

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## PLANÁRNÍ STRUKTURY PRO VYSOKÉ KMITOČTY

PLANAR STRUCTURES FOR HIGH FREQUENCY BAND

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Pulec

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO 2016

## Abstrakt

Předložená práce se zabývá problematikou návrhu a technologie planárních mikroelektronických struktur určených pro vysoké kmitočty. Vybrané struktury byly realizovány v laboratořích na Ústavu mikroelektroniky, měření vlastností vybraných struktur potom probíhalo na Ústavu radioelektroniky. Součástí práce je i simulace vybraných struktur, přičemž k těmto simulacím byl použit návrhový systém Ansoft Designer a výpočetní systém ANSYS. Pozornost je věnována diskrétním prvkům (cívkám a kondenzátorům), kmitočtovým filtrům v planární a hybridní technologii a mikrovlnným filtrům v planárním uspořádání. Práce přináší nové poznatky v oblasti návrhu a technologie diskrétních prvků i komplexnějších obvodů (filtrů), tyto poznatky potom mohou být dále využity jako podklad pro další výzkum i pro praktické realizace.

## Klíčová slova

Kmitočtový filtr, cívka, kondenzátor, interdigitální, FEM, ANSYS, Ansoft Designer.

## Abstract

The present paper deals with the problematics of the design and technology of planar microelectronic structures for the high frequency band. These structures were realised on the Department of Microelectronics and their properties were measured on the Department of Radioelectronics. The part of this work is also simulation of some microelectronic structures, where for these simulations the design and simulation tool Ansoft Designer and the FEM tool ANSYS was used. The attention is paid to the discrete devices (coils and capacitors) as well as to the more complex structures (frequency filters). The paper yields the new findings in the field of the design and technology of the discrete components as well as of the more complex systems, these findings can be used as the basis for another research of practical applications.

## Keywords

Frequency filter, coil, capacitor, interdigital, FEM, ANSYS, Ansoft Designer.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>STATE-OF-THE-ART</b>	<b>5</b>
3.1	Nosné substráty	6
3.2	Tlustovrstvové pasty a jejich depozice	7
<b>4</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE PASIVNÍCH STRUKTUR TLUSTOVRSTVOVOU TECHNOLOGIÍ</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Návrh, realizace a měření planárního kmitočtového filtru s tisknutým dielektrikem</b>	<b>12</b>
4.1.1	Návrh filtru	12
4.1.2	Realizace filtru s kondenzátory s tisknutým dielektrikem	14
4.1.3	Měření filtru	17
4.1.4	Dosažené výsledky	17
<b>4.2</b>	<b>Charakterizace paralelně vázaného rezonančního filtru</b>	<b>20</b>
4.2.1	Zařazení experimentu	20
4.2.2	Teoretický návrh	20
4.2.3	Simulace vlivu použitého typu vodivé pasty	22
4.2.4	Simulace vlivu tloušťky základního substrátu	25
4.2.5	Získané výsledky	28
<b>4.3</b>	<b>Paralelně vázaný mikropáskový filtr s děleným propustným pásmem</b>	<b>29</b>
4.3.1	Úvod	29
4.3.2	Teoretický návrh	29
4.3.3	Simulace paralelně vázaného mikropáskového filtru s děleným propustným pásmem	30
4.3.4	Získané výsledky	31
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>32</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY</b>	<b>35</b>
	<b>SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ</b>	<b>37</b>
	<b>ŽIVOTOPIS</b>	<b>39</b>

# 1 Úvod

Elektronické obvody pro mikrovlnné signály se vyznačují celou řadou specifických vlastností, jež vychází z požadavku na zpracování tohoto druhu signálu. Se vznikem nových technologií prošla také tato oblast zásadním vývojem, což umožnil především rozvoj jak polovodičových, tak vrstevných planárních technologií. Vedení signálu v oblasti mikrovlnných kmitočtů bylo původně realizováno s pomocí vlnovodů, dále pak koaxiálními vedeními, a potom planární technologie přinesly možnost využití páskových vedení. Pokrok v oblasti vrstevných, a především tlustovrstevných technologií, a to jak v dostupných materiálech, tak i v technologických procesech, posunul rozlišení na hodnoty řádově desítek až jednotek mikrometrů. Dnešní moderní fotolitografické techniky umožňují realizovat jak mikropásková vedení, tak elektronické prvky s rozloženými parametry s vysokou přesností a také reprodukovatelností, což v minulosti nebylo možné.

Plošné (planární) vrstevné struktury pro vysoké kmitočty tvoří elektronické systémy složené převážně z pasivních obvodových prvků. Tyto prvky jsou zde realizovány aditivní depozicí vrstev na základní substrát, přičemž jsou uspořádány na základě topologického návrhu, který je charakterizován dvourozměrnou topologií. Přitom základní požadavky na provedení konkrétního prvku vychází z kmitočtového pásma, pro které je tento prvek určen. Důležitým kritériem v tomto případě je, zda se jedná o prvky určené pro kmitočtové pásmo, u něhož je odpovídající vlnová délka řádově srovnatelná s rozměrem dané struktury. Taková struktura má potom charakter prostředí, v němž v různých jeho bodech má signál v tomtéž okamžiku různou fázi. Tyto struktury, označované jako mikrovlnné, pracují s kmitočty řádově v oblasti nad 1000 MHz, jak je uvedeno v [1]. Tuto hranici nelze stanovit v zásadě jednoznačně, nicméně obecně jsou za mikrovlny považovány kmitočty s takovou vlnovou délkou, která nepřekročí řádově desítky centimetrů, což souvisí s rozměry elektronických pasivních prvků. Pásmo mikrovln navazuje přímo na pásmo kmitočtů televizních. Jedná se o kmitočty, které jsou ve velké míře využívány v telekomunikační a dnes stále více i v informační technice, proto je znalost systémů pracujících na těchto kmitočtech důležitá pro správný návrh, optimalizaci a inovaci zařízení pro tyto aplikace.

Velmi důležitou oblastí, na kterou je zaměřena i převážná část této práce, je problematika struktur s rozloženými parametry. Zatímco struktury se soustředěnými parametry jsou charakterizovány tím, že každá část odpovídá nějakému základnímu obvodovému prvku (pro vedení se předpokládá nulová hodnota odporu, indukčnosti i kapacity), jsou u struktur s rozloženými parametry jednotlivé dílčí části struktury charakterizovány i více než jediným parametrem (část struktury, která má vlastnosti vedení, současně představuje i induktivní a kapacitní prvek) [2].

Předložená práce se zabývá problematikou vytváření planárních struktur s využitím vrstevných technologií na bázi tlustých vrstev. I když dosud převládá v této oblasti technologie tenkovrstvá, tlusté vrstvy jsou deponovány nevakuumovým způsobem, což přináší značné cenové výhody oproti všem technologiím vakuovým. Současně tlustovrstevná technologie vykazují s postupem času řadu zlepšení, jak v oblasti materiálů, tak depozičních procesů, a proto jejich parametry se v některých směrech blíží parametrům tenkých vrstev, což je opodstatňuje i k využití pro mikrovlnné obvody. Práce je zaměřena na ověření některých tlustovrstevných aplikací pro mikrovlnné kmitočty a definováním jejich vhodnosti pro různé typy planárních struktur, včetně filtrů.

## 2 Cíle disertační práce

Cíle disertační práce jsou zaměřeny na rozšíření poznatků z oblasti aplikace tlustovrstvových technologií se zaměřením na struktury pro vysoké kmitočty, přičemž dosažené výsledky doplní poznatky, které jsou již úspěšně vyřešeny a popsány v dostupné odborné literatuře. Jádro disertační práce tvoří návrh a prověření vlastností vybraných tlustovrstvových struktur, přičemž tyto vlastnosti budou zjištěny jak simulací, tak i praktickými realizacemi.

V pramenech [1], [2] jsou zavedeny matematické vztahy vedoucí k řešení planárních struktur s vysokými kmitočty. Naproti tomu zdroj [3] udává technologické detaily výroby mikrovlnných struktur, jako je technologie tlustých nebo tenkých vrstev, některé další specifické technologie (Mid-film), podrobnosti lze najít v [7]), přičemž v této publikaci lze dohledat i některé matematické vztahy nutné k návrhu. Taktéž v [4] jsou tyto matematické vztahy pro řešení uvedeny, přičemž tato publikace není přímo zaměřena na problematiku tlustovrstvových struktur a zabývá se planárními strukturami obecně. V pramenech [7], [8], [9] jsou uvedeny technologické detaily výroby vícevrstevných struktur bez výraznějšího uvedení matematických vztahů, které umožňují danou strukturu analyticky popsat. Zdroj [19] potom udává velké množství matematických vztahů sloužících k popisu struktur s rozloženými parametry.

Tato disertační práce navazuje na publikace [3] a [4] s tím, že v ní je detailně řešena problematika aplikace tlustovrstvové technologie pro návrh a výrobu planárních obvodů, jak pro radiotechnické kmitočty, tak i pro mikrovlnné pásmo.

Protože tato problematika je poměrně široká, a vyžaduje řešení obvodových i technologických problémů, jsou cíle disertační práce definovány v následujících pěti oblastech:

- Návrh, realizace a simulace vlastností tlustovrstvových cívek pro mikrovlnné aplikace
- Návrh, realizace a vyšetření vlastností tlustovrstvových interdigitálních kondenzátorů pro mikrovlnné aplikace
- Vývoj a realizace planárního filtru tlustovrstvovou technologií, ověření jejich vlastností a parametrů a srovnání s vlastnostmi navrženými. Předpokládá se pasivní filtr složený z prvků se soustředěnými parametry (cívek a kondenzátorů). Prověření vlastností filtru rovněž počítá s konstrukcí kovového měřicího boxu, který umožní získat přesné hodnoty parametrů. Prověření různých způsobů realizace.
- Návrh planárního filtru pro pásmo v řádu GHz složeného z paralelně vázaných mikropásků. Ověření charakteristik pro různé kombinace použitých aplikačních materiálů a rovněž pro různou hodnotu tloušťky základního substrátu. Prošetření změn charakteristik v důsledku hodnot tloušťky u základního substrátu.
- Návrh planárního filtru pro pásmo v řádu GHz složeného z paralelně vázaných mikropásků. Úprava návrhu vedoucí k rozdělení amplitudové kmitočtové charakteristiky na dvě části, která budou odděleny oblastí s větším útlumem. Ověření výsledného návrhu simulací.
- Hlavním cílem je návrh a ověření nové tlustovrstvé optimalizované technologie tisku mikrovlnných obvodů se soustředěnými i s rozloženými parametry. Technologie bude optimalizována k dosažení co nejvyššího pracovního kmitočtu.

### 3 State-of-the-art

Běžně realizované elektronické integrované obvody na bázi vrstevných technologií jsou vytvořeny na nosném substrátu, buď anorganickém (keramické materiály), nebo organickém (polymerní materiály). Pasivní síť je integrována na substrát obvykle v několika technologických krocích, zatímco aktivní prvky, pokud jsou používány, jsou vsazeny ve formě čipů. Mezi hlavní přednosti vrstevných technologií patří právě možnost integrace pasivních prvků, což přináší nejen značné úspory rozměrové, ale i nové aspekty ve zlepšení dosahovaných parametrů a aplikačních možností. Zde se nabízí široké možnosti integrace pasivních prvků (rezistory, cívky, kondenzátory a další funkční řešení v planárním uspořádání, včetně prvků s rozloženými parametry).

