrétnych súčiastok, ktorých funkciu nahrádzajú úseky vedení s presnými geometrickými rozmermi, ktoré charakterizujú ich vlastnosti na použitom substráte.

2.2 Hybridné mikrovlnné integrované obvody

Hybridné mikrovlnné integrované obvody majú zväčša planárnu štruktúru, ktorá poskytuje minimalizovanie diskrétnych súčiastok, vyššiu spol'ahlivost' a stabilitu, vyššiu reprodukovateľnosť výroby, výťažnosť, nižšie výrobné náklady, nízku hmotnosť a malé rozmery, ktoré sú závislé do vlnovej dĺžky vo vedení na konkrétnom substráte. Pasívne mikrovlnné obvody tvorí vytvarovaný vodivý motív nanesený na dielektrický substrát. Vlastnosti pasívnych súčiastok ako L, C, R sú nahrádzané krátkymi úsekmi vedení, čo dáva možnosť zníženia počtu pasívnych súčiastok na minimum. Aktívne prvky sú vkladané do obvodu ako diskrétne súčiastky prepájané vodivým motívom, čo poskytuje vzájomnú optimalizáciu použitých aktívnych súčiastok a pasívnych mikropásikových obvodov (vodivého leptaného motívu).

2.2.1 Základné typy vedení používané v hybridných integrovaných obvodoch (HIO)

Zoznam základné typy vedení používané v HIO :

- Symetrické mikropásikové vedenie
- Nesymetrické mikropásikové vedenie
- Tienené nesym. mikropásikové vedenie
- Inverzné nesym. mikropásikové vedenie
- Mikropásikové vedenie so zaveseným substrátom
- Mikropásikové vedenie s prekrývajúcou dielektrickou vrstvou
- Koplanárne vedenie

- Koplanárny vlnovod
- Koplanárny vlnovod s hornou tieniacou doskou
- Uzemnený koplanárny vlnovod
- Obojstranne tienený koplanárny vlnovod
- Viacvrstvý koplanárny vlnovod
- Štrbinové vedenie slotline
- Viazané mikropásikové vedenia
- Viazané štrbinové vedenia
- Viazané koplanárne vlnovody

Jednotlivé typy vedení sú bližšie popísané a schematicky znázornené v [3].

Všetky prvky a obvody antikolízneho radaru sú navrhnuté na mikropásikových vedeniach až na meracie adaptéry, ktoré boli navrhnuté na prepoj mirkopásikových obvodov s koplanárnymi meracími sondami pre účel meraní, a preto ich časť obsahuje aj uzemnený koplanárny vlnovod.

2.2.2 Mikropásikové vedenie

Nesymetrické mikropásikové vedenie, pozostáva z tenkého vodivého pásiku nanesenom na dielektrický substrát, ktorý je zo spodnej vrstvy pokrytý vodivou vrstvou plniacou zemniacu funkciu. Na obrázku 3 je vľavo zobrazený trojrozmerný model mikropásikového vedenia s uvedenými charakterizujúcimi veličinami do ktorých patria fyzikálne parametre dielektrika, geometrické rozmery a technologické vplyvy výroby ako je povrchová drsnosť metalizácie a nedoleptanie/podleptanie metalizácie. Charakteristickú impedanciu mikropásika Z_0 určuje pomer šírky vodiča W k hrúbke substrátu H charakterizovaného jeho relatívnou permitivitou ε_r . Z hľadiska funkčnosti VF obvodov musí mať dielektrický substrát čo najnižšie dielektrické straty $tan(\delta)$, vysokú čistotu materiálu, konštantnú permitivitu, konštantnú hrúbku, čo najnižšiu drsnosť povrchu a čo najmenšiu tepelnú rozitažnosť. Spôsob rozloženia poľa na mikropásikovom vedení je zobrazený na obrázku 3 vpravo. Mikropásikové vedenia sú najpouživanejšie typy planárnych vedení vo VF obvodoch pre ich jednoduchú konštrukciu a nižšiu náročnosť na technologické možnosti výroby.



Obr. 3. Trojrozmerné zobrazenie mikropásikového vedenia s charakterizujúcimi veličinami vľavo a rozloženie poľa mikropásikového vedenia v reze vpravo.

2.2.3 Uzemnený koplanárny vlnovod

Uzemnený koplanárny vlnovod má takmer rovnakú konštrukciu ako nesymetrické mikropásikové vedenie s rozdielom súbežne umiestených zemniacich polôch vo vzdialenosti S od vodivého (signálového) pásika na povrchu substrátu. Zemniace plochy na vrchu substrátu sú štandardne prepojené so spodnou zemniacou metalizáciou via prekovmi. Na obrázku 4 je vľavo zobrazený trojrozmerný model uzemneného koplanárneho vlnovodu s uvedenými charakterizujúcimi veličinami do ktorých patria fyzikálne parametre dielektrika, geometrické rozmery a technologické vplyvy výroby ako je povrchová drsnosť metalizácie a nedoleptanie/podleptanie metalizácie. Charakteristickú impedanciu vedenia Z_0 určuje pomer šírky vodiča W k hrúbke substrátu H charakterizovaného jeho relatívnou permitivitou ε_r a tiež vzdialenosť S zemniacich plôch od stredného signálového pásika. Pri uzemnených koplanárnych vlnovodoch sa kladú rovnaké fyzikálne požiadavky na dielektrický substrát ako pri mikropásikových vedeniach. Spôsob rozloženia poľa na uzemnenom koplanárnom vlnovode je zobrazený na obrázku 4 vpravo. Koplanárny vlnovod má lepšie elektrické vlastnosti z hľadiska merania ako mikropásiové vedenia a ponúka jednoduchšie prepojenie diskrétnych súčiastok so zemou, avšak jeho konštrukcia je náročnejšia na technológiu výroby, nakoľko pozdĺž signálového vedenia je nutné dodržať úzku homogénnu medzeru.



Obr. 4. Trojrozmerné zobrazenie uzemneného koplanárneho vedenia s charakterizujúcimi veličinami vľavo a rozloženie poľa uzemneného koplanárneho vedenia v reze vpravo.

3 Návrh pasívnych prvkov pre meranie obvodov antikolízneho radaru

Návrh všetkých obvodov a prvkov bol realizovaný v simulačnom programe Advanced design system (ADS) od spoločnosti Keysight Technologoies.

3.1 Použitý substrát

Všetky obvody antikolízneho radaru sú navrhované na substráte RT/duroid 5880 od spoločnosti Rogers Corporation. Základné vlastnosti substrátu sú uvedené v tabuľke 1 [6].

Tab. 1. Vlastnosti substrátu RT/duroid 5880.

Vlastnosti substrátu PTFE laminát	RT/duroid 5880
Relatívna permitivita ε_R	2,2
Dielektrické straty $tg(\delta)$	0,0009
Hrúbka <i>h</i> [mm]	0,254
Metalizácia	meď
Hrúbka metalizácie t [µm]	18
Pokovanie technickým zlatom s hrúbkou [µm]*	1

* nie sú uvažované v simuláciách

3.2 Návrh adaptéra

Pre potreby merania obvodov antikolízneho radaru v našich laboratórnych podmienkach bol navrhnutý širokopásmový adaptér na prepojenie koplanárneho vlnovodu (obrázok 4) a mikropásikového vedenia (obrázok 3).

Na adaptér sú kladené nasledovné požiadavky, ktoré sme sa snažili dosiahnuť:

- Širokopásmovosť
- Maximálny útlm odrazu na vstupe/výstupe
- Zachovanie impedancie obvodu $Z_0=50\Omega$
- Minimálny útlm prenosu
- Čo najmenšie rozmery
- Vyrobiteľnosť
- Nízka cena

Návrh spočíva v prispôsobení mikropásikového obvodu ku koplanárnemu vlnovodu pri súčasnom dodržaní konštantnej charakteristickej impedancie $Z0 = 50\Omega$ oboch vedení ako aj pozdĺž prechodu.

3.2.1 Metóda riešenia

Navrhnutý adaptér je realizovaný so snahou, o čo najnižší odraz medzi mikropásikovým vedením (obrázok 3) a uzemneným koplanárnym vlnovodom (obrázok 4). Uzemnený koplanárny vlnovod bol vybraný pre takmer rovnakú konštrukciu mikropásikovému vedeniu na ktorom sú navrhnuté obvody antikolízneho radaru, čo je podmienkou pre možnosť implementovania adaptéra na ten istý substrát. Uzemnený koplanárny vlnovod má výhodu vo via prekovoch, ktoré potláčajú nežiaduce módy šírenia.

Adaptér sa skladá z homogénneho mikropásikového vedenia, z ktorého prechádza do prispôsobovacieho mikropásikového vedenia. Prispôsobovaciemu vedeniu sa plynule zmenšuje šírka, až po šírku stredného vodiča koplanárneho vlnovodu, s ktorým je prepojené. Pozdĺž stredného signálového pásika koplanárneho vlnovodu sú zemniace plochy prepojené via prekovmi so spodnou uzemňovacou metalizáciou substrátu. Na zemniace plochy je naviazané predlžujúce zaoblené vedenie z oboch strán istej vzdialenosti od prispôsobovacieho mikropásika pre zväčšenie šírky pásma.

Schéma návrhu je zobrazená na obrázku 5 so zobrazenými kótami rozmerov, ktorých zmenou veľkostí upravujeme parametre adaptéra.



Obr. 5. Bloková schéma adaptéra s kótami charakterizujúcimi jeho vlastnosti.

Prvým krokom v návrhu bolo vypočítanie geometrických rozmerov jednotlivých úsekov vedení z požadovaných elektrických vlastností, kde pre nás bola dôležitá hlavne impedancia Z_0 , ktorá musí zodpovedať hodnote 50 Ω , aby nevznikali odrazy, nakoľko antikolízny radar aj merací systém pracujú s impedanciu 50 Ω . Geometrické rozmery sme vypočítali v nástroji Line Calc, ktorý je súčasťou návrhového programu ADS.

Následne bola navrhnutá počiatočná schéma zapojenia, ktorá je zobrazená na obrázku 6. Schéma pozostáva z knižničných modelov vedení, ktorými disponuje ADS, avšak pri koplanárnych vlnovodoch máme len ideálne modely pre obvodovú simuláciu a modely s diskontinuitami a zemniacimi plochami absentujú. V týchto ideálnych modeloch vedení sme zadefinovali vypočítané geometrické parametre a následne vyšetrili S-parametre adaptéra.

		CPWG CPW3 Subst="C W=0.609 G=0.125 L=4.23 m	PWSub1 mm mm	MTA Tape Sub W1= W2= L=6.	PER er3 st="MSi =0.609 r =0.764 r 2 mm {	ub1" nm nm o}	M TL SI W L=	LIN .3 ubst="MSu '=0.764 mi =4.6 mm	ıb 1" m
\le \	ermi						Te	em.	$ \leq $
.	vum=1 (=50 Ol	hm .					Te	em2 um=2	. २ .
Ŧ		· · · · ·				• •	Z	=50 Ohm	Ŧ

Obr. 6. Základná schéma zapojenia v schématickom editore.

Po vyšetrení počiatočných S-parametrov sme optimalizovali geometrické rozmery ideálnych modelov vedení pre získanie čo najnižšieho útlmu odrazu na vstupe/výstupe (S11/S22) a čo najnižšieho útlmu prenosu/ spätného prenosu (S21/S12) pre širokopásmový adaptér. Rozmery z obrázku 6 sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 2. Optimálne rozmery pre dĺžku vedení adaptéra.

[mm]	Mikropásikové	Prisposobovací	Koplanárne
	vedenie	mikropásik	vedenie
Dĺžka <i>L</i>	4.6	6.2	4.6
Šírka W1	0.76	0.61	0.61
Šírka W2	-	0.76	-
Medzera G	-	-	0.125

Vyšetrením optimalizovaného adaptéra z ideálnych modelov vedení sme získali S-parametre, ktoré sú zobrazené na obrázku 7, kde je možné vidieť, že útlm odrazu na vstupe (S11) a výstupe (S22) sa pohybuje v rozsahu 21 dB až 26 dB.



Obr. 7. Útlm odrazu na vstupe / výstupe (S11/S22) obvodovej simulácie adaptéra s ideálnymi prvkami.

Optimalizovaný adaptér sme vyexpedovali zo schématického simulátora do editora planárnych štruktúr, ktorý obsahuje aj elektromagnetický simulátor (EM) Momentum Microwave pre presnejšie vyšetrenie S-parametrov. Na obrázku 8 je zobrazený základný tvar adaptéra so zemniacimi plochami pripojenými via prekovmi so spodnou uzemňovacou metalizáciou substrátu.



Obr. 8. Topografické zobrazenie neprispôsobeného adaptéra.

Výsledné vyšetrenie S-parametrov v elektromagnetickom (EM) simulátore ukázalo, že vplyvom diskontinuít S-parametre vykazujú menšiu širokopásmovosť a tiež nižší útlm odrazu na vstupe/výstupe, čo možno vidieť na obrázku 9. Adaptér treba vhodne impedančne prispôsobiť, nakoľko zvlnenie a ostré minimá (nehomogenity) v charakteristike sú obrazom zlého impedančného prispôsobenia. Toto zhoršenie sa preukázalo dôsledkom realistickej simulácie, ktorá nevychádza z ideálnych prvkov, ale vyšetruje obvod ako planárnu štruktúru.



Obr. 9. Útlm odrazu na vstupe / výstupe (S11/S22) elektromagnetickej simulácie neprispôsobeného adaptéra.

V návrhu sa pokračovalo impedančným prispôsobením adaptéra, ktorý je zobrazený na obrázku 10. Prispôsobenie spočíva v predĺžení zemniacich plôch pozdĺž mikropásika s narastajúcou šírkou, ktorý spája koplanárny vlnovod a mikropásikové vedenie. Tieto zemniace plôšky sú počiatočnou linearizovanou náhradou za zaoblené úseky vedenia, aby sme vyšetrili vplyv ich dĺžky a uhlu stúpania odklonu od mikropásika s narastajúcou šírkou

v S-parametroch adaptéra. Použitie rozmerov a umiestenie prekovov sa uskutočnilo podľa návrhových pravidiel a noriem výrobcov plošných spojov, aby bol návrh vyrobiteľný.



Obr. 10. Topografické zobrazenie adaptéra s linearizovanými prispôsobovacími vedeniami.

Vyšetrenie v EM simulátore ukázalo, že sa zredukoval počet nehomogenít v charakteristike výsledných S-parametrov použitím linearizovaných úsekov vedenia, ale adaptér stále nie je dostatočne impedančne prispôsobený. Priebehy S-parametrov sú zobrazené na obrázku 11, kde v priebehu útlmu odrazu na bstupe S11 aj S22 ja vidieť pomerne prudko klesajúce loklálne minimum pri frekvencii 16GHz a v priebehu útlmu odrazu na vstupe sa vyskytuje ďalšie takéto okálne minimum pri 45GHz.



Obr. 11. Útlm odrazu na vstupe / výstupe (S11/S22) elektromagnetickej simulácie linearizovane prispôsobeného adaptéra.

Ďalšími iteráciami a použitím zaoblených prisposobovacích obvodov sme dosiahli výsledný tvar štruktúry adaptéra, ktorý je zobrazený na obrázku 12.



Obr. 12. Topografické zobrazenie adaptéra so zaoblenými prispôsobovacími vedeniami.

Výsledky simulácie S-parametrov sú zobrazené na obrázku 13. Adaptér vykazuje útlm odrazu na vstupe/výstupe 21 dB pri 25GHz s miernym vzostupom pri nižších frekvenciách. Pri vysokých frekvenciách už nedokážeme obvod optimálne impedančne prispôsobiť z dôvodu vzniku vyšších módov v úsekoch vedeniach, ktorých šírka nás limituje z dôvodu dodržania 50 Ω impedancie pri 25GHz. Na obrázku 13 je tiež zobrazený útlmu prenosu, kde vidieť, že v celom vyšetrovanom rozsahu neprekračuje útlm 0,5 dB, avšak v reálnom obvode bude útlm o niečo vyšší z dôvodu materiálových vlastností aj technologických procesov.



Obr. 13. Výsledné S-parametre elektromagnetickej simulácie adaptéra so zaoblenými prispôsobovacími vedeniami.

Výslednou simuláciou sme vyšetrili S-parametre dvoch adaptérov zapojených oproti sebe, ktoré je zobrazené na obrázku 14.

Meranie prvkov ako zosilňovač pre antikolízny radar alebo iných dvojportov vyžaduje použitie adaptéra na vstupnej aj výstupnej časti, a teda sme si overili ich celkové impedančné prispôsobenie a vplyv na výsledok merania.



Obr. 14. Výsledné topografické zobrazenie adaptéra.



Obr. 15. Výsledné S-parametre elektromagnetickej simulácie adaptérov v zapojení pre meranie dvojportov.

Na obrázku 15 sú zobrazené výsledné S-parametre adaptéra, kde útlm odrazu na vstupe/výstupe (S11/S22) v rozsahu 0 - 25 GHz dosahuje požadovaný útlm 20dB a potom mierne klesá. Útlm prenosu pri 25GHz je menší ako 0,5 dB.

3.3 Návrh antény

Pre kompletnosť obvodu a možnosť otestovať funkčnosť celého zapojeného radarového systému bolo potrebné navrhnúť planárnu úzkopásmovú anténu, ktorej úlohou bude vyžarovať signál z obvodu. Navrhnutá anténa pre antikolízny radar v práci [7] využíva viacvrstvový substrát a nie je možné ju použiť nakoľko výrobca, ktorý bol oslovený z dôvodu výroby navrhnutých obvodov dokáže vyrobiť len dvojvrstvý plošný spoj požadovaného substrátu. V našom prípade je možne použiť len jednu vrstvu pre návrh motívu, lebo druhá slúži ako zemniaca plocha. Preto bolo nutné urýchlene navrhnúť impedančne prispôsobenú anténu s čo najvyšším ziskom.

3.3.1 Metóda návrhu

Navrhnutá anténa je realizovaná so snahou o čo najnižší odraz signálu na napájači a o rozmiestnenie rezonančných (vyžarovacích) prvkov pre čo najvyšší zisk a priamočiaru smerovosť vyžarovacieho diagramu. Keďže je nutné uvažovať len s dvojvrstvým

substrátom, tak bola zvolená jednoduchá konštrukcia paralelného zapojenia 2 radov vyžarovacích prvkov.

Pri návrhu sme vychádzali zo základnej vyžarovacej plôšky, ktorej šírka a dĺžka bola približná dĺžke $\lambda/2$. Schematické zobrazenie základnej antény aj s rozmermi definujúcim jej vlastnosti je zobrazené na obrázku 16.



Obr. 16. Schematické zobrazenie základnej antény aj s rozmermi definujúcim jej vlastnosti.

Navrhnutý vyžarovací prvok bol vyšetrený a optimalizovaný pre dosiahnutie vyžarovacieho pásma presne pre frekvenciu 25GHz. Cieľom bolo dosiahnuť zisk takéhoto vyžarovacieho prvku 6dBi, čo je štandardom pre takéto antény. Na obrázku 17 je vľavo zobrazená charakteristika útlmu odrazu S11, ktorý pre našu frekvenciu dosahuje 38dB a vpravo zobrazuje fázu v závislosti od frekvencie na vstupe (S11).



Obr. 17. Zobrazenie koeficientu útlmu odrazu S11 a fázy v závislosti od frekvencie na vstupe.

Výsledný zisk a smerovosť navrhnutého vyžarovacieho elementu je zobrazený na obrázku 18. Zisk je 6,8 dBi a smerovosť 7,48 dBi.



Obr. 18. Výsledný zisk a smerovosť navrhnutého vyžarovacieho elementu.

Následne boli navrhnuté dve antény, ktoré sa skladajú z paralelne prepojených dvoch radov vyžarovacích prvkov, a to z dôvodu dosiahnutia vyššieho zisku a vhodnejšieho vyžarovacieho diagramu. Pre každú anténu bolo potrebné mierne optimalizovať rozmery vyžarovacích elementov a tiež dĺžky napájačov pre dosiahnutie pásma 25GHz.

3.3.2 Anténa so štyroma vyžarovacími elementmi

Anténa so štyroma vyžarovacími elementmi bola navrhnutá pre získanie vyššieho zisku a smerovosti. Veľkosti rezonančných plôch, ich vzdialenosti od seba a veľkosti napájacích členov boli optimalizované pre čo najlepšie prispôsobenie pre frekvenciu 25 GHz. Výsledný tvar tejto antény je možné vidieť na obrázku 19, kde je vľavo topografické zobrazenie a vpravo rozloženie prúdovej hustoty antény pre pracovnú frekvenciu.



Obr. 19. Topografické zobrazenie štvorprvkovej antény (vľavo) aj s rozložením prúdovej hustoty (vpravo).

Anténa dosahuje koeficient útlmu odrazu na vstupe S11 = 32dB, ktorý je zobrazený na obrázku 20 aj so závislosť fázy od frekvencie.



Obr. 20. Koeficent útlmu odrazu S11 a závislosť fázy od frekvencie.

Zisk navrhnutej štvorprvkovej antény dosahuje 12,7 dBi a smerovosť 13,470 dBi, ktoré sú zobrazené na obrázku 21 aj s 3D vizualizáciou vyžarovacieho diagramu pri frekvenci 25GHz.



Obr. 21. Grafické zobrazenie zisku a smerovosti antény aj s 3D modelom vyžarovacieho diagramu.

Navrhnutá štvorprvková planárna anténa dosahuje útlm odrazu na vstupe S11 32dB, zisk 12,7dBi a smerovosť 13,4 dBi, čo je postačujúce pre použitie na meracie účely pre obvodové prvky antikolízneho radaru.

3.3.3 Anténa s ôsmimi vyžarovacími elementmi

Anténa s ôsmimi vyžarovacími prvkami bola navrhnutá pre dosiahnutie lepších vyžarovacích vlastností ako štvorprvková anténa. Nakoľko pridanie ďaších rezonančných plôch znížilo vstupný koeficient odrazu, zisk, smerovosť a tiež negatívne ovplyvnilo vyžarovací diagram bolo nutné anténu optimalizovať.

Výsledný tvar tejto antény je možné vidieť na obrázku 22, kde je vľavo topografické zobrazenie a vpravo rozloženie prúdovej hustoty antény pre pracovnú frekvenciu.



Obr. 22. Topografické zobrazenie osemprvkovej antény (vľavo) aj s rozložením prúdovej hustoty (vpravo).

Anténa dosahuje koeficient útlmu odrazu na vstupe S11 = 38dB, ktorý je zobrazený na obrázku 23 aj s fázovým diagramom.



Obr. 23. Koeficent útlmu odrazu S11 a závislosť fázy od frekvencie.

Zisk navrhnutej osemprvkovej antény dosahuje 13,1 dBi a smerovosť 14,4 dBi, ktoré sú zobrazené na obrázku 24 aj s 3D vizualizáciou vyžarovacieho diagramu pri frekvenci 25GHz.



Obr. 24. Grafické zobrazenie zisku a smerovosti antény aj s 3D modelom vyžarovacieho diagramu.

Navrhnutá osemprvková planárna anténa dosahuje útlm odrazu na vstupe S11 = 38dB, zisk 13,1 dBi a smerovosť 14,3 dBi, čo je postačujúce pre použitie na meracie účely pre obvodové prvky antikolízneho radaru.

Obe navrhnuté antény slúžia len na meracie účely obovodových prvkov antikolízneho radaru a tiež overenie technologických vplyvov výroby. Pri návrhu antén bolo prihliadané na ich jednoduchosť pre možnosť ľahkej výroby a tiež na ich rozmery.

3.4 Realizované aktívne obvody antikolízneho radaru

Navrhnuté pasívne prvky slúžia na meranie aktívnych obvodov ako zosilňovač, zmiešavač a oscilátory, ktoré boli realizované v práci [2]. Na merané vstupy/výstupy realizovaných aktívnych obvodov boli pripojené meracie adaptéry.

Na obrázku 25 sú zobrazené tieto meracie adaptéry červenou farbou, kde je možné vidieť ich umiestnenie v schematicky zobrazenom hybridnom integrovanom obvode (HIO) zosilňovača antikolízneho radaru.



Obr. 25. Bloková schéma hybridného integrovaného obvodu zosilňovača pre antikolízny radar aj s umiestnenými adaptérmi pre meranie koplanárnymi sondami.

Umiestnenie meracích adaptérov na jednotlivých obvodoch sú zobrazené v obrázkoch PR1 (zosilňovač), PR2 (oscilátor č. 1), PR3(oscilátor č. 2), PR4 (oscilátor č. 3), PR5 (oscilátor č. 4), PR6 (zmiešavač) umiestených v obrazovej prílohe. Adaptéry na týchto obrázkoch zvýrazňujú červené obdĺžniky.

Použitie navrhnutej a realizovanej štvorprvkovej antény pre merania prvkov antikolízneho radaru je zobrazené na obrázku PR7 umiestnenom v obrazovej prílohe.

4 Porovnanie elektrických meraní pasívnych prvkov s elektromagnetickými simuláciami

Elektrické merania boli realizované na analyzátore E8363B PNA od spoločnosti Agilent (dnes Keysight Technologies) s frekvenčným rozsahom 10 MHz až 40 GHz [8]. Pre merania obvodov a prvkov antikolízneho radaru boli použité koplanárne meracie sondy a meracie zariadenie bolo kalibrované na keramickom substráte.

Simulácie elektromagnetického poľa boli vykonávané momentovou metódou (MoM) v simulátore planárnych štruktúr Momentum Microwave, ktorý je súčasťou návrhového programu ADS [9].

Na základe meraní vyrobených obvodových štruktúr, ktoré boli opísané vyššie je možné overiť vplyv materiálových vlastností, technológie výroby (dodržanie geometrických rozmerov výrobcom) a správnosť návrhu v porovnaní so simuláciami elektromagnetického poľa (EM).

Obvody a prvky antikolízneho radaru boli charakterizované S-parametrami. Nakoľko ide o symetrické štruktúry, v tejto kapitole sú uvedené len grafy z priebehov koeficientu útlmu odrazu na vstupe S11 a koeficientov útlmu prenosu (spätného prenosu) S12 z dôvodu zhody výsledkov kvôli symetrii až na interdigitálny kondenzátor, ktorý sa stal vplyvom výrobného procesu asymetrický.

4.1 Meranie adaptérov:

Pre zistenie vplyvu technológie výroby a porovnanie výsledkov z EM simulátora boli adaptéry pre meranie obvodových prvkov antikolízneho radaru aj samostatne vyrobené v štyroch rôznych vyhotoveniach. Dva adaptéry boli zrkadlovo prepojené proti sebe štyrmi rôznymi dĺžkami prepájacích mikropásikov, aby sme metódou viacerých dĺžok dokázali identifikovať na základe merania a elektromagnetickej (EM) resimulácie model použitého substrátu, vplyv technológie výroby a materiálových vlastností. Metódou viacerých dĺžok dokážeme presnejšie určiť model substrátu vhodný pre budúce návrhy, optimalizácie obvodov a dokážeme lepšie potlačiť vplyv systematickej chyby.

4.1.1 Adaptér 1:

Prvé vyhotovenie meracích adaptérov s celkovou dĺžkou 30,6 mm pre účely merania a charakterizácie substrátu je zobrazené na obrázku 26, hore je topografické zobrazenie a dole je jeho fotografia vyrobeného adaptéra.



Obr. 26. Merací adaptér s dĺžkou 30,6mm, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobeného adaptéra.

Na základe porovnania nameraných výsledkov so simuláciami bol adaptér resimulovaný aj so zahrnutím drsnosti povrchu a výsledok resimulácie je zobrazený aj s nameranými hodnotami pre porovnanie v obrázku 27. Resimulácia bola uskutočnená s použitím modelu substrátu RT/duroid 5880. Útlm odrazu na vstupe S11 má posunuté polohy lokálnych miním na frekvenčnej osi v oblasti 23-40 GHz voči meraniu. Tiež je zjavné, že pri frekvencii 0-12 GHz je rozdielny priebeh S11 simulácie voči meraniu. Útlm odrazu na vstupe má totožný priebeh len vo frekvenčnom rozsahu 12-24GHz.

Do simulácie bol zahrnutý aj model drsnosti povrchu metalizácie, nakoľko aj pri detailnom pohľade je voľným okom viditeľná, technologicky predpokladateľná a priebeh merania S12 mal značne prudší trend (smer) klesania ako simulácia. Pre dosiahnutie obdobného trendu bol použitý "hemispherical" (hemisférický) [9] model drsnosti, na základe ktorého sa simulácia S12 najviac priblížila k meraniu vo frekvenčnom rozsahu 0-25 GHz s použitím drsnosti 8 µm. Ako je možné vidieť v priebehu útlmu prenosu merania S12 od frekvencie 25GHz až do 40 GHz útlm vzrástol o 2,5 dB z hodnoty 1 dB, čo je viac ako dvojnásobný nárast. Dôvodom jeho vzniku je pravdepodobne vyžarovanie koplanárnych meracích sond, ktoré sú spoľahlivé do frekvencie 25 GHz.



Obr. 27. Výsledky resimulácie adaptéra 30,6mm na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Na základe vplyvu relatívnej permitivity na dĺžku vlny vo vedení bola uskutočnená resimulácia s vyššou relatívnou permitivitou $\varepsilon_R = 2,40$, čo prevyšuje desaťnásobne výrobcom udávanú toleranciu (pri $\varepsilon_R = 2,20$) $\pm 0,02$ garantovanú v technickej dokumentácii do frekvencie 40GHz [6].

Výsledky resimulácie v porovnaní s meraním zobrazuje obrázok 28. Útlm odrazu na vstupe S11 kopíruje pozíciu lokálnych miním priebehu merania na frekvenčnej osi v rozsahu 8-40GHz. Pri priebeh útlmu prenosu S12 došlo k miernemu navýšeniu útlmu až za hranicou 25 GHz.



Obr. 28. Výsledky resimulácie adaptéra 30,6mm na substráte RT/duroid 5880 s upravenou permitivitou $\varepsilon_{\rm R} = 2,40$, hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.

Následne sa pokračovalo v resimuláciach daného adaptéra na sesterskom substráte RT/duroid 5870, ktorej výsledky v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 29. Dôvodom bol viditeľný vplyv relatívnej permitivity na zmenu priebehu útlmu odrazu na vstupe S11 pri predošlej resimulácii, nakoľko RT/duroid 5870 má vyššiu relatívnu permitivitu $\varepsilon_{\rm R} = 2,33$. Resimulácia ukázala, že útlm odrazu na vstupe S11 vykazoval

výsledok viac sa približujúci k meraniu aj pri frekvenčnom rozsahu 25-40GHz. Útlm prensou S12 zostal prakticky nezmenený predošlej resimulácii. Tento substrát má mierne vyššie dielektrické straty $tan(\delta) = 0,0012$, čo spôsobilo mierne zvýšenie útlmu prenosu. Na základe týchto výsledkov vzniklo podozrenie, že pri výrobe došlo k zámene substrátu, teda použitiu tohto substrátu pre jeho veľmi podobné vlastnosti.



Obr. 29. Výsledky resimulácie adaptéra 30,6mm na substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.



Obr. 30. Výsledky resimulácie adaptéra 30,6mm na substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 220 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm

Ďalším poznatkom bol vplyv zníženia hrúbky substrátu o 34 μm. Pri hrúbke substrátu 220 μm bolo dosiahnuté v koeficiente útlmu odrazu na vstupe S11 podobné zvlnenie meraniu vo frekvenčnej oblasti 0-8 GHz čo je zobrazené na obrázku 30.

4.1.2 Adaptér 2:

Vyhotovenie meracieho adaptéra s celkovou dĺžkou 35,6 mm je zobrazené na obrázku 31, hore je topografické zobrazenie a dole je jeho reálna fotografia vyrobeného adaptéra. Tento merací adaptér je dlhší od predošlého o 5 mm, pre možnosť porovnania malého predĺženia

na zmenu výsledkov meraní aj resimulácií pri použitých rovnakých modeloch substrátu ako pri predošlej meracej vzorke adaptéra.

Grafické zobrazenie výsledkov resimulácií v porovnaní s elektrickými meraniami sú zobrazené v obrazovej prílohe.



Obr. 31. Merací adaptér s dĺžkou 35,6mm, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobeného adaptéra.

Resimulácia meracieho adaptéra s dĺžkou 35,6 mm na substráte RT/duroid 5880 vrátane modelu drsnosti poukazuje na rovnaké rozdiely meraní voči simulácii ako u predošlého adaptéra. Vplyv malého predĺženia mikropásika o 5mm spájajúceho adaptéry sa prejavil zvýšením počtu poloblúkov v priebehu koeficientu útlmu odrazu na vstupe S11. Pri frekvencii 0-10 GHz tak ako pri predošlom (30,6mm) adaptéri je výrazný rozdiel priebehu, čo je zobrazené na obrázku P1 umiestnenom v obrazovej prílohe. S11 tiež vykazuje frekvenčný posun lokálnych miním vo frekvenčnej oblasti 25-40GHz. Nameraný útlm prenosu S12 pri tomto adaptéri vykazuje prudší vzrast útlmu už od frekvencie 8GHz v porovnaní s resimuláciou. Dôvodom môže byť vyššia drsnosť alebo technologické vplyvy.