Obvody se soustředěnými parametry jsou charakterizovány obvodovým schématem sestávajícím z jednotlivých prvků a jejich řešení obvykle využívá klasických algebraických a diferenciálních rovnic. Přitom obvodový prvek ve schématu je v tomto základním pohledu realizován jedinou fyzicky ohraničenou strukturou (odpor, kondenzátor, cívka) vytvořenou na nosném substrátu. Při jejich návrhu se předpokládá, že vodivá síť spojující tyto jednotlivé prvky má sama o sobě pouze nekonečnou vodivost  $G$  a parametry  $L$  a  $C$  mají nulovou hodnotu. V tomto pohledu se dále uvažuje, že parametry  $R$ ,  $L$  a  $C$  jsou soustředěny v příslušných fyzicky jednoznačně určených definovaných strukturách (odporech, cívkách a kondenzátorech), z nichž je obvod složen. Dalším předpokladem je, že tyto struktury kromě těchto svých parametrů již žádné další parametry nevykazují (nulová rezistivita a kapacita u cívky, nulová indukčnost a vodivost dielektrika kondenzátoru). Potom lze takto definovat *obvod se soustředěnými parametry*.

*Obvody s rozloženými parametry* mají odlišnou koncepci, když se předpokládá, že parametry  $R$ ,  $L$ ,  $C$  a také vodivost  $G$  nejsou soustředěny v určitých částech obvodu, ale že jsou v určité míře přítomny v každé části každé dílčí struktury obvodu. Pro ilustraci lze uvést příklad, kdy rovný pásek vedení nemá pouze nekonečnou (nebo velmi vysokou) hodnotu vodivosti  $G$ , ale má také charakteristickou hodnotu indukčnosti (vlastní i vzájemné) a vzhledem k uspořádání vůči ostatním částem vedení i kapacitu. Jedná se zde o takové parametry obvodu, které se začínají projevovat na vysokých kmitočtech u jednotlivých částí, i když indukčnost a kapacita je relativně malá.

Každou část obvodu s rozloženými parametry je možné charakterizovat jistou hodnotou parametrů  $L$ ,  $C$ ,  $R$  a  $G$  na jednotku délky. Proto je pro řešení takových struktur nejprve navrženo náhradní schéma, které celý obvod transformuje do podoby obvodu se soustředěnými parametry. Ekvivalentní obvod se soustředěnými parametry zachovává veškeré hodnoty parametrů  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ , přičemž tyto parametry modeluje pomocí sériových a paralelních zapojení cívek, rezistorů a kondenzátorů.

#### 3.1 Nosné substráty

Substráty jsou u hybridních integrovaných obvodů nosným prostředím a musí zajistit nejen mechanické a chemické, ale především elektrické vlastnosti, jež jsou požadovány pro každou aplikaci. U obvodů mikrovlnných nicméně funkce substrátu spočívá i ve vytvoření prostředí funkčního. Např. u nesymetrického páskového vedení je pásek vytvořen na lícové straně dielektrického substrátu, zatímco strana rubová je opatřena vodivou vrstvou, která slouží jako zemnicí plocha. Protože je nosný substrát již přímo funkční součástí mikrovlnné

struktury, je nutné, aby měl co nejlépe a nejpřesněji definované parametry (mechanické i elektrické - dielektrická permitivita, ztrátový činitel aj.) Požadavky na dielektrické substráty jsou tedy mnohem náročnější ve srovnání s hybridními integrovanými obvody pracujícími na nižších kmitočtech. Substrát by měl mít vlastnosti následující [6]:

- Vysoká hodnota relativní permitivity
- Malý ztrátový činitel
- Malá změna permitivity v důsledku změn teploty a vlhkosti
- Dobrá homogenita (malý rozptyl parametrů)
- Konstantní tloušťka
- Malá drsnost povrchu
- Vysoká elektrická pevnost
- Vysoká tepelná vodivost
- Nízká hodnota TCE
- Snadná opracovatelnost
- Vysoká chemická odolnost

Relativní permitivita má vliv na délku vlny na vedení a na jeho charakteristickou impedanci. Aby měl obvod s rozloženými parametry přiměřeně malé rozměry, je vhodné pro oblast od 1 do 15 GHz volit materiály s permitivitou řádově 8 – 12. Pro kmitočty nižší, pokud má být zachován charakter rozložených parametrů při zachování rozumně malých rozměrů, je vhodné volit materiál s vyšší relativní permitivitou – vyšší než 25. Pro obvody určené pro kmitočty nad 15 GHz je naopak žádoucí používat materiály s nižší relativní permitivitou – při permitivitě vyšší by návrh některých obvodových prvků byl vzhledem k velmi malé vlnové délce obtížný. Nepříznivý vliv na vlastnosti obvodu mají dále dielektrické ztráty. Je proto nutné brát při výběru dielektrického substrátu ohled i na hodnotu ztrátového činitele.

U náročnějších aplikací je udávanou hodnotou tolerance změny charakteristické impedance  $\pm 1\%$ . Aby byl tento požadavek splněn, je nutné udržet změnu relativní permitivity v mezích  $\pm 2\%$ . Rovněž i tloušťka substrátu má na obvodové vlastnosti vliv. I zde platí, že pro odchylku  $\pm 1\%$  je nutno rozptyl tloušťky udržet v mezích  $\pm 2\%$ . [4]

Teplotní závislost permitivity a teplotní roztažnost je dalším hlediskem, které má význam především u rezonančních obvodů. Rezonanční kmitočet zde závisí jak na permitivitě, tak na přesných geometrických rozměrech, proto je nutno změně těchto dvou parametrů v závislosti na teplotě věnovat patřičnou pozornost.

U žádného ze současných materiálů nejsou současně splněny všechny požadavky kladené v předchozím výčtu, proto je výběr konkrétního materiálu kompromisem, kde lze případně některému požadavku přiložit větší váhu v závislosti na aplikaci.

Správná volba konkrétního substrátu rovněž záleží na následujících okolnostech [3]:

- Je cena konkrétního substrátu adekvátní zamýšlené aplikaci?
- Jaká technologie má být užitá?
- Jaký je rozsah kmitočtů a teplot pro aplikaci?
- Jsou k dispozici dostatečné rozměry substrátu pro zamýšlenou aplikaci?

Na základě uvedených skutečností a z nich vyplývajících požadavků je nutné uvažovat pro mikrovlnné aplikace s různými typy substrátů, resp. se substráty různého materiálového složení. Tak přichází do úvahy:

- Polykrystalické keramické materiály
- Skleněné substráty
- Monokrystalické materiály

### 3.2 Tlustovrstvové pasty a jejich depozice

Tlustovrstvové pasty představují základní funkční prvek v technologii tlustých vrstev, neboť slouží pro vytváření pasivních sítí v integrované formě. Jejich charakteristickým rysem je vysoká mechanická, chemická a především teplotní odolnost a také nevakuový způsob nanášení. Všechny tlustovrstvové pasty mají jisté společné obecné vlastnosti:

1. Jde o viskózní materiály s reologickými vlastnostmi vhodnými pro technologii síťotisku
2. Jsou v zásadě tvořeny třemi složkami: složkou funkční, která propůjčuje příslušnou elektrickou vlastnost, složkou vazební, která zajistí mechanickou pevnost a uchycení na substrát; a složkou pojivovou, která poskytuje žádoucí vlastnosti reologické
3. Vlastnosti past jsou velmi závislé na procesu nanášení, pro který jsou určeny, a současně mohou být doporučeny pro specifický substrát.

Tlustovrstvové pasty jsou nanášeny technologií *sítotisku*. Podstatou této technologie je protlačování tixotropního viskózního materiálu přes síťovinu. Protože pasty nejsou tekuté, musejí být přes otvory v síťovině protlačovány působením vnější síly, působící směrem k povrchu substrátu [3].

Na proces síťotisku má vliv kolem 50 různých faktorů, které lze sdružit do jednotlivých kategorií [5]:

- Pasta
- Substrát
- Stěrka
- Úprava po tisku
- Operátor / stroj

Při síťotisku se stěrka pohybuje po povrchu síta, přičemž zaplňuje každou aperturu v síťovině pastou. Stěrka přitom přitlačí síto k substrátu, přičemž pasta povrch substrátu smočí. Tímto je určena optimální tloušťka vrstvy. Stěrka postupně přejede přes celý substrát, přičemž na tento substrát přitlačuje síťovinu, na konci tisku je od síťoviny oddálena. Síťovina se oddělí od substrátu, přičemž na substrátu zůstane natisknutá vrstva pasty obsažená ve volných okách síta. Tato vrstva má nejprve nerovný povrch v důsledku tisku, přičemž postupně nastává jeho zarovnání.

## Vrstvy vodivé

Pro vodivé vrstvy vyplývají požadavky z jejich účelu. Tedy v první řadě je tímto požadavkem dobrá elektrická vodivost. Dalšími požadavky jsou dobrá adheze k substrátu, materiálová kompatibilita a možnost pájení i snadné nanášení. [5]

Pro dosažení dobrých elektrických vlastností je požadováno, aby vodivost natisknutého vodiče byla podobná vodivosti čistého kovu. Je žádoucí, aby taková vrstva měla obdélníkový průřez a hladký povrch. U tlustovrstvových vodičů se zpravidla vyskytují tyto charakteristické vlastnosti [3]:

- drsný, nerovný povrch
- zaoblené okraje
- stopy po síťovině

Tlustovrstvové vodivé pasty jsou směsí funkční složky, která propůjčuje příslušnou žádanou elektrickou vlastnost (vodivost) a složky vazební (skelná fritta), která tvoří mechanický rámec a zajišťuje adhezi k povrchu substrátu.

Funkční složka má formu malých částic, ve většině případů drahých kovů. Těmito kovy jsou nejčastěji zlato, stříbro, platina a palladium. Rozměry částic dosahují řádově  $\mu\text{m}$ . Tyto částice musí po výpalu zaručit požadovanou vodivost. Toho je docíleno tím, že se částice ve vypálené struktuře nacházejí ve vzájemném mechanickém kontaktu. Existují rovněž materiály na bázi mědi, ale ty vyžadují zvýšené nároky na atmosféru během výpalu z důvodu vysoké oxidační schopnosti mědi.

Součástí vodivé vrstvy je nicméně i vazební složka, která tvoří mechanickou oporu a na samotné funkci se nijak nepodílí. Skelná fritta, která je ve vodivé vrstvě zastoupena přibližně v 8 % hmotnosti, představuje nicméně výrazné zvýšení měrného odporu vrstvy ve srovnání s materiálem čistého kovu. Jsou používána nízkotavná skla (křemičitooolovnatá, borosilikátová nebo boritoolovnatá). Tato skelná fritta vytváří chemickou vazbu na substrát a zajišťuje dostatečnou přilnavost natisknuté vrstvy.

Jinou cestou je použití vodivých sítotiskových past s vazbou oxidovou, která je založena na reakci některých oxidů s materiálem základního substrátu. Pro vytvoření požadované vazby je požadujícím množstvím do 4 % hmotnostních, čímž je docíleno lepšího elektrického kontaktu mezi částicemi kovové složky, a tím i lepších elektrických vlastností. Takové pasty však vyžadují vyšší vypalovací teplotu, ta se z 800 – 850 °C posouvá na 950 – 1000°C. Proto byl vyvinut další typ, jímž je pasta se smíšenou vazbou, která spojuje požadované vlastnosti obou předchozích typů.