Výsledky resimulácie adaptéra so zvýšením permitivity modelu substrátu RT/duroid 5880 s $\varepsilon_{\rm R} = 2,40$ a hrúbkou 254 µm v porovnaní s meraním sú uvedené v obrázku P2 umiestnenom v obrazovej prílohe. Útlm odrazu na vstupe S11 vykazuje v tomto prípade posunutie lokálnych miním na frekvenčnej osi v intervale 17-27 GHz voči meraniu smerom k nižšej frekvencii takmer až o 2 GHz, čo inklinuje pre tento prípad k menšej relatívnej permitivite ako 2,40. Resimulovaný priebeh útlmu odrazu na vstupe S11 vo frekvenčnom pásme 27-40 GHz sa s priebehom merania prekrýva. Útlm prenosu S12 vzrástol takmer nebadateľne oproti predošlej resimulácii. Na základe výsledkov predošlej simulácie bol adaptér resimulovaný aj na sesterskom substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm. Obrázok P3 umiestnený v obrazovej prílohe zobrazuje grafické znázornenie výsledkov útlmu odrazu na vstupe S11 a útlm prenosu S12 adaptéra 35,6 mm v porovnaní s meraním. Vo frekvenčnom rozsahu 10-40 GHz sa charakteristika S11 prekrýva s meraním až na oblasť 0-10GHz. Útlm prenosu S12 je totožný s predošlou resimuláciou.

Na základe poznatku o zmene hrúbky substrát z resimulácie predošlého adaptéra bol použitý model substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 220 µm pre vyšetrenie zmien koeficientu útlmu odrazu na vstupe S11. Na obrázku P4 umiestnenom v obrazovej prílohe sú znázornené priebehy resimulácií voči meraniu S11 a S12. Pri tejto resimulácii bol dôležitý hlavne dopad zmeny hrúbky substrátu na priebeh S11 vo frekvenčnom rozsahu 0-10GHz, nakoľko pri vyšších frekvenciách sa táto zmena hrúbky neprejavuje. Útlm odrazu na vstupe S11 značne zmenil priebeh v porovnaní s priebehom pri štandardnej hrúbke substrátu s výsledkom menej priblíženým k nameraným hodnotám, ako pri predošlom adaptéri s dĺžkou 30,6 mm. V priebehu S11 pri frekvencii 5-7GHz nastalo obdobné zvlnenie no susedné zvlnenia sa značne líšia frekvenčnou vzdialenosťou miním aj o 10dB vyššou polohou maxím na amplitúdy.

4.1.3 Adaptér 3:

Resimulovaný bol ďalší adaptér s dĺžkou 45,8 mm, ktorý je zobrazený na obrázku 32, hore je topografické zobrazenie a dole je reálna fotografia vyrobeného adaptéra. Tento merací adaptér je dlhší od najkratšieho (30,6 mm) o 15,2 mm, pre možnosť porovnania predĺženia na zmenu výsledkov meraní aj resimulácií pri použitých rovnakých modeloch substrátu, ako pri predošlých meracích vzorkách adaptéra.

Grafické zobrazenie výsledkov resimulácií v porovnaní s elektrickými meraniami sú zobrazené v obrazovej prílohe.



Obr. 32. Merací adaptér s dĺžkou 45,8 mm, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobeného adaptéra.

Prvý model substrátu RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm v resimuláciach adaptéra s dĺžkou 45,8 mm tiež vykazuje pri útlme dorazu na vstupe S11 od frekvencie 25 GHz posun miním a maxím priebehu na frekvenčnej osi približne o polovicu celej šírky poloblúka, ako aj pri predošlých resimuláciach adaptérov. Útlm prenosu S12 stúpol nakoľko je meraná štruktúra dlhšia ako predošlá. V tomto prípade použitý model drsnosti 8 µm vykazuje ako pri adaptéri 30,6mm vo frekvenčnom rozsahu 0-25GHz veľmi blízke hodnoty merania voči simulácii a od frekvencie 25GHz následne meranie vykazuje podstatne väčší trend nárastu útlmu, ktorý pripisujeme vyžarovaniu prechodu z koplanárnych meracích sond na merané prvky. Výsledky resimulácie sú zobrazené na obrázku P5 umiestnenom v obrazovej prílohe.

Výsledky resimulácie adaptéra 45,8 mm so zvýšením permitivity modelu substrátu RT/duroid 5880 s ϵ R = 2,40 a hrúbkou 254 µm v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku P6 umiestený v obrazovej prílohe. Útlm odrazu na vstupe S11 vykazuje aj v tomto prípade posunutie lokálnych miním na frekvenčnej osi v intervale 17-27 GHz voči meraniu smerom k nižšej frekvencii, čo inklinuje aj pre tento prípad k menšej relatívnej premitivite ako 2,40. Resimulovaný priebeh útlmu odrazu na vstupe S11 vo frekvenčnom pásme 29-40 GHz sa s priebehom merania prekrýva. Útlm prenosu S12 bol do 27 GHz veľmi blízky meraniu tak ako pri predošlom modeli substrátu a vzrástol až pri frekvencii 37 GHz.

Na základe predošlých výsledkov sa pokračovalo v resimulácii adaptéra s použitým modelom substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm. Výsledky sú zobrazené na obrázku P7 umiestnenom v obrazovej prílohe, pri tejto vzorke je možné vidieť, že pri útlme odrazu na vstupe S11 vo frekvenčnom rozsahu 12-17 GHz a 25-35GHz sa priebeh simulácie prekrýva s meraním, avšak pri frekvencii 17-25 GHz je simulácia veľmi mierne posunutá k nižšej frekvencii . Útlm prenosu S12 sa nezmenil.

Adaptér bol následne resimulovaný s modelom substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 220 µm. Výsledky resimulácie sú zobrazené na obrázku P8 umiestnenom v obrazovej prílohe. Útlm odrazu na vstupe S11 vykazuje z použitých modelov substrátu najviac sa približujúci priebeh simulácie v porovnaní s meraním vo frekvenčnom pásme 17-40 GHz. Pri frekvenčnom rozsahu 0-8 GHz bol dosiahnutý zemnou hrúbky substrátu priebeh podobného tvaru meraniu avšak pomerovo väčší. Útlm prenosu S12 má v porovnaní s meraním väčší útlm vo frekvenčnom rozsahu 0-28 GHz aj z dôvodu vyšších dielektrických strát ako pri substráte RT/duroid 5880 a bolo by vhodnejšie použiť drsnosť 6,5 µm pre dosiahnutie ekvivalentného útlmu prenosu meraniu v pásme 0-28 GHz.

4.1.4 Adaptér 4:

Najdlhší samostatný merací adaptér s dĺžkou 80,6 mm je zobrazený na obrázku 33, hore je topografické zobrazenie a dole je reálna fotografia vyrobeného adaptéra. Tento merací adaptér je dlhší od najkratšieho (30,6) o 50 mm, pre možnosť porovnania predĺženia na zmenu výsledkov meraní aj resimulácií.



Obr. 33. Merací adaptér s dĺžkou 80,6 mm, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobeného adaptéra.

Výsledky resimulácie najdlhšieho adaptéra na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm sú zobrazené na obrázku 34. Útlm odrazu na vstupe S11 vo frekvenčnom pásme 15-24 GHz kopíruje meranie. V pásme 24-40 GHz došlo k posunu miním simulácie k vyššej frekvencii približne o polovicu celej šírky jedného poloblúkového zvlnenia ako aj pri predošlých resimuláciach. V pásme 0-13 GHz ma priebeh simulácie o 10 dB vyššiu polohou maxím na osi koeficientu útlmu odrazu na vstupe. Útlm prenosu S12 stúpol nakoľko je meraná štruktúra najdlhšia. V tomto prípade použitý model drsnosti 8 µm vykazuje ako pri predošlých adaptéroch vo frekvenčnom rozsahu 0-25 GHz veľmi blízke hodnoty merania voči simulácii a od frekvencie 25GHz následne meranie vykazuje podstatne strmší trend nárastu útlmu, ktorý pripisujeme vyžarovaniu prechodu z koplanárnych meracích sond.



Obr. 34. Výsledky resimulácie adaptéra 80,6 mm na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Výsledky resimulácie adaptéra 80,6 mm so zvýšením permitivity modelu substrátu RT/duroid 5880 s $\varepsilon_{\rm R}$ = 2,40 a hrúbkou 254 µm v porovnaní s meraním sú uvedené na

obrázku 35. Útlm odrazu na vstupe S11 vykazuje aj v tomto prípade posunutie lokálnych miním na frekvenčnej osi v takmer v celom priebehu čo jasne potvrdzuje spolu s predošlými vzorkami možnosť vylúčenie tohto modelu pri ďalších resimuláciach. Útlm prenosu S12 bol do 27GHz veľmi blízky meraniu tak ako pri predošlom modeli substrátu a vzrástol až pri frekvencii 35GHz.



Obr. 35. Výsledky resimulácie adaptéra 80,6 mm na substráte RT/duroid 5880 s upravenou permitivitou $\varepsilon_{\rm R} = 2,40$, hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.

Na základe predošlých výsledkov sa pokračovalo v resimulácii adaptéra s použitým modelom substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm. Výsledky sú zobrazené na obrázku 36, kde je možné vidieť, že pri útlme odrazu na vstupe S11 vo frekvenčnom rozsahu 12-33 GHz sa priebeh simulácie prekrýva s meraním, avšak pri frekvencii 0-12 GHz a 33-40GHz sú maximá posunuté o 5-10 dB na osi koeficientu útlmu odrazu. Minimá majú takmer zhodnú polohu s meraním na frekvenčnej osi v pásme 7-40 GHz. Útlm prenosu S12 vykazuje priebeh ako pri predošlých resimuláciach.



Obr. 36. Výsledky resimulácie adaptéra 80,6 mm na substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Ďalej bol na adaptéri preverený model substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 220 µm. Výsledky resimulácie sú zobrazené na obrázku 37. Útlm odrazu na vstupe S11 vykazuje z použitých modelov substrátu najviac sa približujúci priebeh merania v porovnaní so simuláciou vo frekvenčnom pásme 17-40 GHz. Pri frekvenčnom rozsahu 0-8 GHz bol dosiahnutý zmenou hrúbky substrátu priebeh podobného tvaru meraniu avšak s posunutou amplitúdou útlmu odrazu na vstupe S11 o približne 7dB vyššie. Útlm prenosu S12 má v porovnaní s meraním väčší útlm vo frekvenčnom rozsahu 0-28 GHz aj vplyvom vyšších dielektrických strát a bolo by vhodnejšie pre tento substrát použiť drsnosť 6,5 µm..



Obr. 37. Výsledky resimulácie adaptéra 80,6 mm na substráte RT/duroid 5870, hrúbkou 220 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

4.2 Meranie radiálneho úseku vedenia

Radiálne úseky vedenia v obvode slúžia na zabránenie prenosu vysokofrekvenčného signálu do jednosmerného (napájacieho) obvodu. Tento prvok je súčasťou každého obvodu antikolízneho radaru a je popísaný v práci [2]. Radiálne úseky vedenia v realizovaných aktívnych obvodoch sú vyznačené zeleným obdĺžnikom na obrázkoch PR1-PR7 v obrazovej prílohe. Na obrázku 38 sú zobrazené radiálne úseky vedenia umiestnené medzi dvoma meracími adaptérmi. Dĺžka celej štruktúry je 40,8 mm. Radiálne vedenia sú štandardne použité v obvodoch antikolízneho radaru s napájacím mikropásikom o polovicu užším, ako na vyrobenom meracom prípravku, a to z dôvodu zväčšenia impedancie. Merací prípravok má zachovanú šírku mikropásika pre zachovanie impedancie meracieho adaptéra. Táto zmena šírky mikropásika mala za následok posunutie maxima útlmu prenosu k nižšej frekvencii o 2,5 GHz. Maximálny útlm prenosu S12 vykazuje približne 40dB, čo je zobrazené na obrázku 39 aj s výsledkami resimulácie v porovnaní s meraním pre útlm odrazu na vstupe S11. Čo sa týka funkčnosti pre meracie účely, tento rozdiel nemá vplyv na výsledky a je možné overiť technologické vplyvy výroby a identifikovať model substrátu. Priebeh S11 a S12 sú veľmi blízke simulácii na substráte RT/duroid5880, čo poukazuje na rozdielnosť výsledkov pri ktorých štruktúry meracích adaptérov inklinovali k substrátu RT/duroid 5870. Výsledky resimulácie na substráte RT/duroid 5870 sú zobrazené na obrázku 40. Útlm odrazu na vstupe S11 je prakticky nezmenený, no útlm odrazu prenosu je posunutý o 2GHz voči meraniu.



Obr. 38. Radiálne úseky vedenia umiestnené medzi dvoma meracími adaptérmi, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobenej štruktúry.



Obr. 39. Výsledky resimulácie s meraním radiálneho úseku vedenia s adaptérmi na substráte RT/duroid 5880, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.



Obr. 40. Výsledky resimulácie s meraním radiálneho úseku vedenia s adaptérmi na substráte RT/duroid 5870, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.
4.3 Meranie antén:

Navrhnuté antény boli vyrobené s adaptérmi pripojenými na napájač, aby ich bolo možné v našich laboratórnych podmienkach odmerať z hľadiska S-parametrov.

4.3.1 Štvorprvková anténa

Štvorprvková anténa s pripojeným adaptérom je zobrazená na obrázku 41, vľavo je topografické zobrazenie a vpravo fotka vyrobenej antény.



Obr. 41. Zobrazenie štvorprvkovej antény, vľavo je topografické zobrazenie a vpravo fotka vyrobenej antény.

Výsledky resimulácie štvorprvkovej antény na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm sú zobrazené na obrázku 42. Útlm odrazu na vstupe S11 sa do frekvencie 25GHz takmer úplne zhoduje s meraním a od 27 GHz dochádza k intenzívnejšiemu zvlneniu ako pri simulácii. Fáza S11 sa prekrýva s meraním až na frekvenciu 25GHz, kde je zreteľná odchýlka.



Obr. 42. Výsledky resimulácie s meraním štvorprvkovej antény s adaptérom na substráte RT/duroid 5880, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Pokračované bolo resimuláciou štvorprvkovej antény na modely substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm a drsnosťou 8 µm. Výsledky sú zobrazené na obrázku 43. Útlm odrazu na vstupe S11 je v pásme 20-25 GHz mierne frekvenčne posunutý smerom k nižšej frekvencii približne o 1GHz, čo sa odlišuje od meraní ešte viac ako pri použitom substráte RT/duroid 5880. Väčší rozdiel je viditeľný vo fázovom priebehu S11, kde je s narastajúcou frekvenciou zväčšujúci sa rozdiel medzi meraním a simuláciou.



Obr. 43. Výsledky resimulácie s meraním štvorprvkovej antény s adaptérom na substráte RT/duroid 5870, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

4.3.2 Osemprvková anténa

Vzhľad osemprvkovej antény aj s pripojeným adaptérom je zobrazený na obrázku 44, vľavo je topografické zobrazenie a vpravo fotografia vyrobenej antény.



Obr. 44. Zobrazenie osemprvkovej antény, vľavo je topografické zobrazenie a vpravo fotka vyrobenej antény.

Výsledky resimulácie osemprvkovej antény na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou254 µm sú zobrazené na obrázku 45. Útlm odrazu na vstupe S11 sa do frekvencie 25GHz takmer úplne zhoduje s meraním a od 27GHz dochádza k intenzívnejšiemu zvlneniu charakteristiky ako pri simulácii. V pásme 23-25 GHz je útlm odrazu na vstupe posunutý oproti meraniu o vyše 5 dB pravdepodobne z dôvodu odrazu vyžiareného signálu z antény naspäť od mikroskopu umiestneného nad meranou štruktúrou počas merania. Fáza S11 sa prekrýva s meraním až na pásmo 23-25 GHz, kde sa líši.



Obr. 45. Výsledky resimulácie s meraním osemprvkovej antény s adaptérom na substráte RT/duroid 5880, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Výsledky resimulácie osemprvkovej antény na modeli substrátu RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm a drsnosťou 8 µm sú zobrazené na obrázku 46. Útlm odrazu na vstupe S11 je v pásme 22-25GHz mierne posunutý na frekvenčnej osi smerom k nižšej frekvencii približne o 1,5 GHz, a teda sa viac odchyľuje od merania v porovnaní s predošlou resimuláciou na substráte RT/duroid 5880. Väčší rozdiel je viditeľný vo fázovom priebehu S11, kde je s narastajúcou frekvenciou zväčšujúci sa rozdiel medzi meraním a simuláciou rovnako ako pri štvorprvkovej anténe s modelom substrátu RT/duroid 5870.



Obr. 46. Výsledky resimulácie s meraním osemprvkovej antény s adaptérom na substráte RT/duroid 5870, hrúbka 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

4.4 Meranie interdigitálneho kondenzátora:

Interdigitálny kondenzátor v obvode slúži na galvanické oddelenie obvodu, je súčasťou každého aktívneho obvodu antikolízneho radaru a je popísaný v práci [2]. Interdigitálne kondenzátory v realizovaných aktívnych obvodoch sú vyznačené žltým obdĺžnikom na obrázkoch PR1-PR7 v obrazovej prílohe.

Interdigitálny kondenzátor bol v najvyššej miere z vyrobených štruktúr náchylný na nedoleptanie/podleptanie pri výrobe, nakoľko jeho prenosové vlastnosti má priamy vplyv šírka medzery, a preto bol vyrobený aj zvlášť ako samostatný prvok umiestnený medzi dva meracie adaptéry, aby bolo možné samostatne preveriť jeho vlastnosti. Na obrázku 47 je v hornej časti zobrazený topografický pohľad na interdigitálny kondenzátor umiestený medzi adaptérmi a v dolnej časti fotografia vyrobeného prvku.



Obr. 47. Interdigitálny kondenzátor umiestnený medzi dvoma meracími adaptérmi, vrchná časť obrázku zobrazuje topografický tvar a spodná časť fotografiu vyrobenej štruktúry.

Výsledky resimulácie interdigitálneho kondenzátora na substráte RT/duroid 5880, hrúbkou 254 µm a výškou metalizácie 18 µm s 8 µm drsnosťou je zobrazená na obrázku 48. Útlm odrazu na vstupe S11 kopíruje meranie do frekvencie 15GHz, ďalej sa líši a čo značí aj menšia šírka pásma voči meraniu. Ďalším zistením pri resimulácii tejto štruktúry bol fakt, že aj keď ide o symetrickú štruktúru, meranie útlmu odrazu na vstupe nevykazuje rovnaký priebeh ako útlm odrazu na výstupe. Tieto zistené rozdiely pravdepodobne vznikli pri technologickom procese výroby. Vplyvom nehomogénneho prúdenia leptadla v niektorých miestach došlo k nechcenému odleptaniu metalizácie, a teda interdigitálny kondenzátor nie je symetrický aj keď bol tak navrhnutý. Pri detailnejšom pohľade na spodnú časť obrázku 47, kde je zobrazená fotografia vyrobenej štruktúry je možne vidieť na interdigitálnom kondenzátore svetlejšie miesta metalizácie, čo svedčí o možných zmenách vlastností nakoľko sú viditeľné len na hranách z ľavej strany a teda štruktúra nie je úplne symetrická.

Priebeh útlmu prenosu S12 vykazuje útlm nie len na interdigitálnom kondenzátore, ale zahŕňa aj útlm meracieho adaptéra s dĺžkou približne 35 mm. Charakteristika simulácie sa dosť odlišuje meraniu hlavne v pásme 20-28GHz.



Obr. 48. Výsledky resimulácie s meraním interdigitálneho kondenzátora s adaptérom na substráte RT/duroid 5880, hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Na základe viditeľných zmien parametrov a približným meraním štrbiny interdigitálneho kondenzátora uvedeným v práci [2] bol na základe rozmerov šírky vrchnej, spodnej hrany nedoleptanej medzery a výšky metalizácie 18 µm vypočítaný uhol nedoleptania približne 45°. Tento profil bol zahrnutý do resimulácie ktorej výsledok na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm je zobrazený na obrázku 49. Útlm odrazu na vstupe S11 a útlm odrazu na výstupe S22 sa podstatne priblížili meraniu a odchýlky sú vo frekvenčnom pásme 25-27 GHz pre oba priebehy. Od 30 GHz vzniká v meraní S11/S22 mierne zvlnenie, čo sa v resimulácii nepreukázalo. Priebeh útlmu prenosu S12 a S21 sa priblížili meraniu tvarom priebehu v porovnaní s predošlou simuláciou.

Následne bola vykonaná resimúlácia interdigitálneho kondenzátora na substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 µm, metalizáciou 18 µm s lichobežníkovým profilom nedoleptania 45° a drsnosťou 8 µm. Výsledky sú zobrazené na obrázku 50, kde je možné vidieť frekvenčné posunutie všetkých priebehov smerom k nižšej frekvencii približne o 2GHz.



Obr. 49. Výsledky resimulácie s meraním interdigitálneho kondenzátora s adaptérom na substráte RT/duroid 5880, hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm lichobežníkového profilu so stúpaním 45° a drsnosťou 8 μm.



Obr. 50. Výsledky resimulácie s meraním interdigitálneho kondenzátora s adaptérom na substráte RT/duroid 5870, hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm lichobežníkového profilu so stúpaním 45° a drsnosťou 8 μm.

Vyhodnotenie resimulácií pasívnych prvkov :

Na základe resimulácií meracích adaptérov štyroch rôznych dĺžok sa predpokladalo, že pri výrobe došlo zrejme k zámene substrátu zo žiadaného RT/duroidu 5880 hrúbky 254 um na sesterský substrát s vyššou permitivitou RT/duroid 5870 s mierne nedodržanou hrúbkou, nakoľko vplyv hrúbky substrátu sa prejavil pri nízkych frekvenciách. Pokračovaním v resimuláciach d'alších prvkov, ale táto teória potvrdená nebola nakoľko ostatné resimulácie inklinujú k návrhovému substrátu RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm. Pri resimuláciach bola určená drsnosť, na základe modelu drsnosti metalizácie zahrnutej v modely substrátu. Povrchová drsnosť metalizácie resimuláciami vychádza na 7-8 µm, čo je takmer polovica hrúbky metalizácie, čo je ťažko posúditeľné voľným okom a na vzorke bola následne vykonané vyšetrenie povrchovej drsnosti. Ďalším hodnotným poznatkom bolo zistenie spôsobenia asymetrie na symetrickej štruktúre z dôvodu nehomogénneho prúdenia leptadla a tiež vytvorenie lichobežníkového profilu medzery nedoleptaním. Nakoľko sme dospeli k protichodným výsledkom, tak bolo nutné pre pokračovanie pristúpiť k mikroskopickým pre získanie skutočných rozmerov a realistického modelu substrátu pre meraniam resimulácie a úpravu obvodov antikolízneho radaru.

5 Mikroskopické merania

5.1 Drsnosť povrchu

Ako resimulácie ukázali do návrhu je potrebné zahrnúť aj vplyv drsnosti povrchov z dôvodu skin efektu, čo môže mať za následok značné zvýšenie útlmu prenosu navrhovaného obvodu. Pre získanie skutočnej drsnosti povrchu bolo na vzorke obvodu vykonané meranie drsnosti povrchov na UEF FEI STU. Na obrázku 51 vľavo je zobrazená drsnosť metalizácie zo strany pozlátenej vrstvy metalizácie (pokovania) a vpravo je zobrazená drsnosť od medenej vrstvy (od substrátu).



Obr. 51. Zobrazená drsnosť pozlátenej vrstvy vľavo, zobrazená drsnosť od medenej vrstvy – strana od substrátu vpravo.



Obr. 52. Grafické zobrazenie drsnosti z merania pozlátenej vrstvy vľavo a merania od medenej vrstvy – strana od substrátu vpravo.

Výsledné namerané drsnosti sú zo strany pozlátenej strany v troch meraniach 510, 710, 550 nm a zo strany dielektrika v dvoch meraniach 373, 386 nm. Grafické zobrazenie z merania pozlátenej vrstvy je zobrazené na obrázku 52 vľavo a zo strany dielektrika vpravo.

5.2 Meranie optickým mikroskopom

Na základe podozrení, že došlo pri výrobe k nedodržaniu geometrických rozmerov bolo dôležité preveriť kvalitu štruktúry vyrobených obvodov a dodržanie požadovaných rozmerov na mikrometrickej úrovni.

Meranie sa realizovalo optickým mikroskopom. Leptané štrbiny obvodových prvkov, ktoré boli vyrobené blízko okraju dosky substrátu poukazujú na väčšie nedoleptanie voči tým, ktoré boli umiestnené v blízkosti stredu dosky substrátu. Rozmiestnenie obvodov na doske substrátu je zobrazené na obrázku P9 umiestnenom v obrazovej prílohe.

Nedoleptanie s líšilo nie len od miesta uloženia prvku na doske substrátu vo výrobe, ale aj od šírky a tvaru leptanej medzery. Proces leptania vytvoril štrbiny nerovnomerného lichobežníkového tvaru s užšou šírkou na spodnej hrane pri substráte a širšou pri vrchu metalizácie. Leptané pozdĺžne šírky medzery fluktuovali aj v miestach, kde mali byť homogénne. Spodné hrany metalizácie boli kostrbaté, hlavne v miestach štrbín. Pri všetkých prvkoch sa hrany výrazne zaoblili hlavne na spodnej strane metalizácie vplyvom nedoleptania.

Tieto poruchy možno pozorovať aj v prvkoch, ktoré boli umiesené blízko stredu plochy substrátu avšak v menšom rozsahu, načo je potrebné prihliadať pri budúcom návrhu a rozmiestňovaní obvodov na substrát.

Mikroskopickým meraním interdigitálneho kondenzátora sa potvrdilo nedoleptanie lichobežníkového tvaru, ktoré nebolo rovnomerné a namerané rozmery sú uvedené v tabuľke 3. Tabuľka obsahuje rozmery medzery pri vrchnej aj spodnej hrane metalizácie. Rozmery boli merané na medzere medzi dvomi prstami interdigitálneho kondenzátora.

Tab. 3.	Zobrazenie rozmerov	medzere medzi	dvomi prstam	i interdigitálneho
kondenzá	tora.			

Medzera pri vrchnej hrane	128	137,6	134,4	134,4	131,2	134,4
metalizácie [µm]						
Medzera pri spodnej hrane	71,2	69,6	99,2	-	-	-
metalizácie [µm]						

Preverením medzery medzi prstom a náprotivnou stranou interdigitálneho kondenzátora sme pozorovali rozdiely v šírke v porovnaní s medzerou medzi prstami. Medzera bola celkovo širšia aj pri strane substrátu aj pri vrchnej hrane metalizácie. Výsledky sú zaznamenané v tabuľke 4.

Tab. 4.Zobrazenie rozmerov medzery medzi prstom a náprotivnou stranouinterdigitálneho kondenzátora.

Modzora pri vrchnoj	145.6	145.6	134.4	137.6	128
weuzera pri viciliej	145,0	145,0	134,4	157,0	120
hrane metalizácie[µm]					
Medzera pri spodnej	112	115,2	-	-	-
hrane metalizácie [µm]					

Meranie nedoleptania štrbiny adaptéra bolo vykonané v mieste od koplanárneho vlnovodu smerom k mikropásiku. Namerané rozmery štrbiny adaptéra sú uvedené v tabuľke 5. Tabuľka 5 obsahuje namerané rozmery pozdĺž štrbiny koplanárneho vlnovodu až do miesta, kým sa zaoblené zemniace úseky vedenia nevzdialia od signálového mikropásika natoľko, že ich vzdialenosť od seba presahuje maximálny rozsah stupnice v okulári mikroskopu.

Tab. 5.	Zobrazenie rozr	nerov štrbiny v	adaptéri	Oscilátora	č.3.
---------	-----------------	-----------------	----------	------------	------

Medzera pri vrchnej	176	160	160	158,4	172,8	246,4	256	310,4
hrane								
metalizácie[µm]								
Medzera pri spodnej	140,8	128	118,4	118,4	137,6	172,8	227,2	275,2
hrane metalizácie								
[µm]								

Následne bol mikroskopicky zmeraný aj najkratší merací adaptér (30,6 mm). Výsledky merania nedoleptania štrbiny adaptéra sú zobrazené v tabuľke 6.

Medzera pri vrchnej								
hrane metalizácie[µm]	176	172,8	169,6	172,8	169,6	220,8	300,8	320
Medzera pri spodnej								
hrane metalizácie								
[µm]	140,8	137,6	134,4	131,2	134,4	179,2	268,8	278,4

Tab. 6. Zobrazenie rozmerov štrbiny v adaptéri 30,6mm.

Adaptér v obvode oscilátora č.4, bol mikroskopický zmeraný a rozmery sú zobrazené v tabuľke 7.

Tab. 7. Zobrazenie rozmerov štrbiny v adaptéri Oscilátora č.4.

Medzera pri vrchnej								
hrane								
metalizácie[µm]	168	163,2	163,2	156,8	163,2	240	275,2	304
Medzera pri spodnej								
hrane metalizácie								
[µm]	140,8	124,8	128	124,8	131,2	204,8	236,8	272

Kostrbaté nehomogenity na spodnej hrane metalizácie v mieste vyleptanej medzery sa pohybujú v priemere približne 8 µm.

Meranie ukázalo, že každá štruktúra má lichobežníkový tvar vyleptanej medzery s kostrbatým reliéfom spodnej hrany. Tento mikroskop nedisponoval kamerou pre zaznamenanie obrazu a rozmery bolo možné merať len stupnicou v okulári. Meranie rozmerov potvrdilo že rozmery štrbín kolíšu v závislosti od prúdenia leptadla. Týmto meraním sme získali prehľad o kvalite vyrobených obvodov. Namerané hodnoty sme porovnali a zhodnotili, že je nutné opakovať meranie obvodov mikroskopom s väčším priblížením, väčším zorným poľom a zberom dát.

5.3 Meranie optickým interferenčným profilometrom Contour GT-K1

Na základe zistení z predošlých meraní na optickom mikroskope bolo žiaduce presnejšie meranie geometrických rozmerov vyrobených obvodov a prvkov pre získanie podrobného prehľadu o dodržaní resp. nedodržaní rozmerov zo strany výrobcu na mikrometrickej úrovni. Nasledujúce merania boli vykonané na optickom interferenčnom profilometri Contour GT-K1 v Medzinárodnom laserovom centre (MLC).

Na obrázku 53 je zobrazený pohľad na povrch metalizácie, ktorý znázorňuje povrchovú drsnosť. Na spodnej časti obrázku je viditeľná hrana vyleptanej medzery, ktorá evidentne nie je kolmá.



Obr. 53. Zobrazenie povrchu aj s hranou mikropásika z profilometra.

5.3.1 Meranie výšky metalizácie

Hrúbka metalizácie uvažovaná v návrhu bola vybraná na základe dostupných rozmerov u výrobcu. Ideálne by bolo použitie najnižšej metalizácie, čo ponúka výrobca substrátu, a to je 9 μm, no takýto substrát nebol dostupný v spoločnosti, ktorá bola oslovená pre výrobu obvodov (uvedená v [2]). Pri frekvencii 25 GHz je z dôvodu skin efektu väčšina prúdovej hustoty sústredená v hĺbke do 0.4123 μm od povrchu, a teda bolo vhodné použiť čo najnižšiu výšku metalizácie. Nižšou výškou metalizácie by sa skrátil čas leptania a hlavne zmenšil profil (uhol) nedoleptania. Opak bol pravdou a pri požiadavke o výrobu obvodov na substráte s hrúbkou metalizácie 18 μm meranie ukázalo, že metalizácia má hrúbku 35 μm. Dôsledky ktoré vznikli technológiou výroby čiastočne umocnila dvojnásobná výška metalizácie, ako bola požadovaná. Povrch nameranej výšky metalizácie kolíše približne o 5 μm. Merania poukázali, že kolísanie hrúbky metalizácie sa nevyskytuje len v blízkosti hrany leptanej medzery, ale aj na ploche povrchu obvodov v rôznom rozsahu.

5.3.2 Meranie interdigitálneho kondenzátora (väzobného člena pre galvanické oddelenie)

Najväčšia pozornosť pri meraní bola venovaná interdigitálnemu kondenzátoru, keďže jeho štruktúra bola najnáchylnejšia na zmenu vlastností vplyvom nedoleptania z dôvodu 100 µm štrbiny, ktorej šírka zohráva kľúčovú úlohu pre prenosové vlastnosti obvodu a je na hrane technologických možností výrobcu. Na obrázku 54 je zobrazený pohľad tejto štruktúry, na ktorej sú zjavne viditeľné stopy po prúdení leptadla a je vidieť, že interdigitálny kondenzátor už nie je dokonale symetrický. Pri pohľade na obrázok 54 môžeme konštatovať, že z ľavej strany prúdilo leptadlo, ktoré vyleptalo do metalizácie nežiaduce tvary na hranách a ani výška metalizácie nie je rovnaká.



Obr. 54. Zobrazenie interdigitálneho kondenzátora aj s viditeľnými stopami po prúdení leptadla.

Nežiaduce povrchové odleptanie dosiahlo až do vzdialenosti (plošnej) 233 µm v mieste pripájania mikropásika k interdigitálnemu kondenzátoru. Merania vrchnej hrany medzery boli uskutočnené na viacerých miestach s výsledkami uvedenými v tabuľke 8, kde je zjavné, že medzera kolíše a je nerovnomerná. Menovitá šírka medzery uvažovaná v návrhu predstavuje 100 µm.