Přesnost obrazců je dána složitostí vyráběného obvodu. V [3] je pro dodržení charakteristické impedance v mezích  $\pm 1\%$  dovolená změna šířky mikropásku 2%. Přesná maximální tolerance charakteristických parametrů závisí pochopitelně na druhu a účelu struktury.

Dalším kritériem je tzv. hloubka vniku elektrického pole do materiálu (*skin efekt*) při dané teplotě a kmitočtu. Vnik elektrického pole do materiálu zpětně ovlivňuje vedení proudu vodičem. Je proto požadováno, aby síla natisknuté vrstvy byla minimálně rovna čtyřnásobku hloubky vniku do materiálu. Protože hloubka vniku závisí na kmitočtu, je na kmitočtu závislá i požadovaná síla nanášené vrstvy.

Volba vhodné vodivé pasty závisí na zamýšlené aplikaci. Důležitým hlediskem je nejen hledisko technologické, ale i ekonomické. Pasty lze rozdělit podle použití pro různé aplikace, přičemž těmito aplikacemi jsou typicky:

- vysoce spolehlivé a přesné obvody
- výkonové a vysokonapěťové obvody
- obvody pro spotřební elektroniku
- vícevrstvé obvody
- potenciometry, odporové dráhy

Složení TLV past se liší podle zamýšlené aplikace. U mikrovlnných obvodů je požadována co nejlepší vodivost, již je dosaženo použitím prášků keramiky namísto skelné frity. [22] Jako vodivá složka je použito zlato. Uvedené složení navíc nabízí lepší vlastnosti pro kontaktování vzhledem k absenci skla [22].

V [23] je uvedeno složení pasty založené na bázi stříbra. I tato pasta využívá vazební složku, která neobsahuje sklo. Vazební složka je zde tvořena oxidy olova, hliníku, titanu a bismutu. V Tab. 3 je uvedeno procentuální složení hmotnosti podle [23]. Jako maximální kmitočet, který je přenášen mikropáskovým vedením při zachování vyhovujících vlastností, je v [23] uvedeno 18 GHz.

**Tab. 1.** Složení Ag vodivé pasty [23]

Složka	Použitý materiál	Hmotnostní %
<b>Funkční složka</b>	<b>Stříbro</b>	80
<b>Vazební složka</b>	<b>Oxid olova</b> <b>Oxid hliníku</b> <b>Oxid titanu</b> <b>Oxid bismutu</b>	10
<b>Transportní složka</b>	<b>Ethyl cellulose</b>	10

#### Vrstvy odporové

Zde jsou základními požadavky dobrá stabilita a nízká teplotní závislost hodnoty rezistivity. V [3] jsou jako uvedeny jako nejčastěji požadované hodnoty 10 až 1000  $\Omega$ . Tlustovrstvové materiály používané pro vytváření odporů jsou založeny na dvou principech. Prvním je regulace odporu poměrem vodivé složky vzhledem ke složce vazební a druhým pak odporové materiály na bázi kysličníků, např. ruthenia [21].

Požadavky na odporové vrstvy se neliší od požadavků na materiály používané pro konvenční obvody. Jsou zde sledována následující kritéria:

- jmenovitá hodnota
- stabilita parametrů
- teplotní součinitel
- šum

U mikrovlnných obvodů je rovněž důležitým faktorem kmitočtová závislost obvodu, která je ovlivněna jak technologickým řešením výsledného rezistoru, tak i složením vrstvy. Pro elektrické vlastnosti je důležité složení a uspořádání vodivé a dielektrické (vazební) složky.

Vodivá složka je tvořena částicemi kovu o velikosti řádové v  $\mu\text{m}$ . Tyto částice během teplotního zpracování procházejí reakcemi, při nichž vznikají oxidy.

Jak již bylo zmíněno, u nejnovějších odporových materiálů je oxidová část přidávána jako samostatná složka (nevzniká výpalem), což umožňuje vyšší přesnost parametrů (stabilita, teplotní součinitel), neboť jsou eliminovány vlivy, které by se během teplotního zpracování mohly uplatnit. Příkladem takového systému je pasta založená na  $\text{RuO}_2$  [13].

Oxid ruthenia ( $\text{RuO}_2$ ) je stabilní do teploty  $100^\circ\text{C}$  má elektrické vlastnosti srovnatelné s kovem a rezistivitu okolo  $50 \mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$  a TKR je kladné, má hodnotu okolo  $3000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Dalším krokem je přidání oxidu niobu. Tím dojde ke snížení vysoké hodnoty TKR typické pro samotný oxid ruthenia [21].

Výsledná struktura odporové vrstvy má nepravidelné uspořádání, částice kovu jsou rozptýlené náhodně. Přesné uspořádání zde závisí mj. na teplotě měknutí použitého skla, smáčecích vlastnostech, velikosti částic kovu nebo vlivu sintrace na vodivý materiál.

Ve struktuře odporové pasty je většina vodivých částic obklopena spojitou skleněnou maticí. Tím má skelná složka výrazný vliv na vlastnosti odporové vrstvy.

Mechanismus vedení proudu spočívá jak v přímém tunelování elektronů přes tenkou bariéru, tak i v přechodu nepřímém, kdy elektron prochází přes několik mezistavů ve skleněné matici. Detaily tohoto mechanismu jsou blíže popsány v [14].

Předpokládá se, že skleněná matrice tvoří vysokoenergetický zakázaný pás, kde mezi vodivými částicemi existují potenciálové bariéry. Při sintraci však dochází ke vzniku příměsových stavů ve skle, které se podílí na vedení proudu. Tím dochází k interakci kovových zrn se sklem, přičemž může nastat některý ze tří mechanismů:

- Mělké příměsi posouvají Fermiho hladinu systému do blízkosti vodivostního pásu skla, čímž je způsobena polovodivost skla (u skel se širokým zakázaným pásmem).
- Hluboko lokalizované stavy v zakázaném pásmu skla, které rozšiřují stavy pozorovatelné v amorfních sklech; tyto stavy vytvářejí rezonanční centra pro přímé tunelování elektronů.
- Nečistoty ve skle mohou vytvářet pásmo delokalizovaných stavů daleko od vodivostního a valenčního pásu skla

U TLV rezistorů dosahují hodnoty odporu  $R/\square = 10 \Omega/\square$  až po  $10^7 \Omega/\square$  při tloušťce vrstvy kolem  $20 \mu\text{m}$ . Výsledná hodnota odporu přitom závisí na procentuálním obsahu kovových částic v celkovém objemu, tento obsah se pohybuje v rozsahu od 10 do 70 % objemových. Dále závisí výsledný odpor na poměru velikosti vodivých a skleněných částic a na teplotním režimu při výpalu.

V oblasti mikrovlnných hybridních integrovaných obvodů se realizují převážně rezistory o malých hodnotách, proto jsou zde požívány pasty s hodnotou vrstevového odporu do  $10 \Omega/\square$ . Tyto pasty jsou charakteristické nižší hodnotou teplotního součinitele, který se pohybuje obvykle kolem 100 ppm, což je mnohem nižší hodnota než např. u křemíku.

### Vrstvy dielektrické, izolační a krycí

U mikrovlnných struktur je izolační dielektrická vrstva přímo aktivní částí obvodu, proto je zde požadována mimo jiné i reprodukovatelná relativní permitivita, odolnost proti průrazu a malý výskyt poruch a zkratů. Jako vhodný pro náročné aplikace je v [5] uveden oxid křemičitý nanášený pyrolyticky.

Základní materiály jsou zde odvozeny od materiálů, které se používají pro dielektrika klasických kondenzátorů. U mikrovlnných obvodů jsou využívány materiály typu I, které jsou charakteristické nízkou permitivitou, nízkým ztrátovým činitelem a nízkou teplotní závislostí. Tyto materiály jsou v pastě smíchány s pojivovou složkou, se kterou vytvářejí vazbu s podložkou. Pro směsný systém keramika – sklo platí pro stanovení permitivity Lichteneckerův směsný vztah:

$$\log \varepsilon = V_1 * \log \varepsilon_1 + V_2 * \log \varepsilon_2 \quad (2.2)$$

kde  $\varepsilon$  – výsledná permitivita systému (-)  
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – permitivita dílčích složek (-)  
 $V_1, V_2$  – objemové poměry dílčích složek (%)

Ze vztahu (2.2) je patrné, že závislost dosahované kapacity na poměru obou složek není lineární, což značně omezuje velikost výsledné kapacity. Obtížnost realizace tlustovrstvových kondenzátorů roste s rostoucími požadavky na vyšší hodnoty kapacity.

Nejpoužívanějšími materiály pro funkční složku jsou  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$ .

Na výsledných dielektrických vlastnostech se tedy podílí jak funkční složka, která tvoří vazební složku, tak i skelná fritta. Přitom vazební složka představuje od 3% do 4% hmotnosti. Tato skelná fritta je nejčastěji borosilikátová, kde příměsí může být olovo, bismut, kadmium, barium či vápník.

Příprava takové skelné frity je spojena s roztavením jednotlivých složek a nalitím vzniklé taveniny do vody, čímž vznikne samotná fritta. Hlavními materiály jsou zde oxidy zinku, titanu, chromu, kadmia či niklu. Ke získání požadovaného oxidu jsou přidány další příměsí, jimiž může být jakákoliv sloučenina, za jejíž účasti vznikne požadovaný oxid při podmínkách typických pro výrobu skelné frity [24].

## 4 Návrh a realizace pasivních struktur tlustovrstvovou technologií

### 4.1 Návrh, realizace a měření planárního kmitočtového filtru s tisknutým dielektrikem

#### Čebyševova aproximace

Pro účely experimentu byl navržen filtr typu pásmová propust třetího řádu za použití Čebyševovy aproximace. Jde o nalezení nejlepší stejnoměrné aproximace funkce v intervalu  $\langle a, b \rangle$  [38]. Funkce  $h(x)$  minimalizuje maximální absolutní hodnotu rozdílu od funkce  $f(x)$ .

Interval dané funkce  $\langle a, b \rangle$  je nejprve nutno transformovat na interval  $\langle -1, 1 \rangle$ . Každému  $t \in \langle a, b \rangle$  je takto přiřazena hodnota  $x \in \langle -1, 1 \rangle$  podle vztahu:

$$x = \frac{2t - (a + b)}{b - a} \quad (4.5)$$

Aproximace probíhá pomocí tzv. Čebyševových polynomů, přičemž pro polynom  $n$  – tého stupně platí:

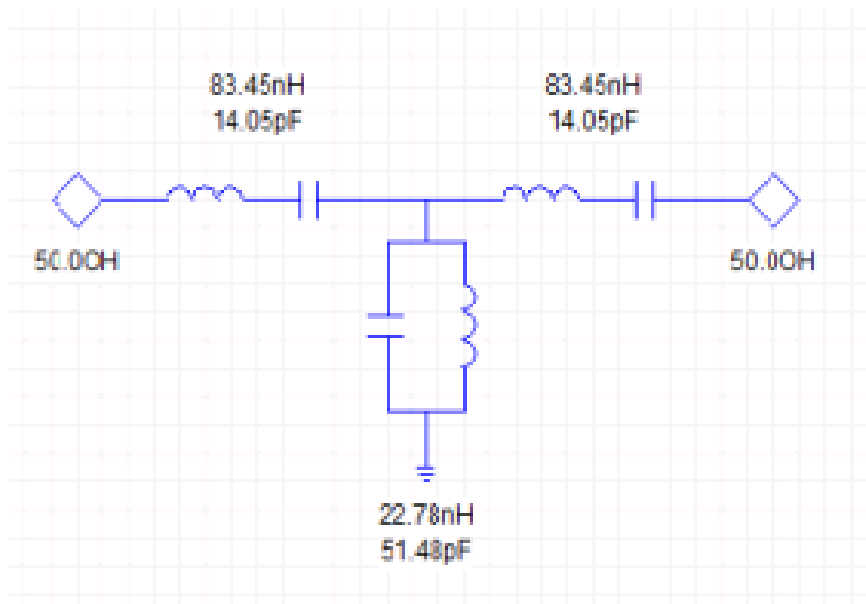
$$T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x)) \quad (4.6)$$

Dále platí, že polynomy vyšších stupňů lze konstruovat pomocí rekurentních vzorců:

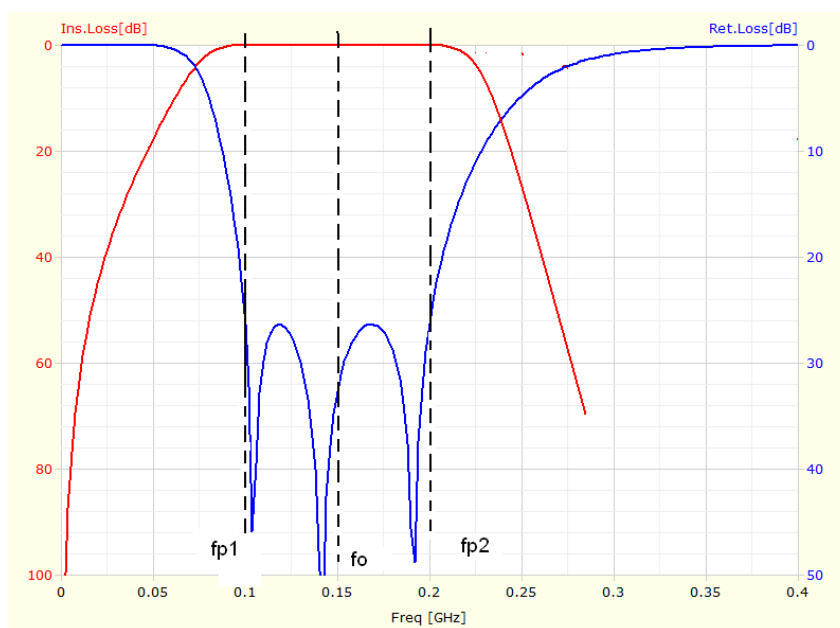
$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (4.7)$$

#### 4.1.1 Návrh filtru

Planární kmitočtový filtr je navržen pro propustné pásmo od 100 do 200 MHz, střední kmitočet je na 150 MHz. Při návrhu se počítá s ideálně soustředěnými parametry. Navržený obvod sestává z cívek a kondenzátorů. Pro výpočet parametrů byl použit návrhový systém Ansoft Designer. Tyto hodnoty kmitočtových parametrů byly zvoleny s ohledem na požadavky odpovídající technologii tlustých vrstev. Ta má rovněž jistá omezení (rozlišení), takže musí být zachovány rovněž požadavky na reprodukovatelnost celého systému, přičemž schéma je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1. Obvodové schéma navrženého filtru



Obr. 2. Obvodové schéma navrženého filtru

Z pohledu celkového uspořádání se pásmová propust skládá ze čtyř vrstev, jež jsou aditivním postupem nanášeny v následujícím uspořádání:

- Vodivá vrstva pro vytvoření vodičů, spodních vrstev kondenzátorů a cívek
- Izolační vrstva pro dielektrikum kondenzátorů
- Izolační vrstva pro překrytí cívek pro vyvedení terminálu
- Horní vrstva pro vyvedení terminálu a vytvoření horní elektrody kondenzátorů

Navržené cívky mají formu planárních pravoúhlých závitnic, jejichž střední vývod je realizován druhou vodivou vrstvou, izolovanou od spodní vodivé vrstvy izolační mezivrstvou.

Kondenzátory jsou navrženy jako klasická třívrstvá struktura. Byla zvolena šířka vodičů 400  $\mu\text{m}$ , což dostatečně splňuje požadavek na dosažení malého odporu.

Materiálem substrátu je korundová keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jejíž tloušťka je 0,65 mm a rozměry 50 x 50 mm. Průměrná drsnost substrátu je přibližně 2  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.2 Realizace filtru s kondenzátory s tisknutým dielektrikem

Schéma navrženého obvodu (obr. 1) bylo převedeno do planárního uspořádání, které je výchozí pro vytvoření obrazců motivů pro nanesení jednotlivých vrstev. Ty tvoří podklad pro realizaci masek a následně sítotiskových šablon s pomocí standardních litografických postupů [4], [12]. Při realizaci jsou tak v tomto případě postupně vytvářeny tři vrstvy, vodivá, dielektrická a opět vodivá.

Pro vodivou vrstvu byla použita sítotisková pasta na bázi stříbra a paladia ESL 9695 - G [18], jejíž základní parametry jsou uvedeny v Tab.8.

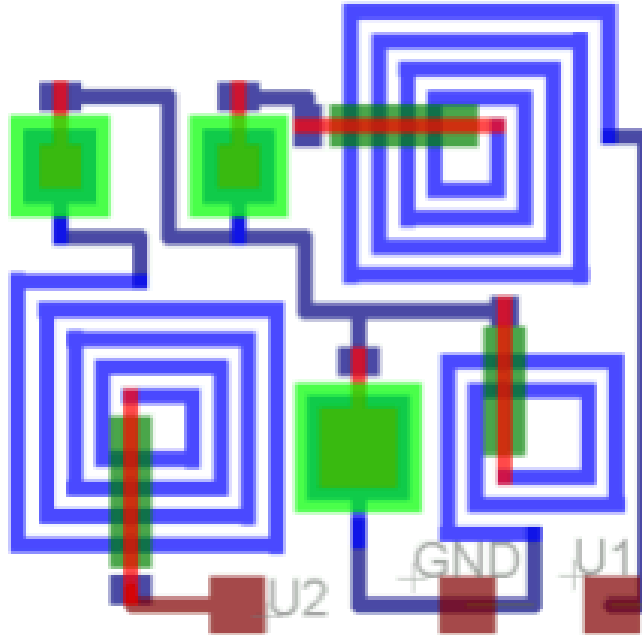
**Tab. 2.** Použité tlustovrstvové materiály (pasty)

<b>Vodivá pasta ESL 9695 - G</b>	
<b>Vrstvový odpor</b>	3 – 6 $\text{m}\Omega/\square$
<b>Tloušťka po výpalu</b>	10 $\mu\text{m}$ .
<b>Dielektrická pasta ESL 4917</b>	
<b>Tloušťka po výpalu</b>	12 $\mu\text{m}$ .
<b>Relativní permitivita</b>	8 - 11
<b>Ztrátový činitel</b>	$\leq 0.4 \%$

Kondenzátory byly realizovány s ohledem na požadovanou tloušťku dielektrické vrstvy a permitivitu sítotiskovou pastou ESL 4917 [18], jejíž hodnota permitivity je přibližně 10.

Jak již bylo zmíněno, z předloh se generují jednotlivé filmové masky pro vytvoření vlastní šablony na sítích. Na síta je nanášena světlocitlivá emulze a následnou expozicí přes filmové masky jsou vytvářeny části, které mají na sítu zůstat, zatímco plochy určené pro nanesení pasty se vypláchnou vodou. Byla použita ocelová síta s hustotou ok 320 mesh (počet ok na palec) pro vodivé vrstvy a 160 mesh pro vrstvu dielektrickou.

Na obr. 3 uvedeno topologické uspořádání navrženého kmitočtového filtru, kde je dobře patrné topologické rozložení jednotlivých pasivních prvků. Jak je dále patrné z obrázku, vývody jsou uspořádány na spodní straně substrátu.

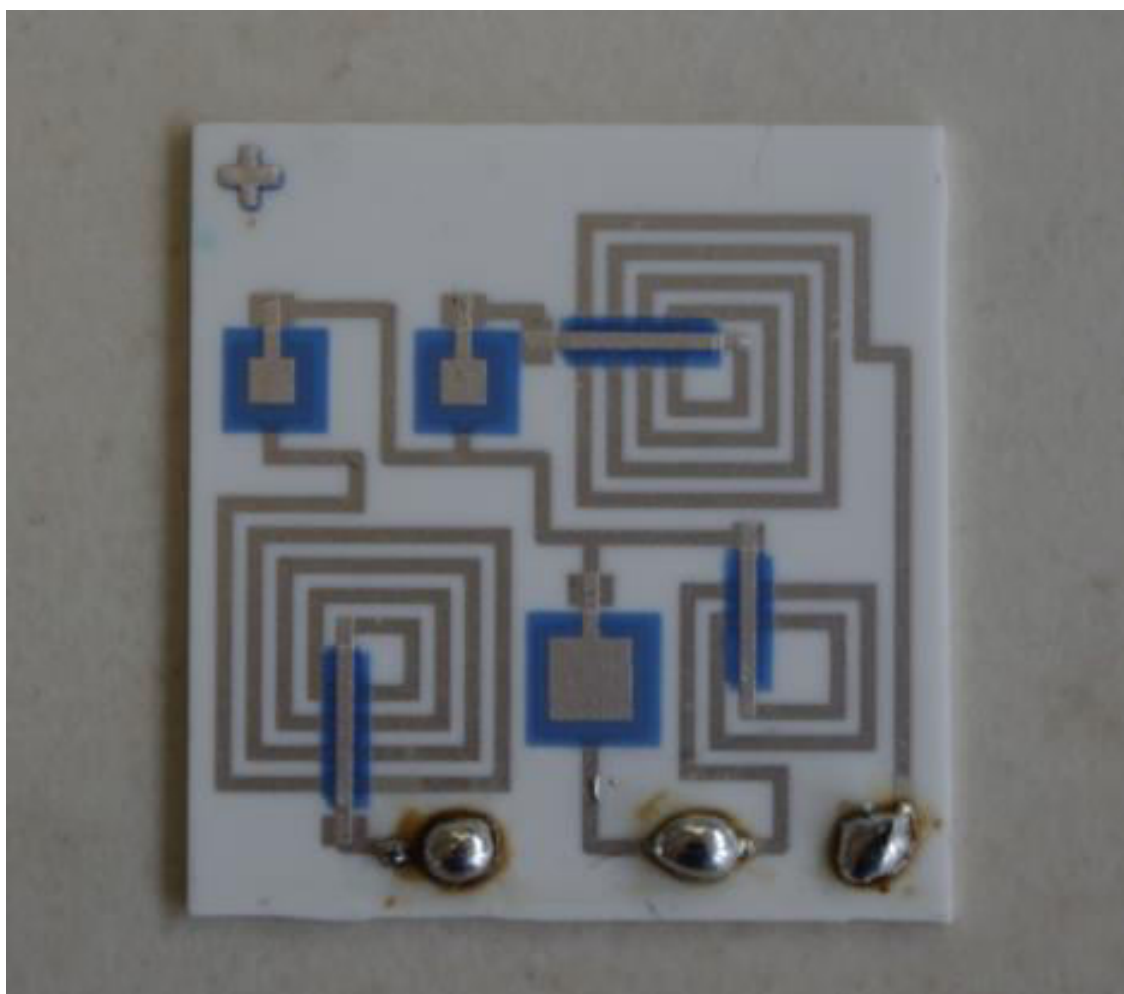


Obr. 3. Layout navrženého kmitočtového filtru

Samotný návrh je umístěn na čtvercové ploše o straně 25 mm, tím je tedy na substrát o rozměrech 50 x 50 mm možné umístit čtyři takové obrazce. Filtr je realizován standardním procesem tlustých vrstev. Každá vrstva je natisknuta jednou, výjimkou je vrstva pro překrytí cívek a vyvedení terminálů, která je tištěna třikrát. Výpal každé vrstvy následuje přibližně 5 – 10 minut po natisknutí, tak aby došlo k vyrovnání povrchu a nebyla patrná struktura síťoviny. Tímto způsobem byly zpracovány tři substráty, každý obsahuje čtyři obrazce filtru. Na obr. 4 je zobrazen realizovaný obvod. Samotná realizace sestávala z následujících kroků:

1. Tisk a zasušení spodní vodivé vrstvy
2. Výpal spodní vodivé vrstvy na 950 °C
3. Tisk a zasušení izolační vrstvy pro kondenzátory
4. Výpal vrstvy pro kondenzátory na 850 °C
5. Tisk a zasušení druhé izolační vrstvy pro vyvedení terminálů cívek
6. Výpal druhé izolační vrstvy
7. Tisk a zasušení vodivé vrstvy pro horní elektrody kondenzátorů
8. Výpal horní vodivé vrstvy

Kroky 5 a 6 byly provedeny třikrát



**Obr. 4.** Kmitočtový filtr realizovaný v tlustovrstvové technologii

Po posledním výpalu na teplotě 850 °C byla získána integrovaná struktura, u níž byla změřena tloušťka natisknutých vrstev. U vodivé vrstvy je tloušťka 10  $\mu\text{m}$ , u dielektrické vrstvy 12  $\mu\text{m}$  a tloušťka trojnásobné dielektrické vrstvy sloužící k překrytí cívky pro vyvedení středního vývodu je 35  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 Měření filtru

Vyrobené vzorky byly zapouzdřeny do kovových boxů opatřených SMA konektory. Pohled na realizovaný box je zobrazen na obr. 5. Tento box slouží jako ochrana před elektromagnetickým polem, které by mohlo ovlivnit měření a rovněž chrání obvod před mechanickým poškozením.

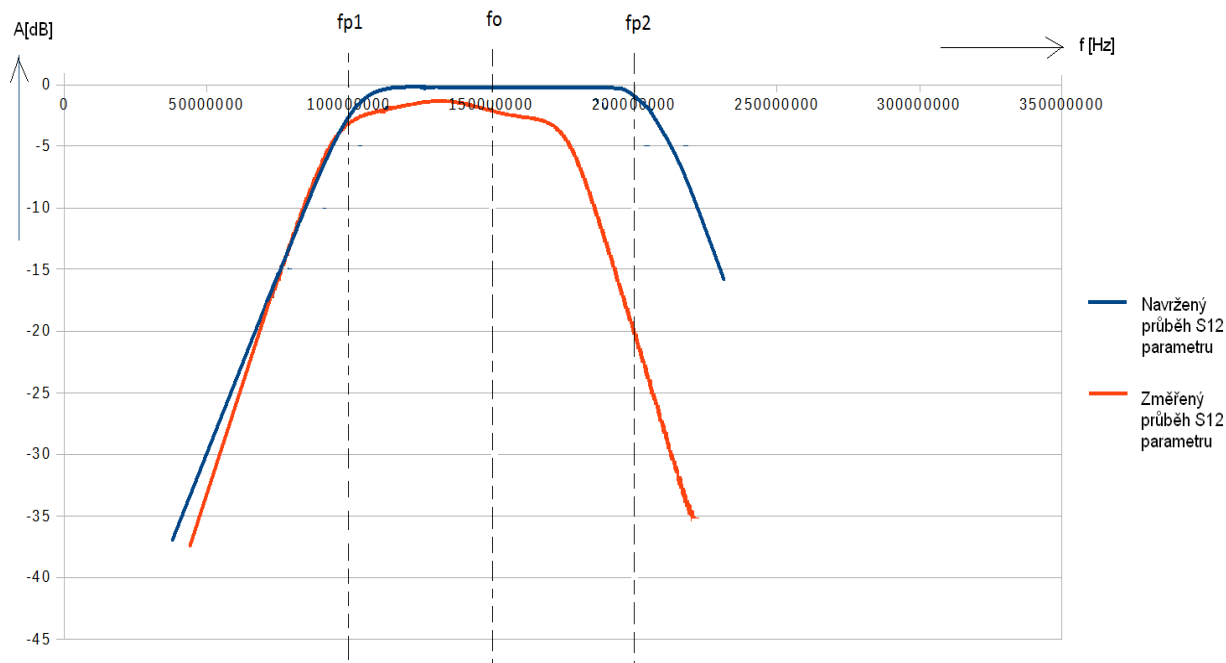


**Obr. 5.** Kovový box sloužící jako pouzdro pro HIO

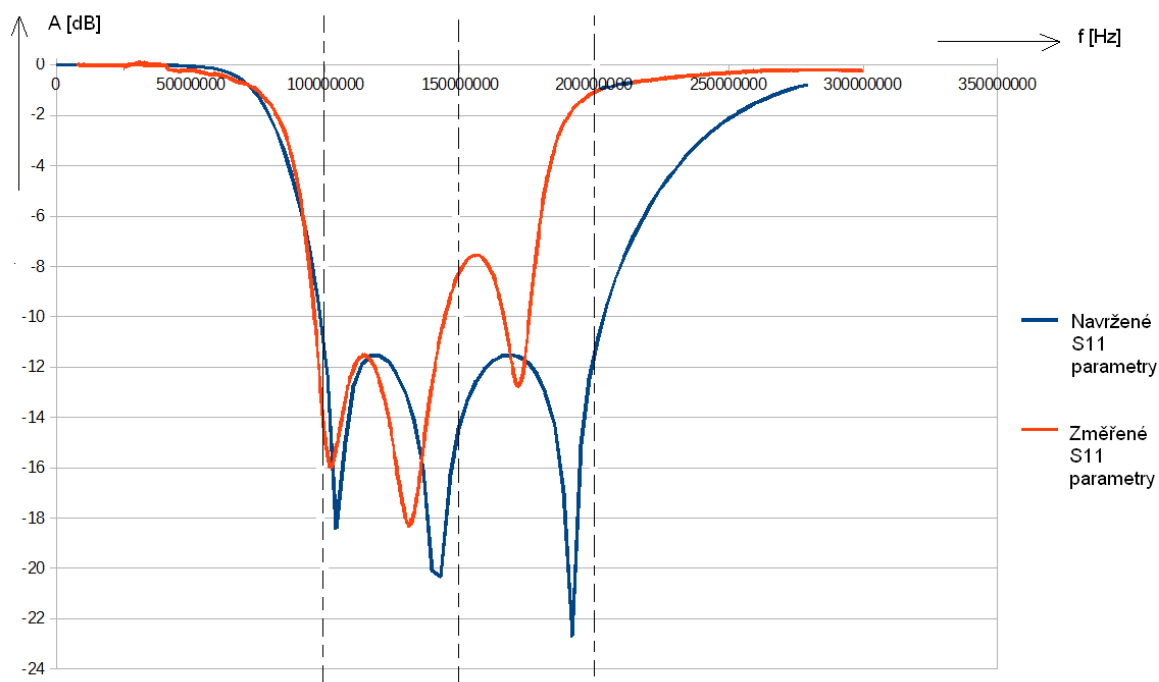
Měření bylo provedeno s použitím vektorového analyzátoru Agilent Technologies, E8364B, při kmitočtech od 10 MHz do 300 MHz. Při těchto kmitočtech byly vyneseny charakteristika. Cílem bylo především získat amplitudovou charakteristiku filtru, kde by se propustné pásmo mělo nacházet od 100 do 200 MHz.

#### 4.1.4 Dosažené výsledky

Cílem bylo ověřit skutečné kmitočtové charakteristiky, aby bylo možné provést srovnání parametrů realizovaného planárního filtru s parametry, které byly uvažovány při návrhu. Naměřená amplitudová kmitočtová charakteristika je znázorněna na obr. 6.



**Obr. 6.** Průběh S12 parametrů filtru s tištěným dielektrikem



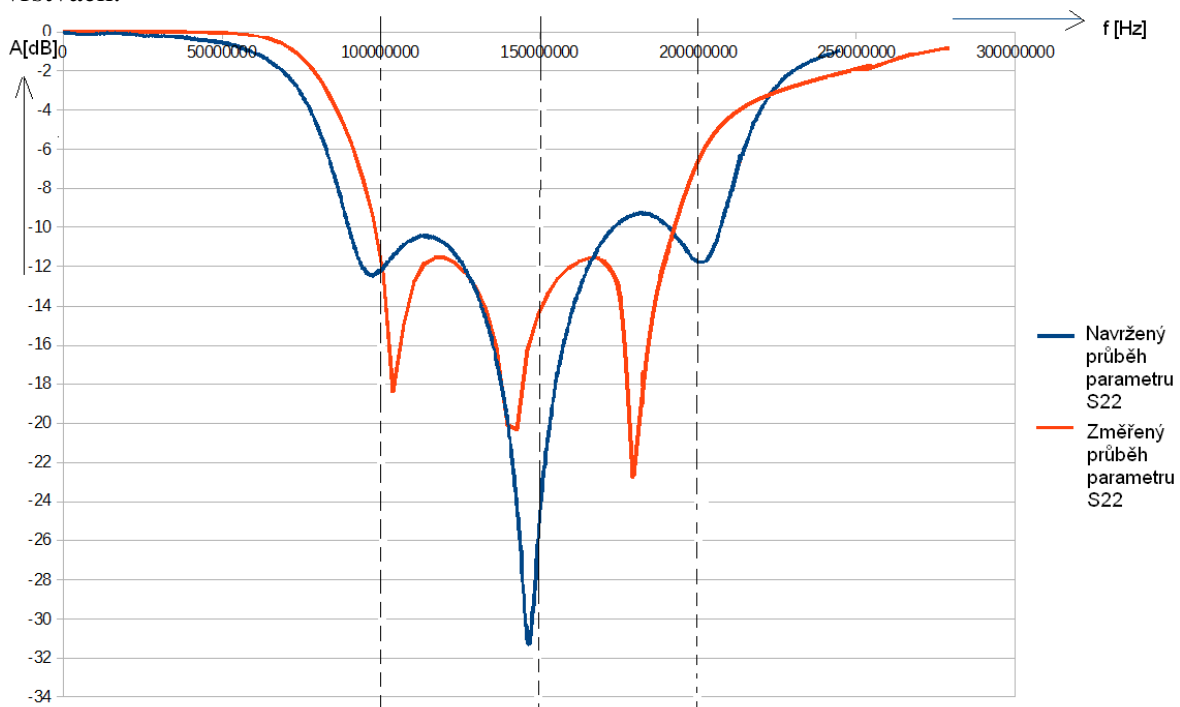
**Obr. 7.** Průběh S11 parametrů filtru s tištěným dielektrikem

Propustné pásmo realizovaného planárního kmitočtového filtru se původně na základě výpočtu mělo nacházet mezi 100 a 200 MHz. Propustné pásmo filtru začíná na teoreticky vypočtené hodnotě 100 MHz, nicméně ve své horní části dosahuje přibližně kmitočtu 170 MHz namísto vypočítaných 200 MHz. Propustné pásmo je tedy užší, jeho skutečná šířka je 70 MHz. Tento posun je způsoben parazitní induktivní vazbou, což je blíže uvedeno v kap. 4.