Tab. 8. Rozmery medzery merané na povrchu metalizácie.

Medzera interdigitálneho kondenzátora meraná vo viacerých miestach povrchu									
[µm]	140	133,9	144,2	147,6	151,1	151	157,9		

Pri vyšetrení medzery vyleptanej okolo "prstu" interdigitálneho kondenzátora je vidieť lichobežníkový tvar nedoleptania, ktorý je odlišný v závislosti na jej polohe. Túto rozdielnosť interpretuje obrázok 55, kde je možné v rámci priblíženia mikroskopu vidieť modrou farbou zobrazený kostrbatý reliéf spodnej hrany s miernym kolísaním šírky medzery. Vrchnú vrstvu metalizácie interpretuje na obrázku červená farba, ktorá prechádza do oranžovej so znižujúcou sa výškou metalizácie. Pri pohľade na vrchnú metalizáciu je zreteľné nerovnomerné nedoleptanie. Na obrázku 56 je graficky znázornená premenlivá výška povrchu metalizácie. Kurzory zobrazujú medzeru z obrázku 55. Rozdiel výšky metalizácie medzi pravou a ľavou vrchnou hranou je približne 5 µm, čo spôsobilo prúdenie leptadla.



Obr. 55. Záber na medzeru medzi prstom a náprotivnou stranou uchytenia protichodných prstov interdigitálneho kondenzátora, vľavo kurzory zobrazujúce spodnú hranu medzery a vpravo vrchnú hranu medzery.



Obr. 56. Grafické zobrazenie zmeny výšky metalizácie na povrchu interdigitálneho kondenzátoru

Pre detailnejší prehľad o lichobežníkovom nedoleptaní sme medzeru interdigitálneho kondenzátora vyšetrili najväčším dostupným zväčšením, aby sme overili výsledky z resimulácií. Na obrázku 57 je zobrazený záber z mikroskopu, kde je možné detailne vidieť modrou farbou vykreslený kostrbatý reliéf spodnej hrany, ktorého veľkosť kostrbatých nehomogenít bola odmeraná v priemere na 8 µm. Na základe nameranej drsnosti povrchov, ktorá bola o viac ako desaťnásobok menšia ako uvažovaná pri resimuláciach, teda môžeme konštatovať, že práve tieto nehomogenity majú zásluhu na útlme prenosu v spojení s nechceným povrchovým odleptaním, čo možno vysvetliť vplyvom okrajového efektu (Edge Effect) na vlastnosti mikropáskových vedení. Šírka medzery pri substráte sa pohybuje okolo 90 µm a pri vrchnej hrane metalizácie, ako už

bolo uvedené kolíše medzi 128-158 μm, a teda je nedoleptanie nerovnomerné Približný tvar lichobežníkového profilu v reze je zobrazený graficky z nameraných dát na obrázku 58 vľavo.



Obr. 57. Detailný záber na medzeru interdigitálneho kondenzátora aj s jasne viditeľným nedoleptaním na spodnej hrane metalizácie, šírka medzery je 90,1 μm.



Obr. 58. Graf nameraných dát zobrazujúci medzeru interdigitálneho kondenzátora aj s profilom vyleptanej medzery vľavo, profil zmeny výšky metalizácie pozdĺž celej dĺžky interdigitálneho kondenzátora zobrazený vpravo.

Celkový povrchový profil zmeny výšky metalizácie pozdĺž celej dĺžky interdigitálneho kondenzátora je zobrazený na obrázku 58 vpravo. Plošne odleptaná metalizácia z povrchu štruktúry predstavuje rozdiel do 7 µm.

5.3.3 Meranie radiálneho úseku vedenia :

Pri meraní radiálnych úsekov vedení bola pozornosť venovaná miestu pripojenia mikropásika k radiálnym úsekom vedenia, šírka prepojenia, hrana vonkajších oblúkov a ich celkové rozmery. Na obrázku 59 je zobrazený záber na štruktúru pri vyšetrovaní celkovej šírky radiálnych úsekov vedení. Pri tomto zábere je možné vidieť, že radiálne úseky majú plynulé zahnutie vonkajších hrán, ale tiež je zjavná aj nerovnomernosť povrchu, ktorého grafické zobrazenie je na obrázku 60. Radiálny úsek na pravej strane má menej drsný povrch pri mikropásiku ako radiálny úsek na ľavej strane čo zrejme spôsobilo prúdenie leptadla pri výrobe. Nameraná dĺžka oboch radiálnych úsekov aj s mikropásikom predstavuje 4,60 mm, pričom rozmer návrhu je 4,66 mm, čo je odchýlka 60 µm. Šírka jednotlivých radiálnych úsekov vedenia bola nameraná na vrchnej hrane metalizácie o 60 µm menej ako je menovitá. Pri detailnom pohľade na vonkajšie hrany radiálnych úsekov vedenia, ktorý je zobrazený na obrázku 61 je viditeľné namerané nedoleptanie 20,6 µm ktoré v konečnom dôsledku znižuje odchýlku celkovej šírky aj dĺžky vyrobenej štruktúry voči návrhovej a tento záber potvrdil aj plynulosť zahnutia vonkajšej hrany. Najkritickejšie boli rozmery v miestach, kde sa radiálne úseky napájali na mikropásik. Tieto miesta boli vyšetrené a pohľad na merané miesta je zobrazený na obrázku 62.



Obr. 59. Záber na radiálne úseky vedení aj s náznakom rozdielnosti povrchu medzi ľavým a pravým radiálnym úsekom vedenia.



Obr. 60. Grafické zobrazenie zmeny hrúbky povrchu metalizácie naprieč radiálnych úsekov vedenia.



Obr. 61. Záber na hranu radiálneho úseku vedenia s viditeľným nedoleptaním s odmeranou veľkosťou 20,6 μm.



Obr. 62. Záber na miesto spojení radiálnych úsekov vedení k mikropásiku s viditeľným nedoleptaním.

Odmeraná šírka povrchu v miesta napájajúceho sa radiálneho úseku vedenia na mikropásik je vľavo aj vpravo 230 µm. Vplyvom nedoleptania je šírka v tom istom mieste na spodnej hrane metalizácie pri substráte 269 µm vľavo a 273 µm vpravo. V návrhu je táto šírka 231 µm. V miestach prepojenia radiálnych úsekov s mikropásikom je v návrhu uvažované s prechodom hranou a vplyvom technológie výroby v týchto miestach vznikli oblúky.

5.3.4 Meranie adaptérov :

Pri resimuláciach adaptérov vznikli rozdiely v útlme prenosu v porovnaní s rovnakým modelom drsnosti, čo pravdepodobne spôsobilo rozdielne miesto umiestnenia prvku na doske substrátu. Preto boli mikroskopickému rozboru podrobené vzorky z rozdielneho uloženia na substráte.

Na obrázku 63 je zobrazený detailný záber medzery v adaptéri dĺžky 30,6 mm medzi stredným signálovým pásikom koplanárneho vlnovodu a jeho zemniacou plochou. Na obrázku 64 je zobrazený ten istý pohľad na medzeru, avšak na vzorke adaptéra s dĺžkou 35,6 mm. Ako je možné vidieť na oboch obrázkoch, aj tieto štruktúry vykazujú kostrbatý reliéf spodnej hrany približne 8 µm. Namerané rozmery medzier a hrúbky metalizácie sú zobrazené v tabuľke 9. Umiestnenie týchto adaptérov na doske substrátu bolo rozdielne o čom svedčia aj odlišné šírky medzier na rovnakom prvku, čo zapríčinilo nerovnomerné prúdenie leptadla.







Obr. 64. Obr. č. 9 Detailnejší záber na medzeru adaptéra č.2 (35,6mm) meranú v troch miestach.

	šírka me subs	dzery pri tráte	šírka medze meta	hrúbka metalizácie			
Vzorka medzery							
č.	1	2	1	2	1	2	3
Adaptér č.1 [µm]	129	130	163	166	31	31	28
Adaptér č.2 [µm]	134	137	170	170	33	31	35/31

Tab. 9. Tabuľka zobrazujúca šírky medzery na vrchnej a spodnej časti metalizácie adaptérov.



Obr. 65. Detailnejší záber na medzeru adaptéra a meranie hrúbky metalizácie zaznamenanú bližšie a ďalej od hrany, v pravo grafické zobrazenie dát.

Výška metalizácie sa líši približne o 5 µm medzi miestom vrchnej časti hrany metalizácie a metalickej plochy obvodov ďalej od hrany. Obrázok 65 zobrazuje pohľad z mikroskopu aj s dátovým zobrazením.

5.4 Meranie optickým metalografickým mikroskopom METAM

Pre vizuálne preskúmanie obvodov boli merania vykonané na metalografickom mikroskope METAM v Medzinárodnom laserovom centre (MLC). Vyšetrované boli obvody z pohľadu rozdielnosti vplyvov výroby na jednotlivých prvkoch.

5.4.1 Meranie interdigitálneho kondenzátora

Interdigitálny kondenzátor umiestnený medzi adaptérmi slúžiaci na meracie účely vykazuje značné stopy po prúdení leptadla, ktoré nechcene odleptalo časť z povrchu, čo spôsobilo asymetriu prvku. Záber na interdigitálny kondenzátor je zobrazený na obrázku 66. Svetlejšie miesta na metalizácii vyznačujú odleptanie povrchu ktoré smeruje smerom od hrany do vnútra plochy metalizácie. Ako je viditeľné tak odleptanie je nerovnomerné v závislosti od prúdenia leptadla. Takto poznačená metalizácia má viditeľne inú drsnosť povrchu v mieste nechceného odleptania povrchu v porovnaní s ostatnou metalizáciou.

Detailný pohľad na hranu "prstov" interdigitálneho kondenzátora je zobrazený na obrázku 67. Na týchto obrázkoch zreteľne vidieť medzeru s nedoleptaním lichobežníkového tvaru. Medzera má dokonca niekoľkonásobné a nerovnomerné nedoleptanie, ktoré je bližšie k dielektrku kolmejšie ako pri vrchnej hrany metalizácie. Na obrázku je tiež viditeľný kostrbatý reliéf spodnej hrany metalizácie .



Obr. 66. Pohľad z mikroskopu na interdigitálny kondenzátor slúžiaci na meracie účely uložený medzi adaptérmi.



Obr. 67. Detailný pohľad z mikroskopu na "prsty" v interdigitálnom kondenzátore.

Ďalším poznatkom bolo zistenie, že niektoré interdigitálne kondenzátory použité v obvodoch antikolízneho radaru nevykazovali také stopy po prúdení leptadla ako interdigitálny kondenzátor pre meranie a niektoré boli ešte rozsiahlejšie poznačené výrobným procesom. Štruktúry umiestnené v osadených obvodoch antikolízneho radaru nebolo možne vyšetriť týmto mikroskopom kvôli nadmernému zvlneniu obvodov a neschopnosti zaostrenia mikroskopu. Na základe priblížených fotiek môžeme predpokladať, že niektoré štruktúry budú mať ešte masívnejšie nežiaduce odleptanie a nerovnomernejší povrch metalizácie. Fotografie interdigitálnych kondenzátorov

z obvodu oscilátora č.4 sú zobrazené na obrázku 68. Tieto interdigitálne kondenzátory bolo možné len čiastočne zaostriť. Na obrázku je možné vidieť že na rozdiel od meracieho interdigitálneho kondenzátora nie je viditeľná nerovnomernosť povrchu, avšak jednoznačne možno potvrdiť nedoleptanie medzery s miernym kolísaním šírky medzery.



Obr. 68. Fotografie interdigitálnych kondenzátorov z obvodu oscilátora č.4.

5.4.2 Meranie Radiálnych úsekov vedenia:

Radiálne úseky vedenia po vizuálnom vyšetrení mikroskopom vykazujú povrchové rozdielnosti, ktoré možno vidieť na obrázku 69. Tento obrázok vľavo znázorňuje detailný pohľad na hranu a zaoblenie radiálneho vedenia s viditeľným nedoleptaním a kostrbatou spodnou hranou metalizácie. Vpravo je zobrazený mikropásik s napájajúcimi sa radiálnymi úsekmi vedenia. Vizuálny pohľad potvrdzuje nedoleptanie zistené pri predošlých meraniach a tiež aj zaoblený prechod z mikropásika na radiálne úseky vedenia po výrobnom procese. Na radiálnych úsekoch vedenia sú tiež vidieť stopy po prúdení leptadla formou nerovnomernej drsnosti povrchu a výšky metalizácie.



Obr. 69. Znázornenie detailného pohľadu na hranu a zaoblenie radiálneho vedenia s napájaním na mikropásik.

5.4.3 Meranie adaptérov a antén:

Optické vyšetrenie adaptérov ukázalo, že lichobežníkové nedoleptanie bolo najvýraznejšie v oblastiach, kde uzemňovacie úseky vedenia so signálovým mikropásikom zvierali homogénnu medzeru (v úseku koplanárneho vlnovodu), v týchto miestach bolo tiež pozorované aj jemné zvlnenie (kolísanie šírky) medzery a bol viditeľný aj kostrbatý reliéf spodnej hrany na všetkých vzorkách. Na adaptéroch sa tiež prejavil podobný typ nedoleptania ako pri interdigitálnom kondenzátore, ktoré je možné popísať ako viacnásobné lichobežńikové nedoleptanie, ktoré má kolmejší sklon bližšie k dielektriku oproti miestu vrchnej hrany metalizácie. Tvar a uhol tejto vrchnej hrany metalizácie je pri každom jednom adaptéri rozdielny. Aj na adaptéroch sú stopy po prúdení leptadla, ktoré nechcene odleptalo časť povrchovej metalizácie. Toto odleptanie povrchu metalizácie v niektorých miestach zasiahlo až takmer 100% povrchu prvku. Optické vyšetrenie ukázalo, že výrobný proces sa podpísal na každom meracom adaptéri rozdielne. Na obrázku 70 sú zobrazené pohľady na časti adaptérov v mieste koplanárneho vlnovodu, kde je viditeľný tvar vyleptanej medzery. Tiež je možné na každej vzorke vidieť odleptanú metalizáciu na povrchu, ktorá má na pohľad inú drsnosť. Tieto "mapy" na povrchu vznikli prúdením leptadla a každá vzorka sa líši ich rozsahom a tvarom. Vzorka adaptéra zobrazeného na obrázku vľavo má z povrchu stredného signálového mikropásika odleptanú časť metalizácie takmer celoplošne, pri časti adaptéra na obrázku vpravo je viditeľné viacnásobné lichobežníkové nedoleptanie medzery s kolísajúcou šírkou v mieste vrchnej hrany metalizácie koplanárneho vlnovodu.

Antény tiež vykazujú povrchové stopy po prúdení leptadla na povrchu rezonančných plôšok aj napájačov, kostrbatý reliéf spodnej hrany metalizácie a lichobežníkové nedoleptanie.



Obr. 70. Zobrazuje pohľad na adaptéry v mieste koplanárneho vedenia, kde vľavo sú viditeľné stopy po prúdení leptadla a vpravo viacnásobný profil nedoleptania medzier.

5.5 Vyhodnotenie mikroskopických meraní

Mikroskopické merania preukázali pochybenie zo strany výrobcu, ktorý dodal vyrobené obvody s takmer dvojnásobne hrubšou metalizáciou na substráte ako bolo predpísané. Výrobným procesom, konkrétne leptaním vodivého motívu bolo spôsobené nehomogénne vyleptanie medzier so značným a dokonca viacnásobným lichobežníkovým nedoleptaním. Pri medzerách pohybujúcich sa na hrane technologických možností čo predstavuje 100 µm bolo nedoleptanie lichobežníkového tvaru najintenzívnejšie. Obvody tiež vykazujú značne kostrbatý reliéf hrany metalizácie pri substráte a vrchná hrana má veľmi šikmý a nerovnomerný tvar. Prúdenie leptadla sa tiež podpísalo na povrchu obvodov, kde bol nerovnomerne naleptaný aj povrch obvodov do hĺbky približne 5 µm, kde je zreteľná aj zmena drsnosti povrchu. Merania tiež ukázali, že aj návrhovo totožné prvky sú vyrobené s takými odchýlkami, že ich reprodukovateľnosť a výťažnosť nie je zaručená. Pri interdigitálnom kondenzátore a uzemnenom koplanárnom vedení sú vlastnosti značne závislé na vyleptanej medzere v metalizácii.

5.6 Meranie stôp po meracích sondách na meracích adaptéroch

Naše meracie pracovisko disponuje koplanárnymi meracími sondami, ktoré majú tri paralelné meracie body (kontakty) v jednej rovine. Oba krajné meracie kontakty na porte sa pripájajú na zemniace plochy koplanárneho vlnovodu a stredný kontakt sa pripája k signálovému vedeniu umiestnenému medzi týmito zemniacimi plochami. Vzdialenosť oboch krajných portov od stredového portu meracej sondy je 600 µm. Merania VF obvodov koplanárnymi meracími sondami vyžaduje vysokú precíznosť pre presné merania. Pri vyšetrovaní obvodov metalografickým mikroskopom bolo spozorovaných niekoľko nasledovných zistení, ktoré mohli ovplyvniť výslednú presnosť merania.