Největší zisk je pro kmitočet 135 MHz, zisk na kmitočtu 200 MHz je -20 dB. Strmost charakteristiky na dolním okraji propustného pásma je přibližně 20 dB/okt.

Byly proměřeny parametry S11 a S22, které vyjadřují součinitel napěťového odrazu pro vstupní a výstupní bránu. Tyto parametry by měly být u pasivního symetrického systému identické, což je v zásadě splněno. Výsledky naměřených parametrů S11 a S22 jsou uvedeny na obr. 7. a na obr. 8. Z obrázků je patrné, že změřené parametry jsou přibližně podobné.

Pro ověření vhodnosti tlustovrstvové technologie bylo důležité, jak se parametry navržených základních prvků a struktur liší od parametrů struktur realizovaných. Navrženy byly kondenzátory s kapacitou 14,05 pF, realizované kondenzátory mají kapacitu od 15,3 do 15,7 pF, což je v toleranci přibližně 10 %. Toto je z celkového pohledu dobrý výsledek, měření ale ukázalo, že problém může nastat ve vlastní realizaci kondenzátoru, kde se může projevit snížený izolační odpor, nebo dokonce zkrat. To se projevilo z celkového počtu 36 stejných kondenzátorů (tři na každém obrazci) u pěti kondenzátorů. Příčinou jsou nehomogenity v dielektrické vrstvě, která byla za účelem dosažení požadované kapacity natisknuta pouze jednou. Tím se potvrdila nutnost nanášet dielektrikum alespoň ve dvou vrstvách.



**Obr. 8.** Průběh S22 parametrů filtru s tištěným dielektrikem

Realizovaná tlustovrstvová struktura filtru s tisknutým dielektrikem má vlastnosti požadované od filtru typu pásmová propust. Dosažená strmost kmitočtové charakteristiky je dobrá, případnou korekci šířky pásma by bylo možné provést úpravou topologie obvodu. Útlum v propustném pásmu je nízký, zisk na kmitočtu 200 MHz je kolem 20 dB. Výsledky jsou ovlivněny vznikem parazitní nuly přenosu, která je důsledkem parazitní indukční vazby mezi cívkami a která je příčinou snížení horního mezního kmitočtu. Tyto výsledky byly dosaženy u konfigurace, která byla realizována standardní tlustovrstvovou technologií, bez využití další optimalizace, především bez minimalizací magnetických vazeb mezi součástkami. Další možností je uvažování VF transformátorových vazeb.

Problémem u struktur s natisknutým dielektrikem je možnost vzniku parazitních svodů, popř. i zkratu. Toto riziko lze snížit použitím více vrstev tvořících dielektrikum kondenzátoru. Toto řešení nicméně povede k větší tloušťce dielektrika a tím i k nárůstu plochy kondenzátoru, která je potřebná pro zachování požadované kapacity.

Propustné pásmo je poněkud užší, než jak bylo předpokládáno v návrhu. Na základě dosaženého výsledku je možno potvrdit, že tlustovrstvová technologie s tisknutým dielektrikem je vhodnou metodou pro realizaci nejen kmitočtových filtrů, ale obecně také pro realizaci mikrovlnných obvodů. Je nutné věnovat zejména pozornost návrhu pasivních prvků, a to jak realizaci tlustovrstvových kapacitorů, aby se zabránilo vzniku zkratů, tak také planárních cívek, kde přesnost jednoduchého analytického výpočtu je ovlivňována celou řadou technologických faktorů. Z toho je zřejmé, že je nutné spojit obvodové a technologické řešení do jednoho celku a provádět je současně.

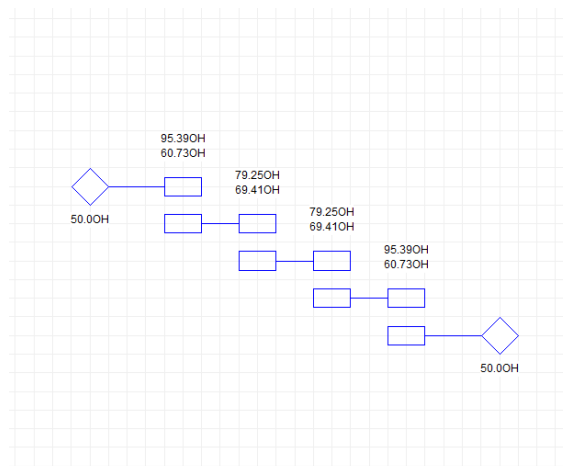
## 4.2 Charakterizace paralelně vázaného rezonančního filtru

### 4.2.1 Zařazení experimentu

Pro účely ověření byl navržen planární filtr třetího řádu s paralelně vázanými mikropáskami. V [5] je uveden návrh planárního paralelně vázaného mikropáskového filtru s centrální hodnotou kmitočtu GHz, šířka propustného pásma je 200 MHz, jde tedy o filtr pracující v C-pásmu. V [5] je dále zahrnuta realizace tohoto planárního filtru, přičemž jako materiál vodivé sítě je použita pasta Pd-Ag. Jako základní substrát dále [5] uvádí korundovou keramiku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o síle 635  $\mu\text{m}$  a permitivitou  $\epsilon_r = 9.8$ . Uvedený zdroj dále neuvádí vliv použitého materiálu vodivé sítě ani vliv tloušťky základního substrátu na charakteristiky struktury. Vliv tloušťky substrátu stejně jako vliv použitých aplikačních materiálů pro realizaci vodivé sítě jsou předmětem simulace.

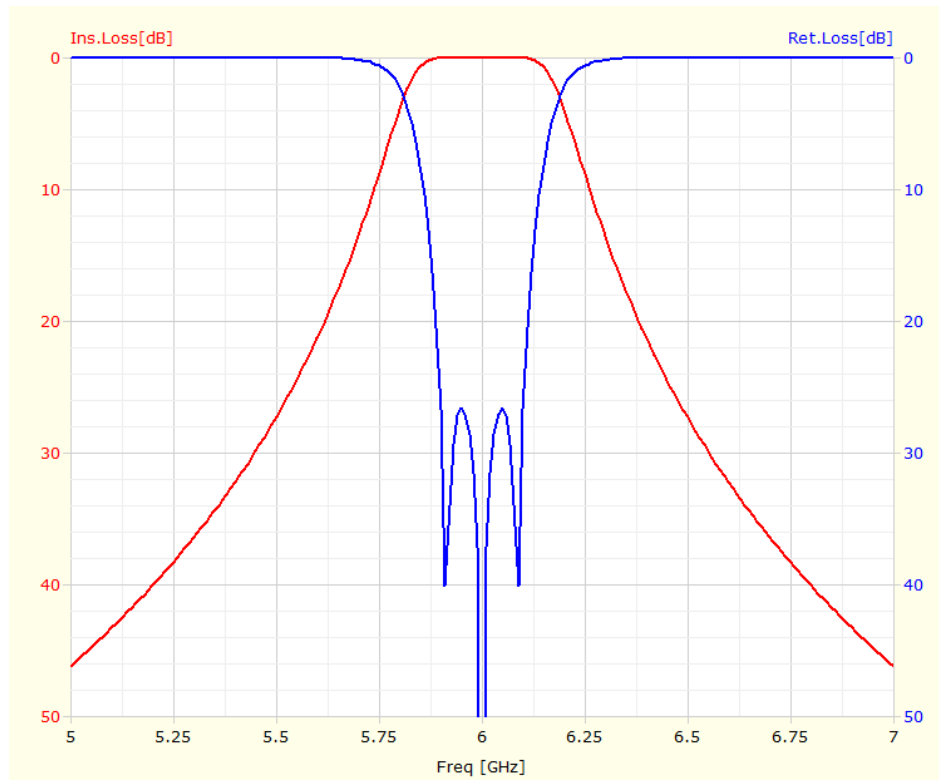
### 4.2.2 Teoretický návrh

Při daném kmitočtovém pásmu má systém filtru charakter struktury s rozloženými parametry. K návrhu byl užit návrhový systém Ansoft Designer, který je použit i k simulaci.



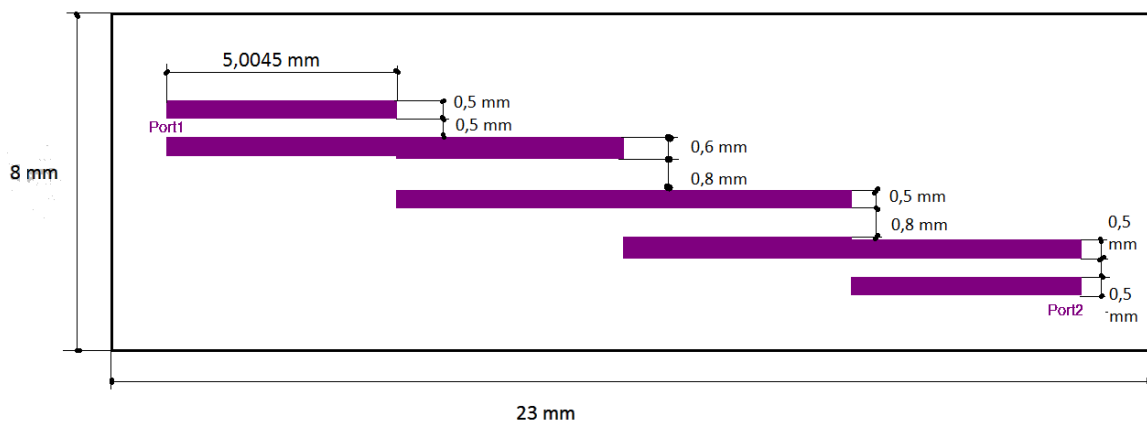
**Obr. 9.** Schéma paralelně vázaného mikropáskového filtru navrženého pro práci v C-pásmu

Na obr. 10 jsou uvedeny amplitudové kmitočtové charakteristiky S11 a S12.



**Obr. 10.** Navržené kmitočtové charakteristiky

Navržený filtr má formu paralelně vázaných mikropáskových vedení s rozměry uvedenými na obr. 11.



**Obr. 11.** Topologie navrženého filtru (souvislá zemní plocha je ze spodní strany substrátu)

Uvedený typ filtru byl zvolen na základě již zmíněného experimentu uvedeného v [5]. Pro zjednodušení není na obrázku zakreslena zemní vrstva.