Prvým zistením bol fakt, že bodové stopy po všetkých kontkatoch na meracej sonde nie sú na všetkých obvodoch viditeľné. Konkrétne dochádzalo k situáciám, že jedna meracia sonda bola pravdepodobne pri meraní mierne naklonená, a to spôsobilo nerovnomerný prítlak na všetky meracie body, čo je vidieť na obrázku 71A. Na obvode sú jasne viditeľné známky po kontakte ľavým portom, kontakt prostredného portu je však menej hlboký a slabšie viditeľný a kontakt vpravo nie je viditeľný vôbec. Na protiľahlej sonde umiestnenej na opačnú stranu obvodu sú rovnako viditeľné všetky tri stopy po kontaktoch meracej sondy čo zobrazuje obrázok 71B. Ďalším poznatkom bolo zistenie, že vplyvom nechceného povrchového odleptania metalizácie vznikli na začiatku niektorých obvodov na miestach, kde sa prikladajú meracie sondy šikmé plochy, a teda meracia sonda dosadá kontaktom na šikminu, ktorá môže vodič meracej sondy vyosiť, pridvihnúť prípadne aj znížiť v medziach pružnosti a spôsobiť odchýlku, čo je to zobrazené na obrázku 71C. Pri nerovnomernom povrchu niektorých obvodov dochádza k situáciám, že ľavý a stredný kontakt koplanárnej meracej sondy dosadajú na miesto povrchovo odleptanej metalizácie čo je o 5 µm nižšie ako pravý port, ktorý dosadá na hranu, kde začína nežiaduce povrchové odleptanie. Ďalšia pozorovaná situácia bola, že jeden krajný a stredný kontakt meracej sondy dosadajú na miesto povrchovo odleptanej metalizácie a druhý krajný port by mal

dosadať na miesto, kde metalizácia povrchovo odleptaná nie je, čo je minimálny rozdiel výšky metalizácie 5 µm a stopa nie je vôbec viditeľná. Tu sa dostávame k ďalšiemu zisteniu, a to k materiálovému rozdielu vrchnej vrstvy metalizácie voči miestu, kde bola mierne odleptaná metalizácia z povrchu. Metalizácia, ktorá nevykazuje stopy po povrchovom odleptaní ma nie len na pohľad rozdielnu drsnosť a farbu, ale aj tuhosť, nakoľko na tomto povrchu neboli viditeľné žiadne stopy po portoch meracej sondy (obrázok 71D) na rozdiel od miesta, kde bola povrchová metalizácia odleptaná boli jasne viditeľné priehlbinky a škrabance. Na základe týchto zistení je tiež možné, že sondy, ktoré dosadajú na rozdielne povrchy z hľadiska materiálu, drsnosti, hrúbky, sklonu a hĺbky vniku do materiálu budú mať rozdielny elektrický kontakt a dochádza aj k rozdielnej konfigurácii uloženia jednotlivých portov voči kalibrovanému. Nakoľko kontakty meracích sond zanechali rozdielne známky na rozdielnych povrchoch meraných vzoriek, tak jedna spojitosť niektoré vzorky spája, a to je situácia s naklonenou meracou sondou, ktorá nedosadá všetkými kontaktmi rovnakou intenzitou. Túto poruchu meracej sondy nemusí spôsobovať len nepresné upevnenie, ale aj fakt, že meracie sondy sú už na konci životnosti.



Obr. 71. Zobrazenie stôp na štyroch rôznych vzorkách po koplanárnej sonde.

6 Opätovné resimulácie zahŕňajúce poznatky z mikroskopických meraní

Na základe elektrických meraní, predošlých simulácií a poznatkoch o geometrických rozmeroch z mikroskopických meraní sa pokračovalo v simuláciách s uvažovaním všetkých preukázaných zistení a ich vplyvov na vyrobených obvodoch pre definitívne identifikovane použitého modelu substrátu a určenie správnej metodológie postupu pri budúcich návrhoch hybridných VF integrovaných obvodov.

Všetky resimulácie boli realizované so zahrnutím 3D lichobežníkového modelu metalizácie s výškou 35 µm a modelom drsnosti povrchu, čo zvýšilo náročnosť simulácie na výpočtový výkon. S narastajúcou náročnosť ou simulácie stúpol aj čas trvania výpočtu simulácie, ktorý už pri najkratšom adaptéri prekračuje dĺžku trvania 6 hodín.

6.1 Typy portov

V resimuláciach boli vyšetrované a optimalizované typy a rozmery portov v elektromagnetickom simulátore Microwave Momentum (súčasť ADS) pre vyšetrenie obvodov zodpovedajúce meracím podmienkam.

Na obrázku 72 sú zobrazené typy portov používané v resimuláciach.



Obr. 72. Zobrazenie typov portov používaných pri resimuláciach v EM simulátore.

Bodový kontakt portu, sa pripája k obvodu buď na povrch metalizácie, alebo na jej hranu a štandardne sa využíva ako simulačný bod pre pokračujúce vedenie, prípadne vedenie naprázdno nakoľko je možné použiť kalibrácie popísané v [10]. V našom prípade boli kontakty portov pripájané na povrch metalizácie bez kalibrácií, keď že táto konfigurácia kalibráciu nepodporuje.

Hranový kontakt aj s plošným kontaktom portov sú prevažne využívané pri simulácií portov SMD súčiastok z dôvodu zahrnutia parazitných vlastností kontaktu [10]. Pri hranovom kontakte portu bola optimalizovaná šírka hrany *W* a jeho poloha. Plošný kontakt nebol pri simulácií koplanárnych sond využívaný pre odchyľujúce sa výsledky simulácie od meraní.

6.2 Resimulácie meracích adaptérov

Všetky štyri meracie adaptéry boli v simulátore elektromagnetického poľa vyšetrované na modeli substrátu RT/duroid 5880 ($\varepsilon_R = 2,20$) s 3D modelom metalizácie lichobežníkového nedoleptania s uhlom 60° a povrchovou drsnosťou 8 µm.

6.2.1 Adaptér 30,6 mm

Mikroskopické merania ukázali, že stopy po kontaktoch meracej sondy boli menšie ako rozmery (šírka) použitých hranových kontaktov portov pri predošlých simuláciách, čo sa prejavilo hlavne pri použití 3D modelu metalizácie, a preto boli zvolené bodové kontakty portov. Poloha bodových kontaktov bola optimalizovaná na základe stôp po miestach uloženia meracích portov pozorovaných pri mikroskopických meraniach. Optimalizáciou bolo v simulácií dosiahnuté frekvenčné priblíženie polohy miním charakteristiky útlmu odrazu na vstupe/výstupe S11/S22 k nameraným.

U väčšiny adaptérov bolo pozorované v mieste začiatku koplanárneho vlnovodu mierne rozšírenie medzier medzi stredovým signálovým pásikom a zemniacimi plochami, ktoré vzniklo pri výrobnom procese. Približným rozšírením týchto medzier bolo dosiahnuté pomerovo blízkeho zvlnenie simulovaného priebehu S11 a S22 vo frekvenčnom rozsahu 0-7 GHz voči meraniu. Porovnanie meraní s resimuláciou po optimalizovaní vyššie uvedených parametrov zobrazuje obrázok 73, kde je zobrazený útlm odrazu na vstupe S11, ktorý je tvarom veľmi blízky meraniu, avšak celá amplitúda (magnitúda) je posunutá približne o 10dB nižšie. Adaptér bol vyšetrovaný aj na sesterskom substráte RT/duroid 5870 s relatívnou permitivitou $\varepsilon_R = 2,33$, avšak všetky výsledky počas optimalizácií boli tentokrát inklinujúce k substrátu RT/duroid 5880, o čom vypovedá aj fázová závislosť prenosu S12 od frekvencie zobrazená na obrázku 74, pričom vľavo sú uvedené výsledky simulácií na substráte RT/duroid 5880 a vpravo na substráte RT/duroid 5870.



Obr. 73. Zobrazenie porovnania výsledkov simulácie s použitím bodových simulačných portov optimalizovaného adaptéra 30,6 mm v porovnaní s meraním.



Obr. 74. Porovnanie merania a simulácie fázovej závislosť od frekvencie prenosu S12 adaptéra 30,6 mm vľavo na substráte RT/duroid 5880 a vpravo na substráte RT/duroid 5870.

Výsledky simulácie zobrazené na obrázku 73 zobrazujú vpravo útlm prenosu S12, ktorý je ovplyvnený vyšším útlmom odrazu na vstupe/výstupe S11/S22, čo spôsobilo pokles útlmu prenosu. Nakoľko bolo pri mikroskopických meraniach podozrenie na zlý elektrický kontakt koplanárneho vlnovodu s koplanárnou meracou sondou, bol uskutočnený experiment, pri ktorom bol merací adaptér simulovaný s vynechaním jedného kontaktu simulačného portu, teda na jednej strane adaptéra boli umiestnené tri kontakty portu a na druhej len dva kontakty portu. Ostatné parametre substrátu a rozloženia portov ostali nezmenené. Na obrázku 75 je vľavo zobrazená závislosť útlmu odrazu na vstupe S11, kde je zjavná zmena tvaru zvlnenia charakteristiky a zníženie útlmu odrazu v porovnaní s predošlou charakteristikou s pripojenými všetkými kontaktmi oboch meracích portov. Charakteristika útlmu prenosu S12 zobrazená vpravo na obrázku 75 sa značne priblížila meraniu až do frekvencie 37 GHz, kde charakteristika simulácie pretína charakteristiku merania.



Obr. 75. Porovnanie výsledkov merania a simulácie s vynechaním jedného meracieho kontaktu portu.

Použitím hranových kontaktov portov a optimalizáciou šírky hrany sa charakteristika simulácie polohou amplitúdy značne priblížila meraniu na rozdiel od doteraz používaných bodových portov. Výsledky simulácie v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 76. Útlmu odrazu na vstupe S11 sa na malé nepresnosti zhoduje s priebehom merania až na zvlnenie charakteristiky vo frekvenčnom rozsahu 0 - 8 GHz. Útlm prenosu S12 je v simulácii vyšší v rozsahu 0 - 25 GHz ako pri meraní, čo ovplyvňuje pomerne veľká drsnosť povrchu, avšak v rozsahu 25 - 40 GHz charakteristika útlm merania narastá voči simulácii pravdepodobne vplyvom elektrického kontaktu meracích sond s adaptérom.



Obr. 76. Porovnanie výsledkov merania a simulácie po zmene typu simulačných portov, útlmu odrazu na vstupe S11 v závislosti od frekvencie zobrazený vľavo, závislosť útlmu prenosu S12 v závislosti od frekvencie zobrazený vpravo.

Odchýlka merania mohla vzniknúť aj z dôvodu rozdielneho kalibračného substrátu, ktorý sa z materiálového hľadiska dielektrika líši, nakoľko kalibračný substrát je keramický s relatívnou permitivitou $\varepsilon_R = 9,66$. Substrát použitý v meraných obvodoch má laminátové dielektrikum s relatívnou permitivitou $\varepsilon_R = 2,20$. Problematike meraní na rozdielnom kalibračnom a obvodovom substráte sa venovalo v práci [11], kde bol rozdiel v relatívnej permitivite materiálov 9,2 a útlm odrazu prenosu dosahoval nárast 0,2dB pri frekvencii 30GHz a 0,3dB pri frekvencii 40GHz.

Merací adaptér je symetrická štruktúra a zo simulačného hľadiska sa S11 = S22 a S21 = S12, avšak pričinením či už rozdielov spôsobených technológiou výroby, alebo aj rozdielnym elektrickým kontaktom meracích portov sa namerané charakteristiky S11 v porovnaní s S22 a S21 v porovnaní s S12 mierne líšia. Porovnanie nameraných charakteristík je zobrazené na obrázku 77.



Obr. 77. Porovnanie nameraných výsledkov útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlmov prenosu/spätného prenosu adaptéra 30,6 mm.

Ďalšou preverovanou možnosťou bolo pridávanie paralelnej kapacity, sériovej indukčnosti na porty s bodovými kontaktmi. Optimalizáciou boli hľadané parazitné kapacity a indukčnosti v schematickom simulátore, avšak výsledky sa menej približovali dosiahnutým výsledkom simulácie s použitím hranových kontaktov portov.

6.2.2 Adaptér 80,6 mm

V simuláciách sa pokračovalo najdlhším adaptérom 80,6 mm, keďže sa možné zmeny a dôsledky prejavia najvýraznejšie pre jeho najväčšiu dĺžku. Optimalizované boli umiestnenia portov, typy portov ako pri najkratšom meracom adaptéri (30,6 mm) vrátane mierneho rozšírenia stredného signálového pásika koplanárneho vlnovodu. Simulácia s využitím bodových portov vykazuje rovnaké vplyvy na charakteristiku útlmu odrazu na vstupe, útlme prenosu ako pri predošlom (najkratšom) adaptéri. Výsledky simulácie v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 78.



Obr. 78. Zobrazenie porovnania výsledkov simulácie s použitím bodových simulačných portov optimalizovaného adaptéra 80,6 mm v porovnaní s meraním.

Nasledujúca simulácia s vynechaním jedného kontaktu meracieho portu ukázala rovnaký spôsob prejavu, ako pri simulácii adaptéra s dĺžkou 30,6 mm. Zvlnenie útlmu odrazu na vstupe S11 sa zmiernilo a amplitúda vykazuje nižší útlm odrazu na vstupe v porovnaní s meraním aj predošlou simuláciou. Útlm prenosu S12 sa odlišuje od predošlej simulácie od frekvencie 20 GHz, avšak až od frekvencie 30 GHz pokračuje strmším trendom prikláňajúcim sa k meranej charakteristike, ktorú pri frekvencii 38 GHz pretína. Uvedené výsledky sú zobrazené na obrázku 79 v porovnaní s meraním.



Obr. 79. Porovnanie výsledkov merania a simulácie s vynechaním jedného meracieho kontaktu koplanárneho portu. Útlmu odrazu na vstupe S11 v závislosti od frekvencie zobrazený vľavo, závislosť útlmu prenosu S12 zobrazená vpravo.

Použitím hranových kontaktov portov namiesto bodových sme pokračovali v simuláciách na adaptéri 80,6 mm. Optimalizovaním dĺžky hrany portu sme dosiahli výsledky ktoré sú zobrazené na obrázku 80 v porovnaní s meraním. Výsledok simulácie útlmu odrazu na vstupe S11 sa na malé nepresnosti prekrýva s priebehom merania až na zvlnenie charakteristiky vo frekvenčnom rozsahu 0 - 8 GHz. Útlm prenosu S12 je v simulácii mierne vyšší v rozsahu 0 - 25 GHz ako pri meraní, čo ovplyvňuje pomerne veľká drsnosť povrchu, avšak v rozsahu 25 - 40 GHz vykazuje charakteristika merania narastajúci útlm voči simulácii pravdepodobne vplyvom elektrického kontaktu meracích sond s adaptérom, ktorý sa prejavuje pri všetkých adaptéroch.



Obr. 80. Porovnanie výsledkov merania a simulácie po zmene typu simulačných portov, útlmu odrazu na vstupe S11 v závislosti od frekvencie zobrazená vľavo, závislosť útlmu prenosu S12 zobrazená vpravo.

Fáza útlmu prenosu simulácie S12 je zobrazená na obrázku 81 v porovnaní s meraním, kde je vidieť prekrytie charakteristiky merania so simuláciou v celom vyšetrovanom pásme. Táto presná zhoda fázy meranej a simulovanej potvrdzuje použitie modelu substrátu RT/duroid 5880 s $\varepsilon_R = 2,20$.



Obr. 81. Fáza útlmu prenosu S12 zobrazená v porovnaní s meraním.

Zobrazenie nameraných charakteristík pre porovnanie útlmu odrazu na vstupe/výstupe S11/S22 a útlme prenosu/spätného prenosu S21/S12 sú zobrazené na obrázku 82.



Obr. 82. Porovnanie nameraných výsledkov útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlme prenosu /spätného prenosu adaptéra 80,6 mm.

Ďalšie adaptéry boli vyšetrované v simulátore elektromagnetického poľa už len s využitím hranových kontaktov portov, keďže pri tomto type boli dosiahnuté lepšie výsledky.