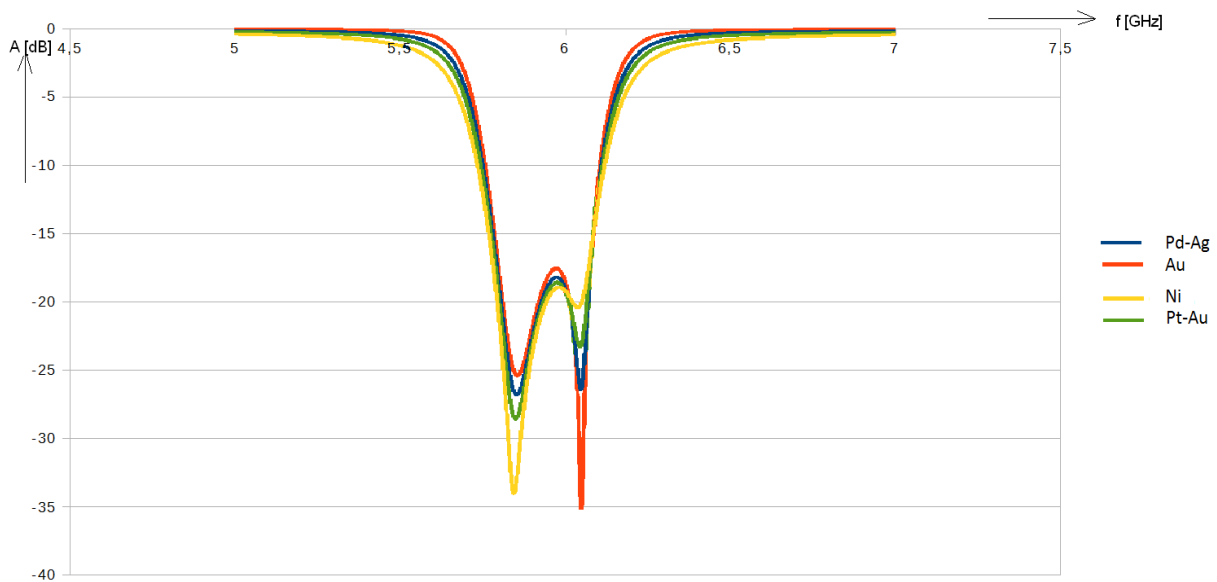
### 4.2.3 Simulace vlivu použitého typu vodivé pasty

U navrženého filtru byly uvažovány různé materiály použité pro realizaci vodivé sítě, mající formu paralelně vázaných mikropásků.

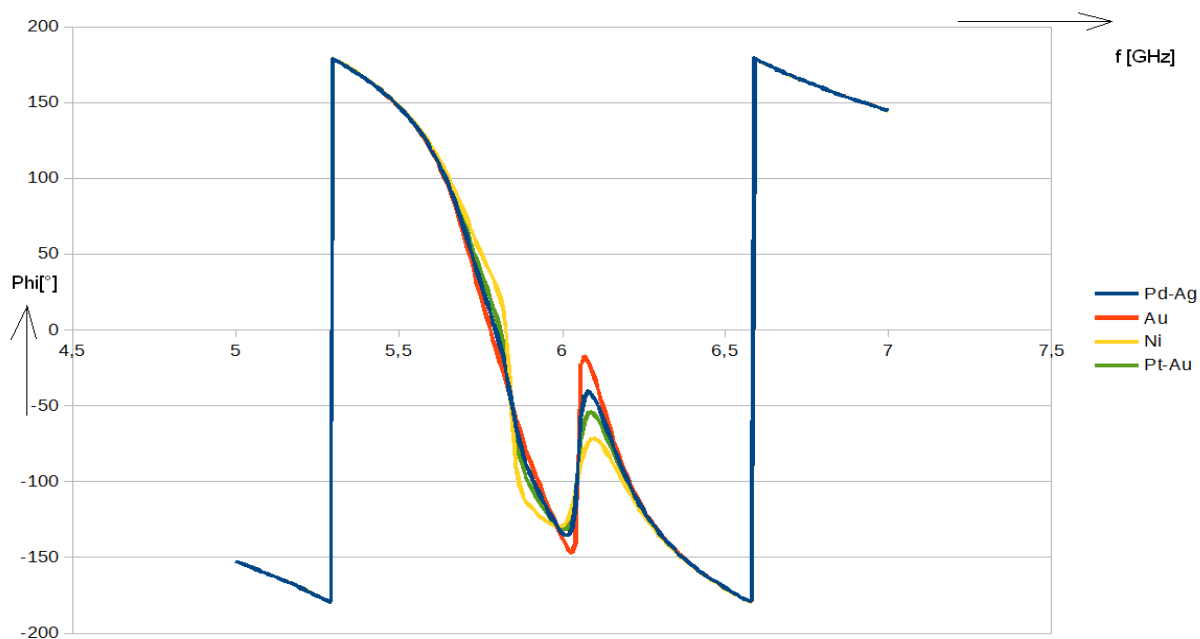
Tab. 3. Vlastnosti uvažovaných mikropásků

Obecné vlastnosti natisknutých mikropásků	
Síla natisknuté vrstvy	10 $\mu\text{m}$ .
Uvažovaná nerovnost povrchu	1 $\mu\text{m}$ .
Tloušťka substrátu	635 $\mu\text{m}$ .
Vlastnosti použitých vodivých past	
Základní materiál vodivé pasty	Plošný odpor
Au	1 $\text{m}\Omega/\square$
Pt-Au	20 $\text{m}\Omega/\square$
Pd-Ag	10 $\text{m}\Omega/\square$
Ni	50 $\text{m}\Omega/\square$

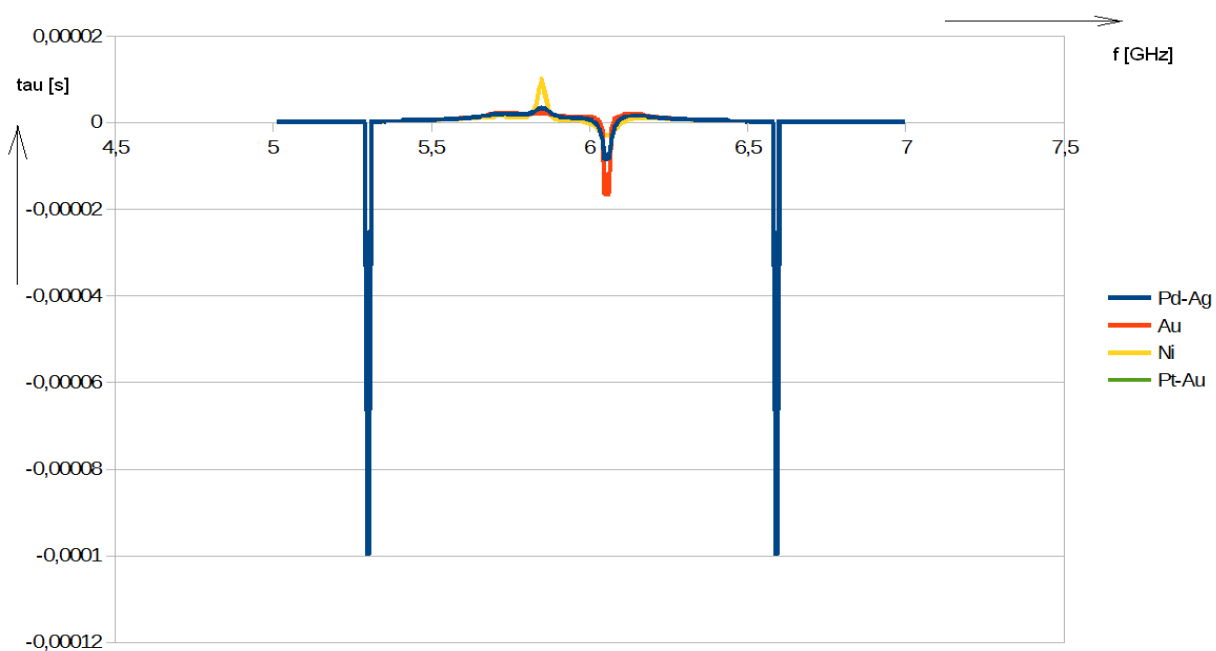
Byl simulován vliv použité tlustovrstvové vodivé pasty na průběh S11 a S12 parametrů [5].



Obr. 12. Průběh S11 amplitudové charakteristiky pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past

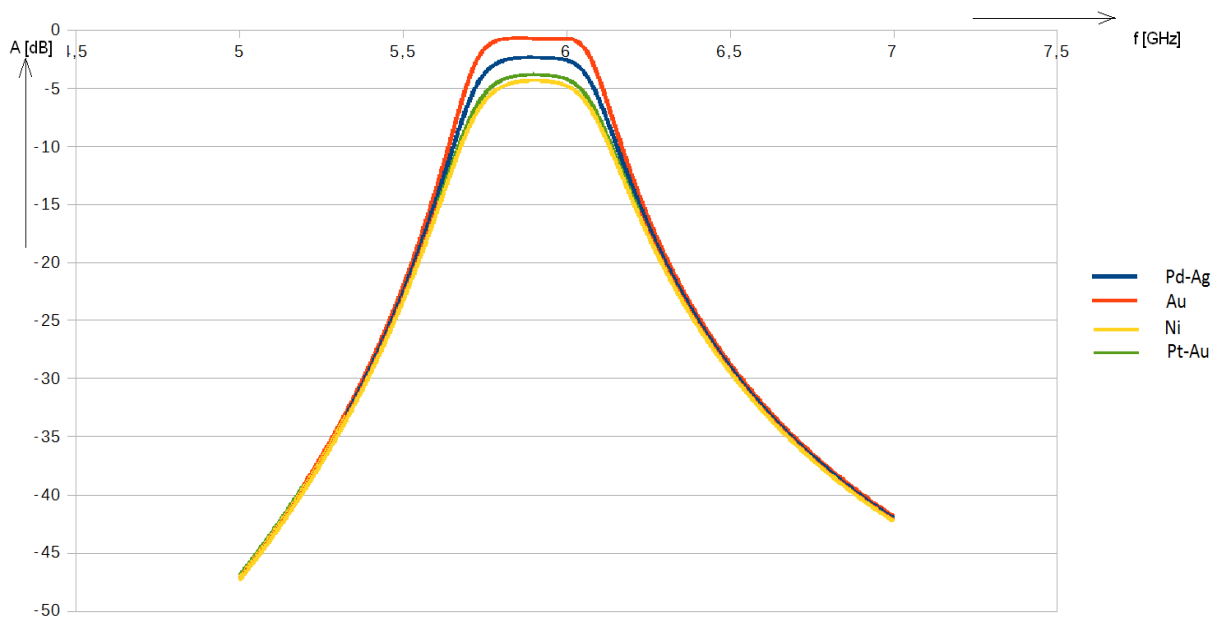


**Obr. 13.** Průběh S11 fázové charakteristiky pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past



**Obr. 14.** Průběh S11 skupinového zpoždění pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past

Z obr. 12 je zřejmé, že druh použité tlustovrstvové pasty má vliv na minima S11 amplitudové charakteristiky. S11 fázová charakteristika (obr. 13) vykazuje rozdíly v oblastech lokálních minim a maxim a v jejich okolí.