6.2.3 Adaptér 35,6 mm

Adaptér dĺžky 35,6 mm bol simulovaný iba s použitím hranových kontaktov portov. Optimalizovaním polohy, veľkosti hranových portov a šírky medzier v koplanárnom vlnovode boli dosiahnuté výsledky, ktoré sú zobrazené v porovnaní s meraním na obrázku P10 umiestnený v obrazovej prílohe. Charakteristika útlmu odrazu na vstupe S11 sa prekrýva s meraním až na frekvenčnú oblasť 0-10 GHz, kde má simulácia miernejšie zvlnenie hlavne pri 0-5 GHz. Priebeh útlmu prenosu S12 sa do 20GHz prekrýva s meraním a potom naberá priebeh merania prudší trend v porovnaní so simuláciou, ako pri všetkých adaptéroch.

Porovnanie útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlmu prenosu/spätného prenosu meraní je zobrazené na obrázku P11 umiestnenom v obrazovej prílohe. Ako je na obrázku vidieť samotná simulácia útlmu odrazu na vstupe adaptéra sa výsledkami približuje viac ako výsledky meraní S11 a S22 porovnané voči sebe.

6.2.4 Adaptér 45,8 mm

Adaptér dĺžky 45,8 mm bol tiež simulovaný iba s použitím hranových kontaktov portov tak ako predošlý adaptér (35,6 mm). Optimalizovaním polohy, veľkosti hranových portov a šírky medzier v koplanárnom vlnovode boli dosiahnuté výsledky, ktoré sú zobrazené v porovnaní s meraním na obrázku P12 umiestnenom v obrazovej prílohe. Charakteristika útlm odrazu na vstupe S11 sa na malé nepresnosti prekrýva s meraním vo frekvenčnom pásme 9 – 40 GHz a pri frekvencii 0 – 9 GHz má v porovnaní s meraním intenzívnejšie zvlnenie priebehu. Útlm prenosu S12 do frekvencie 20 GHz sa na malé nepresnosti prekrýva s meraním, ktoré od frekvencie 25 GHz naberá razantnejší trend klesania.

Porovnanie útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlmu prenosu/spätného prenosu meraní je zobrazené na obrázku P13 umiestnenom v obrazovej prílohe.

6.3 Resimulácie antén

Antény boli resimulované s použitím modelu substrátu RT/duroid 5880 s hrúbkou dielektrika 254 μ m, 3D modelom metalizácie hrúbky 35 μ m s lichobežníkovým nedoleptaním 60° a drsnosťou povrchu 8 μ m. Pri resimulácií antén bol použitý model portov s hranovým kontaktom so vzdialenosťou približne 70 μ m od miesta začiatku meracieho adaptéra pripojeného na napájač antény, pretože táto konfigurácia vykazovala najpresnejšie výsledky v porovnaní s meraním.

6.3.1 Resimulácia štvorprvkovej antény

Výsledky simulácie v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 83, na ktorom je zobrazený útlm odrazu na vstupe S11 štvorprvkovej antény, ktorý sa do frekvencie 28 GHz prekrýva s meraním.



Obr. 83. Výsledky resimulácie štvorprvkovej antény v porovnaní s meraním Fáza útlmu odrazu na vstupe S11 sa prekrýva s meraním v celom vyšetrovanom rozsahu, čo je zobrazené na obrázku 83 vpravo.

6.3.2 Resimulácia osemprvkovej antény

Výsledky simulácie osemprvkovej antény v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 84, na ktorom je zobrazený útlm odrazu na vstupe S11, ktorý sa do frekvencie 31GHz prekrýva s meraním a vo frekvenčnom rozsahu 31-40 GHz sa líši len s miernou odchýlkou neprevyšujúcou 1,5dB.



Obr. 84. Výsledky resimulácie osemprvkovej antény v porovnaní s meraním.

Fáza útlmu odrazu na vstupe S11 sa prekrýva s meraním v celom vyšetrovanom rozsahu, čo je zobrazené na obrázku 84 vpravo.

6.4 Resimulácia radiálnych úsekov vedenia

Simulácia radiálnych úsekov vedenia s hranovými kontaktmi portov a modelom substrátu RT/duroid 5880 s 35 µm výškou a 3D modelom metalizácie s lichobežníkovým profilom nedoleptania 60° potvrdila zmenu geometrických rozmerov zistenú z mikroskopických meraní. Vplyvom zmenšenia šírky týchto obvodov sa pri výrobnom procese posunulo pásmo zádrže k nižšej frekvencii voči simulácii, čo je zobrazené na obrázku 85 vpravo. Obrázok 85 zobrazuje vľavo výsledky simulácie útlm odrazu na vstupe S11 v porovnaní s meraním, v ktorom sa až na malé odchýlky charakteristiky prekrývajú. Na obrázku 85 vpravo je zobrazený útlm prenosu S12 v porovnaní s meraním, kde došlo k odchýleniu simulovanej charakteristiky k vyššej frekvencii v pásme 20 – 26 GHz.



Obr. 85. Porovnanie výsledkov merania so simuláciou radiálnych úsekov vedenia.

Na obrázku 86 je zobrazená závislosť fázy od frekvencie S11 vľavo a S12 v strede, kde vidieť, že v oboch priebehoch sa meranie prekrýva so simuláciou až na frekvenciu 21-24 GHz v priebehu fázy útlmu prenosu S12. Táto odchýlka vznikla práve odchýlkou geometrických rozmerov pri výrobnom procese. Na obrázku 86 vpravo je zobrazená závislosť fázy od frekvencie útlmu prenosu S12 po optimalizovaní rozmerov radiálnych úsekov vedenia. Fáza S12 sa po optimalizácií rozmerov na základe mikroskopických meraní prekrýva s priebehom merania aj v pásme 21-24 GHz.



Obr. 86. Závislosť fázy útlmu odrazu na vstupe S11 vľavo, útlmu prenosu S12 (pri pôvodných rozmeroch) v strede a útlmu prenosu S12 (pri optimalizovaných rozmeroch) vpravo v porovnaní s meraním.



Obr. 87. Porovnanie výsledkov merania a simulácie útlmu odrazu na vstupe S11 vľavo a útlmu prenosu S12 vpravo pri optimalizovaní geometrických rozmerov.

Na obrázku 87 vpravo je zobrazený útlm prenosu S12 v porovnaní s meraním pri aktuálnych rozmeroch, kde došlo prekrytie simulovanej charakteristiky s meranou v celom vyšetrovanom pásme. Útlm odrazu na vstupe zobrazený na obrázku 87 vľavo sa tiež na malé nepresnosti prekrýva s meraním v celom vyšetrovanom pásme.

6.5 Resimulácia interdigitálneho kondenzátora

Pri resimuláciach bol použitý model substrátu RT/duroid 5880 s hrúbkou dielektrika 254 μm, 3D modelom metalizácie s výškou 35 μm, lichobežníkovým profilom nedoleptania 40° (na základe mikroskopických meraní) a drsnosťou povrchu 8 μm.

Resimulácia interdigitálneho kondenzátora bola realizovaná s použitím bodových kontaktov portov aj s použitím hranových kontaktov portov pre porovnanie vplyvu simulačných portov na výsledky útlmov odrazu a útlmov prenosu tohto prvku.

Na obrázku 88 sú zobrazené S-parametre merania v porovnaní so simuláciou pri využití bodových portov interdigitálneho kondenzátora.



Obr. 88. Výsledne S-parametre interdigitálneho kondenzátora s použitím bodových kontaktov portov adaptéra.

Útlm odrazu na vstupe S11 a výstupe S22 sa v pásme 0-22GHz prekrýva s meraním, v pásme 22-28 GHz pozorujeme v charakteristikách merania intenzívnejšie nepravidelné zvlnenie oproti simulácii. V pásme 28-30 GHz sa meranie prekrýva so simuláciou a od 30 GHz sa meranie a simulácie mierne odchyľujú. Útlmy prenosu S12 a S21 sa na malé nepresnosti prekrývajú do frekvencie 28 GHz a s ďalej rastúcou frekvenciou mierne narastá aj odchýlka. Pri detailnom pohľade na útlm prenosu je v pásme 22-28 GHz, čo je blízke okolie pracovného pásma antikolízneho radaru je útlm prenosu o 1dB nižší ako nameraný.

Fázové závislosti útlmov odrazov a útlmov prenosu v porovnaní s nameranými sú zobrazené na obrázku P14 umiestnenom v obrazovej prílohe. Fázové závislosti útlmov odrazu sa nezhodujú s nameranými v pásme 24 - 27 GHz a v ostatnom vyšetrovanom pásme sa stopercentne prekrývajú. Fázové závislosti útlmov prenosu sa prekrývajú v celom vyšetrovanom pásme (0-40 GHz).

Výsledky resimulácie interdigitálneho kondenzátora s použitím hranových kontaktov portov elektromagnetickej simulácie sú zobrazené na obrázku 89 v porovnaní s nameranými charakteristikami. Tieto simulácie považujeme za presnejšie simulujúce podmienky merania, nakoľko pri resimuláciach ostaných prvkov boli výsledky veľmi blízke nameraným charakteristikám. Útlmy odrazu na vstupe aj výstupe majú pri tejto

konfigurácii portov v pásme 22-28GHz intenzívnejšie zvlnenie, avšak v priebehu S11 je útlm v rozsahu 26-28GHz amplitúdovo posunutý nižšie. Tento rozdiel voči meraniu mohol nastať z dôvodu nechcene povrchovo odleptanej metalizácie, nakoľko útlm odrazu na vstupe samotného interdigitálneho kondenzátora bez meracích adaptérov pri 25GHz a 18 µm hrúbky metalizácie je 22,6 dB a pri 35 µm hrubej metalizácii predstavuje 17,6 dB. Z mikroskopických meraní je potvrdené, že interdigitálny kondenzátor má jednu stranu hrebeňovej štruktúry odleptanú viac ako druhú, čo môže reprezentovať aj rozdiel v meraní útlmu odrazu na vstupe v porovnaní s útlmom odrazu a na výstupe zobrazené na obrázku 90.



Obr. 89. Výsledne S-parametre interdigitálneho kondenzátora s použitím hranových kontaktov portov adaptéra.

Útlmy odrazov mimo pásma 22-28 GHz sa prekrývajú s meraním do 30 GHz, kde sú pozorované malé nepresnosti s rastúcou frekvenciou. Útlmy prenosu sa prekrývajú s meraním do frekvencie 28 GHz, potom sa začne vznikať mierna odchýlka a útlm prenosu merania narastá prudšie. Útlm prenosu v pásme 22-28GHz (okolo "pracovnej" frekvencie 25 GHz) je približne 0,2 dB nižší v porovnaní s meraním, čo je detailne zobrazené na obrázku P15 umiestnenom v obrazovej prílohe. Prenos interdigitálneho kondenzátora klesá s rastúcou šírkou vyleptanej medzery, čo je dôsledkom nepresného dodržania
geometrických rozmerov a výšky metalizácie. Skutočný útlm prenosu by bol o 1 dB nižší pri dodržaní hrúbky metalizácie (18 μ m), dodržaných geometrických rozmerov a nižšej drsnosti povrchu čo reprezentuje kostrbatý reliéf nedoleptania a nerovnomerný povrch po prúdení leptadla.



Obr. 90. Porovnanie nameraných výsledkov útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlmu prenosu /spätného prenosu interdigitálneho kondenzátora.

Fázové závislosti útlmov odrazu a prenosu sú zobrazené na obrázku P16 umiestnenom v obrazovej prílohe. Fázové závislosti útlmov prenosu sa prekrývajú s meraním až na odchýlku, ktorá vzniká od 38GHz. Fázové závislosti útlmu odrazu na vstupoch sa prekrývajú s meraním až na pásmo 22-28 GHz, kde sú viditeľné odchýlky pravdepodobne zapríčinené vplyvom technológie výroby.

Interdigitálny kondenzátor potvrdil hranové kontakty portov so šírkou hrany 10 μm vhodnejšiu alternatívu ako bodové kontakty portov pri simuláciách laboratórnych meraní.

7 Identifikácia výsledného modelu substrátu

Výsledný model substrátu bol identifikovaný ako RT/duroid 5880 s relatívnou permitivitou $\varepsilon_R = 2,20$ a výškou metalizácie 35 µm. Drsnosť povrchu bola na základe resimulácií určená na identifikovaného substrátu 8 μm. Model zahŕňa 3D model metalizácie s lichobežníkovým nedoleptaním s profilom (uhlom stúpania metalizácie od substrátu) 60°. Pri interdigitálnom kondenzátore bol na základe mikroskopických meraní tento model použitý s profilom 40°. Vplyv nedoleptania nebol taký zásadný ako rozdielna výška metalizácie a nedodržanie geometrických rozmerov. Hrúbka dielektrika substrátu bola potvrdená na 254 µm.

8 Metodológia

V budúcich návrhoch pre simulátorom treba presné vyšetrenie obvodov elektromagnetického poľa používať v modeli substrátu 3D model metalizácie. Vyšetrovaním obvodov s plošným modelom metalizácie vznikajú v simulácii odchýlky a nepresnosti prevažne pri prvkoch ako interdigitálny kondenzátor, radiálne úseky a ďalšie úzkopásmové obvody, ktorých vlastnosti sú závislé na šírke vyleptanej medzery. Pre správne simulácie je dôležité vybrať vhodný typ portu a kalibrácie popísané v práci [10]. Pri simulovaní laboratórnych podmienok meraní je dôležité rozmiestniť porty na miesta uloženia portov meracích sond na vyrobenom prvku a zachovať ich konfiguráciu. V našom použití sa najviac osvedčili hranové porty so šírkou približnou šírke stopy po kontaktoch koplanárnych meracích sond. Dôležitým krokom pri návrhu a následnej realizácii je aj výber výrobcu ktorý dokáže dodržať výšku požadovanej metalizácie a geometrické rozmery, aby bola zaručená reprodukovateľnosť výťažnosť obvodov.

9 Analýza VF zosilňovača antikolízneho radaru

Identifikáciou modelu substrátu, vplyvov technológie výroby a optimalizáciou umiestnenia a veľkosti kontaktov portov na pasívnych štruktúrach boli vytvorené simulačné podmienky ekvivalentné laboratórnym VF elektrickým meraniam aktívnych obvodov antikolízneho radaru. Dosiahnuté správne simulačné podmienky sú dôležité pre správne identifikovanie porúch vzniknutých pri výrobe obvodov a nájdenia možností ich riešenia a optimalizácie pre budúce návrhy.

Mikrovlnným meraním VF zosilňovača, ktorý bol navrhnutý v práci [2] bolo zistené, že pri frekvenciách 2,9 GHz, 8,72 GHz a 26,20 GHz dochádza k osciláciám.

VF časť zosilňovača zobrazená v červenom obdĺžniku na obrázku 91 bola vyšetrená v simulátore elektromagnetického poľa, z ktorej bol následne vytvorený model pre možnosť simulácie v schematickom simulátore s pripojeným verifikovaným modelom tranzistora a napájacím obvodom. Simulácia v schematickom simulátore s použitím AC modelu VF časti z poľového simulátora a verifikovaným modelom tranzistora oscilácie nepreukázala. Z dôvodu podozrenia zo vzniku oscilácií bol elektromagnetickým simulátorom vyšetrený aj napájací obvod, nakoľko radiálne úseky vedenia, ktoré oddeľujú napájací obvod od VF časti obvodu sú efektívne len pre frekvenciu 25GHz (a blízke okolie) a možné oscilácie teda mohli byť spôsobené aj parazitnými vplyvmi diskrétnych súčiastok filtra v napájacom obvode. Následne bol celý obvod vyšetrený simuláciou elektromagnetického poľa so zahrnutím dostupných verifikovaných knižničných modelov diskrétnych súčiastok a bol vytvorený model obvodu. Vytvorený AC model tohto obvodu bol vložený do schematického simulátora, čo je zobrazené na obrázku 91. Vyšetrenie obvodu nepreukázalo oscilácie a nestabilitu, až na pásmo 0-260 MHz, kde sa oscilácie neprejavili pre veľký útlm prenosu/spätného prenosu (-400dB až -80dB). Útlm odrazu na výstupe a útlm spätného prenosu vykazuje chybu mikrovlnných meraní v pásme 0-30GHz, kde je viditeľný šum. Stabilitu zosilňovača zobrazuje frekvenčný priebeh koeficientu stability na obrázku 93.

Výsledky simulácie v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 92. V simulácii bol dosiahnutý malosignálový zisk zosilňovača 6,16 dB pri frekvencii 25 GHz a 10,9 dB pri

frekvencii 6,9 GHz. Napájanie tranzistora bolo 684 mV na hradle a 2V (20mA) na kolektore tranzistora.



Obr. 91. Topografické zobrazenie zapojenia zosilňovača v schematickom editore.



Obr. 92. Výsledné S-parametre simulácie zosilňovača s pracovným bodom návrhu v porovnaní s meraním.



Obr. 93. Frekvenčný priebeh koeficientu stability zosilňovača pri návrhovom pracovnom bode.

Keďže ide o realizovaný integrovaný obvod, možností pre úpravu jeho vlastností, teda sfunkčnenie je minimum. Jedinou reálnou možnosťou by bola zmena pracovného bodu. Nakoľko bol verifikovaný veľkosignálový model tranzistora od 12 GHz extrapolovaný, tak pre precíznejšie vyšetrenie stability v rozsahu vyšetrovaných frekvencií boli namiesto modelu tranzistora použité S-matice (0-45GHz) tranzistora pri šestnástich rôznych pracovných bodoch. Vyšetrenie ukázalo, že pri pracovnom bode tranzistora s kolektorovým napätím 1,5 V zosilňovač osciloval pri frekvencii 7GHz, pri zvýšení na 2V oscilácie zaniknú. Výsledné priebehy sú zobrazené na obrázku P17 umiestnenom v obrazovej v prílohe.

Pri zvýšení napätia na hradle tranzistora na hodnotu 1V dôjde k zníženiu (zhoršeniu) stability zosilňovača, čo zobrazuje frekvenčný priebeh koeficientu stability na obrázku 94. Zosilňovač je v pásme približného vzniku oscilácií v meraniach nestabilný na frekvencii 26 GHz. Simulácie v porovnaní s meraním sú zobrazené na obrázku 95, kde sú viditeľné oscilácie na 26,8GHz. Oscilácie zosilňovača merané pri nižších frekvenciách sa v simulácii neprejavili, avšak pri frekvencii 7GHz je zosilňovač podmienečne stabilný, čo pri meraní mohlo spôsobiť oscilácie. Preto je možnou alternatívou vzniku oscilácií aj zmena napájania tranzistoru, teda zmena pracovného bodu.



Obr. 94. Frekvenčný priebeh koeficientu stability zosilňovača pri zvýšení napätia na hradle na 1V.



Obr. 95. Výsledné S-parametre simulácie zosilňovača s napájaním hradla tranzistoru 1V a napájaním kolektora 2V v porovnaní s nameraním.

Na základe odlišného priebehu prenosu zosilňovača S21, bolo napätie na hradle znížené na 0,301V a napätie na kolektore 1,98V. Pri tomto pracovnom bode sa charakteristika simulácie S21 najviac priblížila meraniu, čo je zobrazené na obrázku 96. Pri tomto pracovnom bode sa najmä charakteristika útlmu prenosu S21 značne priblížila meraniu aj s osciláciou na 8,5GHz. Oscilácie pri frekvenciách 2,9 GHz a 26,20 GHz nevznikali

a koeficient stability bol v celom rozsahu vyšší ako 1, až na frekvenciu oscilácie, kde mal hodnotu K = 0,508. Napätie na hradle tranzistora realizovaného zosilňovača teda bol pravdepodobne nižšie ako bolo v návrhu uvažované.



Obr. 96. Výsledné S-parametre simulácie zosilňovača s napájaním hradla tranzistoru 0,301V a kolektoru 1,98V v porovnaní s nameraním.

Pri elektrických meraniach pasívnych prvkov boli pozorované v útlme odrazu na vstupe a výstupe rozdielne amplitúdy a zvlnenia s vyšším útlmom voči meraniu v pásme 0-10GHz, čo môže skresľovať výsledky meraní v porovnaní so simuláciou. Oscilácie zosilňovača pri frekvenciách 2,9 GHz a 26,20 GHz v simuláciách nevznikali a v meraní mohli byť spôsobené zvlnením plošného spoja, teda celej plochy substrátu, ktorý pri meraní nebol úplne rovný a medzi zemniacou doskou substrátu a meracou stolicou pravdepodobne vznikli rezonančné dutiny s nehomogénnou zemou. Nehomogénna zem teda mohla znížiť stabilitu zosilňovača.

Okrem nerovnomernej povrchovej metalizácie meranie komplikovalo aj zvlnenie substrátu, ktoré svojím zahnutím pôsobilo protitlakom na koplanárne meracie sondy, čo mohlo mať vplyv na zmenu konfigurácie rozloženia kontaktov koplanárnych sond a dokonca spôsobiť aj ich poškodenie. Nielen problematické merania z hľadiska kontaktu meracích sond a obvodu, ale aj nehomogénne uzemnenie sa pravdepodobne podpísali na rozdielnosti meraní voči simulácii. Pre úpravu pracovného bodu by bolo nutné vykonať nové elektrické merania, pri ktorých by bola zabezpečená homogénna zem a rovnomerne priliehajúce kontakty meracích portov. Zabezpečením reprodukovateľných meraní by bolo

možné určiť presný prehľad o fungovaní obvodu a analýzou vyhodnotiť konečné úpravy pre zásah do obvodu.

Vplyvy technológie výroby sa najviac prejavia na úsekoch vedení, ktoré skokovito menia šírku, a tak v mieste hrany vznikajú oblúky a na radiálnych úsekoch vedenia a interdigitálnych kondenzátoroch. Pri detailnom pohľade na obrázok 97 sú tiež viditeľné stopy po prúdení leptadla, čo zobrazujú rozdielne farby povrchu najlepšie viditeľné na interdigitálnych kondenzátoroch a radiálnych úsekoch vedenia. Na Fotografii (obrázok 97) realizovaného zosilňovača je viditeľný rozsah prehnutia substrátu obvodu zosilňovača.



Obr. 97. Fotografia realizovaného zosilňovača antikolízneho radaru.

Pri budúcich návrhoch a realizácii obvodov na tomto type substrátu je vhodné používať optimálne množstvo spájky, ktoré môže mať tiež zásluhu na ovplyvnenie parametrov zosilňovača. Pri používaní spájkovania pretavením je potrebné zabezpečiť substrát proti zvlneniu a prehnutiu pri celoplošnom zohriatí dosky plošného spoja obvodu. Pri spájkovaním súčiastok na prehnutý substrát môže dôjsť k poškodeniu kontaktov alebo zlomeniu čipu tranzistoru z dôvodu mechanického pnutia narovnávaním obvodu pri meraní alebo aplikovaní obvodu na nosnú dosku/konštrukciu.

10 Záver

V práci boli navrhnuté a realizované pasívne prvky meracieho adaptéra, testovacie štruktúry interdigitálneho kondenzátora a radiálnych vedení ako aj dvoch planárnych úzkopásmových antén pre elektrické merania, identifikácie vplyvov technológie výroby a fyzikálnych parametrov substrátu obvodov antikolízneho radaru.

Pri návrhu meracieho adaptéru bol dôraz kladený na širokopásmovosť a zachovanie charakteristickej impedancie 50 Ω . Útlm odrazu na vstupe/ výstupe adaptéra dosahuje S11/S22 = 20dB v celom pásme, čo bolo požadovaným cieľom pri návrhu. Návrh antén bol zameraný na meracie účely, kde bol dôraz kladený predovšetkým na impedančné prispôsobenie, aby sa signál smerujúci do antény neodrážal späť do obvodu na napájači. Antény dosahujú zisk v pásme 25GHz pri štvorprvkovej 12,7 dBi, pri osemprvkovej 13,1dBi.

Pre identifikáciu modelu substrátu a vplyvy technológie výroby boli realizované testovacie štruktúry meracích adaptérov v štyroch rozdielnych vyhotoveniach dĺžky, interdigitálny kondenzátor, radiálne úseky vedení a pre tento účel boli použité aj planárne antény. Vyšetrovaním S-parametrov v elektromagnetickom simulátore boli optimalizáciami hľadané fyzikálne vlastnosti použitého substrátu, ako aj dodržanie rozmerov pri výrobe. Pri vyšetrovaní bola identifikovaná drsnosť povrchu 8 µm. Na základe protichodných výsledkov simulácií meracích adaptérov a ostatných pasívnych prvkov boli uskutočnené mikroskopické merania, ktoré odhalili nedodržanie hrúbky metalizácie zo strany výrobcu, ktorá bola 35 µm namiesto predpísaných 18 µm. Merania tiež preukázali na nerovnomerné nedoleptanie medzier a kostrbatý reliéf spodnej hrany metalizácie s nehomogenitami veľkosti približne 8 µm, čo sa v simuláciách prejavilo ako drsnosť povrchu metalizácie. Povrch všetkých obvodov bol vplyvom nechceného odleptania metalizácie nerovnomerný s rozdielnou výškou, ktorá sa pohybovala v rozmedzí 29-35 µm. Povrchové odleptanie spôsobilo problémy pri mikrovlnných meraniach pre rozdielnu výšku a typ materiálu na ktorý boli prikladané kontakty koplanárnych meracích sond. Obvody boli teiž detailne vyšetrené v miestach kontaktu obvodu a koplanárnych meracích sond, ktoré na obvodoch zanechali (aj nezanechali) rôzne stopy v závislosti od typu povrchu. Rozdielny povrch mohol spôsobiť iný elektrický kontakt meracích sond a zmenu ich konfigurácie oproti kalibračnej polohe.

mikroskopických Na základe meraní boli všetky prvky opäť vvšetrované v elektromagnetickom simulátore už s nameranými geometrickými parametrami. Optimalizovaním veľkosti, typu kontaktov a polohy portov boli simulácie ekvivalentné laboratórnym elektrickým meraniam, čo bolo cieľom pre správne identifikovanie vplyvov technológie výroby a vlastností vysokofrekvenčného zosilňovača pre antikolízny radar. Realizovaný obvod zosilňovača realizovaný v [2] pri elektrických meraniach osciloval v pásmach 2,90GHz, 8,72GHz a 26,20 GHz. Pri resimuláciach s použitím identifikovaného modelu substrátu a metodológie postupu obvod zosilňovača neosciloval a vykazoval návrhové výsledky. Pri zmene napájania hradla na 0,301V sa výsledky simulácie značne priblížili nameraným, avšak oscilácia bola prítomná len pri frekvencii 8,5GHz. Realizovaný obvod má pravdepodobne iný pracovný bod.

Oscilácie 2,90GHz a 26,20 GHz mohli byť spôsobené nehomogénnou zemou pri

meraniach a vznikom rezonančných dutín v miestach, kde substrát nepriliehal zemniacou plochou k meracej stolici pre zvlnenie celej dosky substrátu. Mikrovlnné meranie zosilňovača bolo komplikované pre jeho nadmerné zvlnenie. Zaťažením hrán pre možnosť merania sa celý substrát skrúcal a namáhal nie len koplanárne meracie sondy ale aj samotný čip tranzistora. Ďalšou možnosťou vzniku oscilácií bola preukázaná zmena stability z dôvodu zmeny napätia na hradle tranzistora.

Jednou z možností sfunkčnenia zosilňovača by bola zmena pracovného bodu tranzistora, avšak pred zásahmi do obvodu by bolo nutné vykonať reprodukovateľne elektrické merania, pri ktorých by bola zabezpečená homogénna zem so súčasným meraním pracovného bodu a rovnomerné uloženými kontaktmi meracích portov.

Pri budúcom návrhu obvodov je dôležité používať 3D model metalizácie substrátu a pri návrhu meracích členov, optimalizovať presné rozmery a umiestnenie hranových portov zodpovedajúce meracím sondám. Výberom vhodného výrobcu, ktorý dodrží geometrické rozmery, výšku a rovnomernosť metalizácie s technológiou spájkovania, pri ktorej nedôjde k zvlneniu substrátu sa zvýši možnosť reprodukovateľnosti a výťažnosti navrhnutých a realizovaných obvodov.

Práca bola veľmi časovo náročná pre množstvo optimalizovaných parametrov a dĺžku trvania výpočtu simulácií elektromagnetického poľa, nakoľko jedna simulácia meracieho adaptéra prekračovala dĺžku času strojového výpočtu 6hodín, ktorá stúpala so zložitosťou a veľkosťou obvodu až na 40 hodín pri elektromagnetickom vyšetrení zosilňovača.

Zoznam použitej literatúry

[1] ISSAKOV, Vadim. *Microwave circuits for 24 GHz automotive radar in siliconbased technologies*. New York: Springer, c2010, xiv, 208 p. ISBN 9783642135989-2.

[2] POTOČNÝ, M. Antikolízny radar. Diplomová práca. Bratislava :FEI STU, 2016.

[3] HANUS, S., SVAČINA, J. Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Prednášky. ISBN 80-214-2222-X

[4] Data Sheet - VMMK-1225, 0.5 to 26 GHz Low Noise E-PHEMT in a Wafer Scale Package [online]. [cit. 2016-04-16]. dostupné z http://www.avagotech.com/pages/en/rf_microwave/transistors/fet/vmmk-1225/

[5] Klinko, Ľ. *Antikolízny radar*. Bakalárska práca. Bratislava: FEI STU, 2014.

[6] RT/duroid® 5870/ 5880 Data Sheet [online]. [cit. 2016-04-16]. dostupné z http://www.rogerscorp.com/acm/products/32/RT-duroid-5880-Laminates.aspx

[7] HUDAČ, S. *Antikolízny radar*. Bakalárska práca. Bratislava: FEI STU, 2014.

[8] Keysight PNA Series Network Analyzers Technical Specifications [online]. [cit.
2016-04-16]. Dostupné z: http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E8364 90031.pdf?id=450975

[9] ADS dokumentácia (Help), verzia 2016.1, časť Electromagnetic [PDF]

[10] Recommendations for Port Setup When Using ADS Momentum and Modelithics Models. *Application Note* [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0415EN.pdf

[11] WALKER, David K. a Dylan F. WILLIAMS. Compensation for Geometrical Variations in Coplanar Waveguide Probe-Tip Calibration. *IEEE MICROWAVE AND GUIDED WAVE LETTERS*. (VOL. 7,)

Obrazová príloha :

Aktívne obvody antikolízneho radaru



Obr. PR1. HIO zosilňovača.



Obr. PR2. HIO oscilátora č.1.



Obr. PR3. HIO oscilátora č.2.



Obr. PR4. HIO oscilátora č.3.



Obr. PR5. HIO oscilátora č.4.



Obr. PR6. HIO zmiešavača.



Obr. PR7. Pripojenie štvorprvkovej antény k HIO oscilátora č.1.



Adaptér dĺžky 35,6 mm

Obr. P1. Výsledky resimulácie adaptéra 35,6mm na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.



Obr. P2. Výsledky resimulácie adaptéra 35,6mm na substráte RT/duroid 5880 s upravenou permitivitou $\varepsilon_{\rm R}$ = 2,40, hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.



Obr. P3. Výsledky resimulácie adaptéra 35,6mm na substráte RT/duroid 5870, hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.



Obr. P4. Výsledky resimulácie adaptéra 35,6mm na substráte RT/duroid 5870, hrúbkou 220 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.



Adaptér dĺžky 45,8 mm

Obr. P5. Výsledky resimulácie adaptéra 45,8 mm na substráte RT/duroid 5880 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.



Obr. P6. Výsledky resimulácie adaptéra 45,8mm na substráte RT/duroid 5880 s upravenou permitivitou $\varepsilon_{\rm R}$ = 2,40, hrúbkou 254 µm a metalizáciou 18 µm s drsnosťou 8 µm.



Obr. P7. Výsledky resimulácie adaptéra 45,8 mm na substráte RT/duroid 5870 s hrúbkou 254 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.



Obr. P8. Výsledky resimulácie adaptéra 45,8 mm na substráte RT/duroid 5870, hrúbkou 220 μm a metalizáciou 18 μm s drsnosťou 8 μm.

Rozmiestnenie obvodov na doske substrátu vo výrobe.



Obr. P9. Rozmiestnenie obvodov na ploche substrátu.

Adaptér 35,6mm – nove resimulácie



Obr. P10. Výsledky simulácie adaptéra 35,6 mm s použitím hranových portov.



Obr. P11. Porovnanie nameraných výsledkov útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlme prenosu /spätného prenosu adaptéra 35,6 mm.



Adapter 45,8 mm – nove resimulacie

Obr. P12. Výsledky simulácie adaptéra 45,8 mm s použitím hranových portov. Magnitúda [dB]



Obr. P13. Porovnanie nameraných výsledkov útlmu odrazu na vstupe/výstupe a útlme prenosu /spätného prenosu adaptéra 45,8 mm.



Interdigitálne kondenzátory- bodové kontakty portov- fázová závislosť

Obr. P14. Fázové závislosti útlmov odrazov a prenosov interdigitálneho kondenzátora s použitím bodových kontaktov portov.

Interdigitálny kondenzátor-hranové kontakty portov – detail prenosu



Obr. P15. Detail útlmu prenosu interdigitálneho kondenzátora.



Interdigitálne kondenzátory -hranové kontakty portov- fázová závislosť

Obr. P16. Fázové závislosti útlmov odrazov a prenosov interdigitálneho kondenzátora s použitím bodových kontaktov portov.

Zosilňovač



Obr. P17. S-matice pri rôznych pracovných bodoch tranzistora použité v simulácii zosilňovača namiesto verifikovaného modelu v porovnaní s mikrovlnnými meraniami.