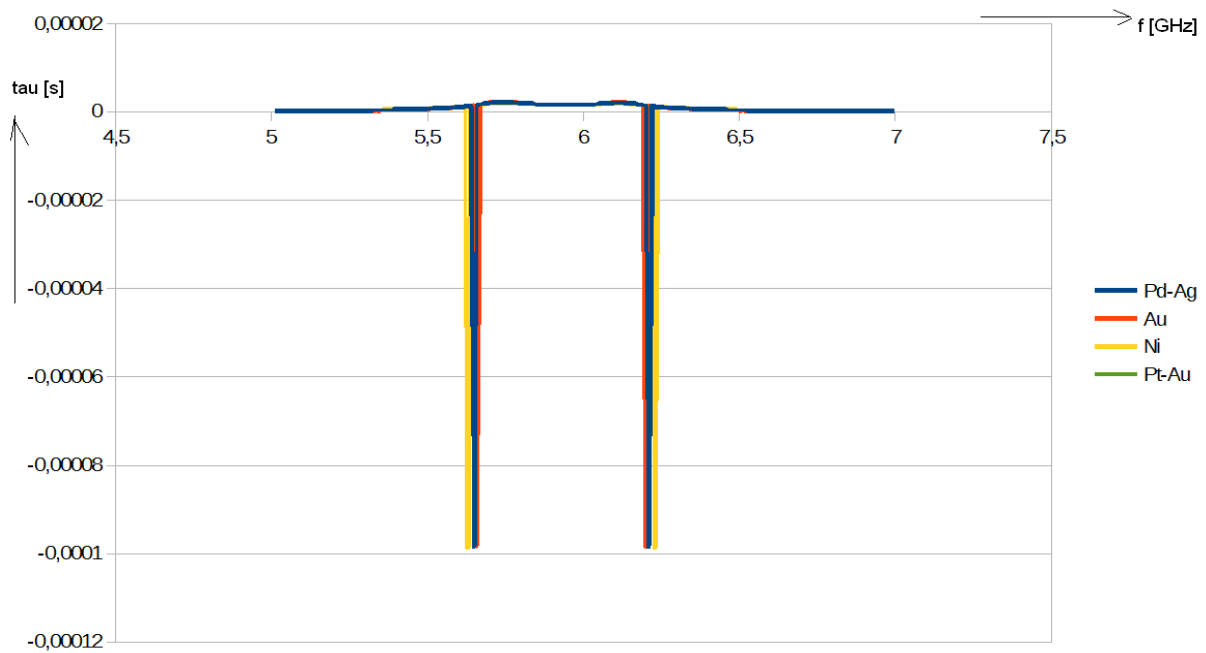


**Obr. 15.** Průběh S12 amplitudové charakteristiky pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past



**Obr. 16.** Průběh S12 fázové charakteristiky pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past

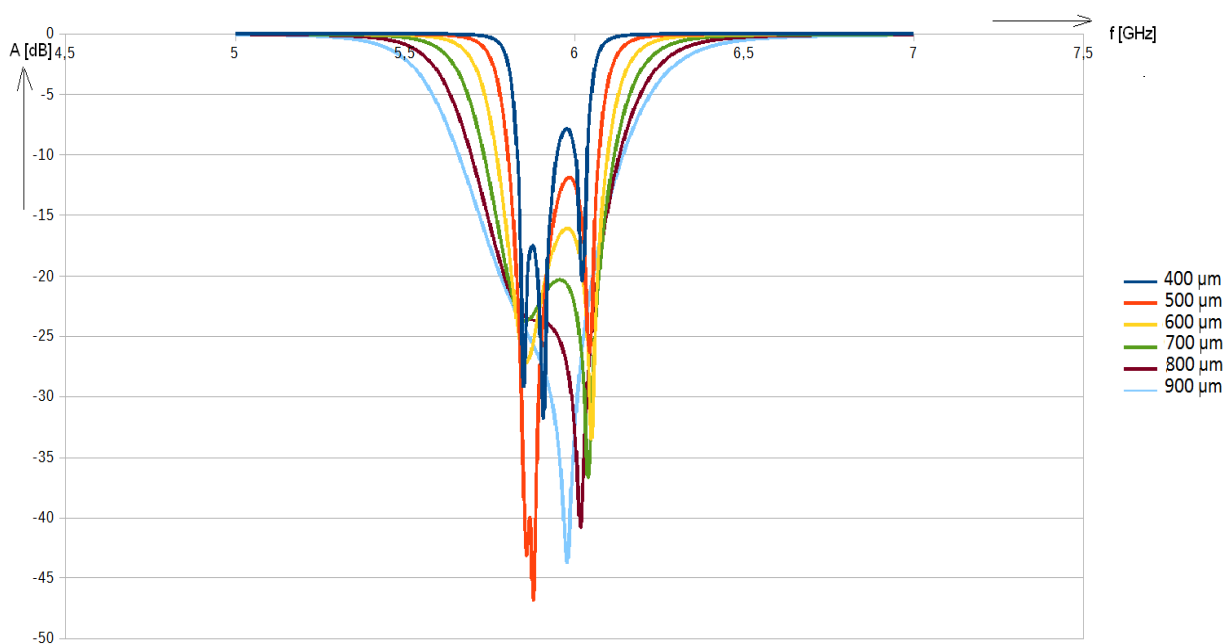
Amplitudová charakteristika na obr. 15 ukazuje, že použitá tlustvrstvá pasta má vliv na velikost útlumu v propustném pásmu.



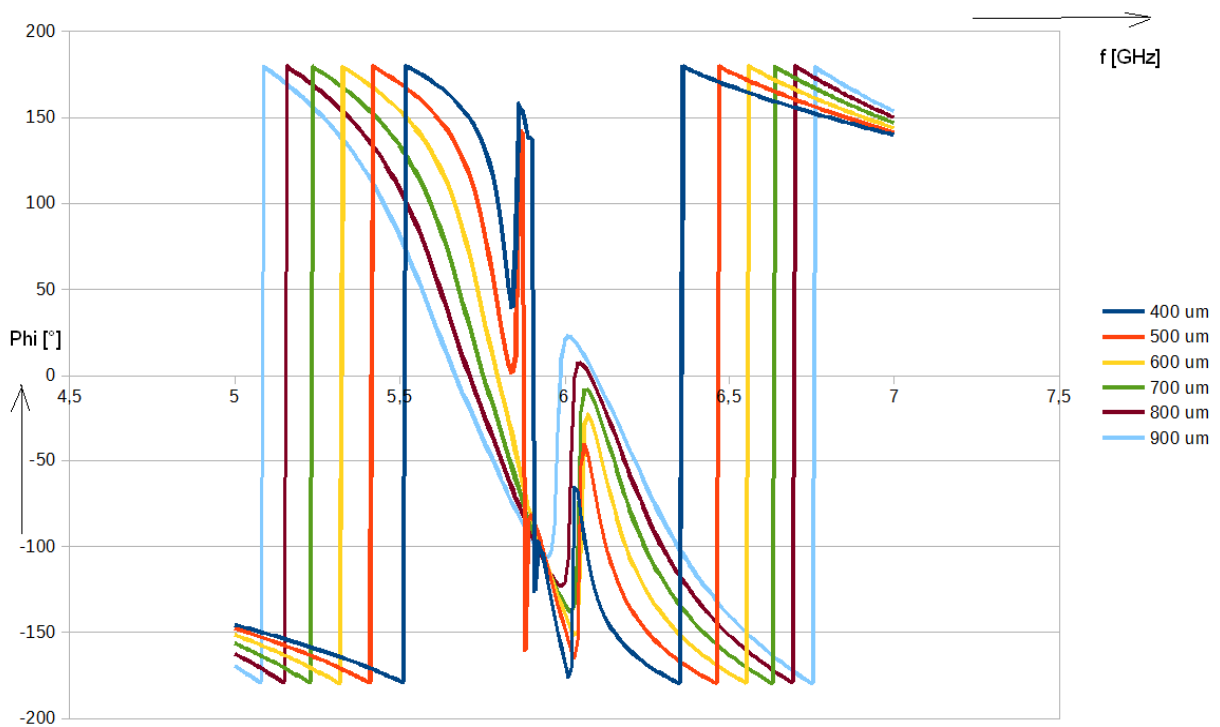
**Obr. 17.** Průběh S12 skupinového zpoždění pro různé materiály použité jako funkční složka vodivých past

#### 4.2.4 Simulace vlivu tloušťky základního substrátu

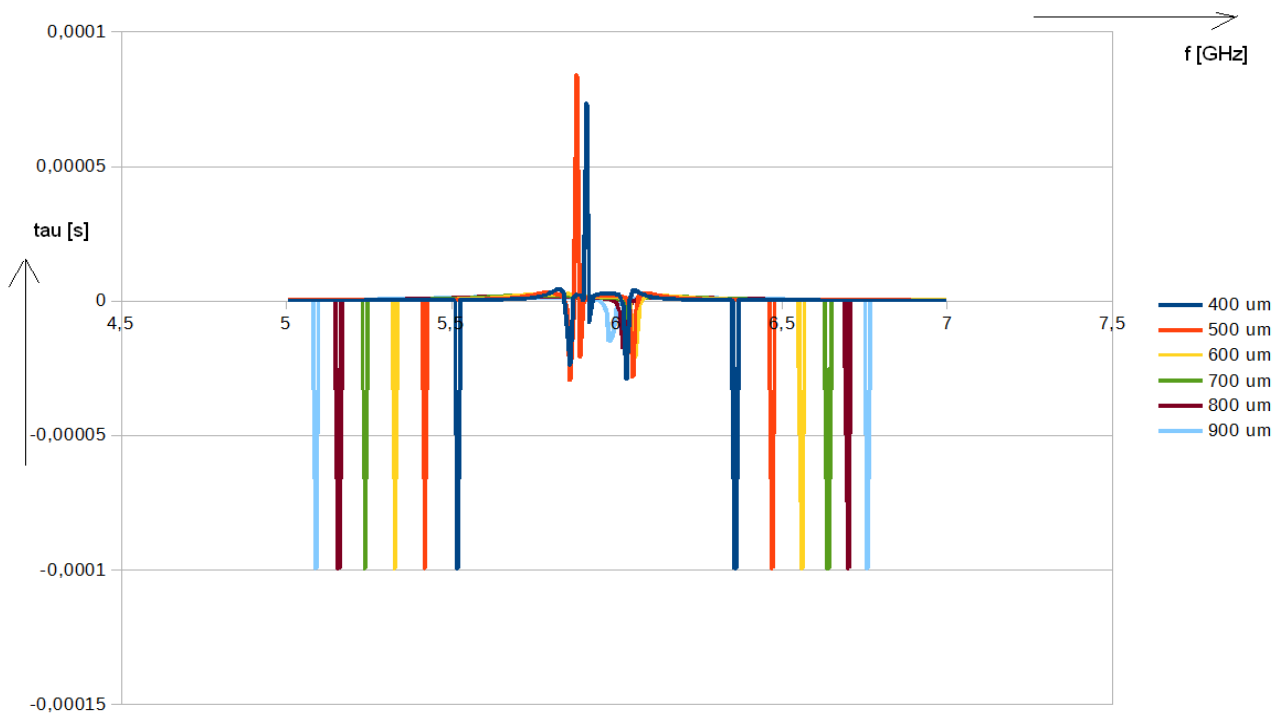
Bylo simulováno uspořádání s různou tloušťkou základního korundového substrátu ( $\epsilon$  permitivitou 9,8). Byla uvažována tlustovrstvová pasta na bázi zlata, přičemž simulována byla tloušťka substrátu v hodnotách 400, 500, 600, 700, 800 a 900  $\mu\text{m}$ .



**Obr. 18.** Průběh S11 amplitudové charakteristiky pro různou tloušťku základního substrátu

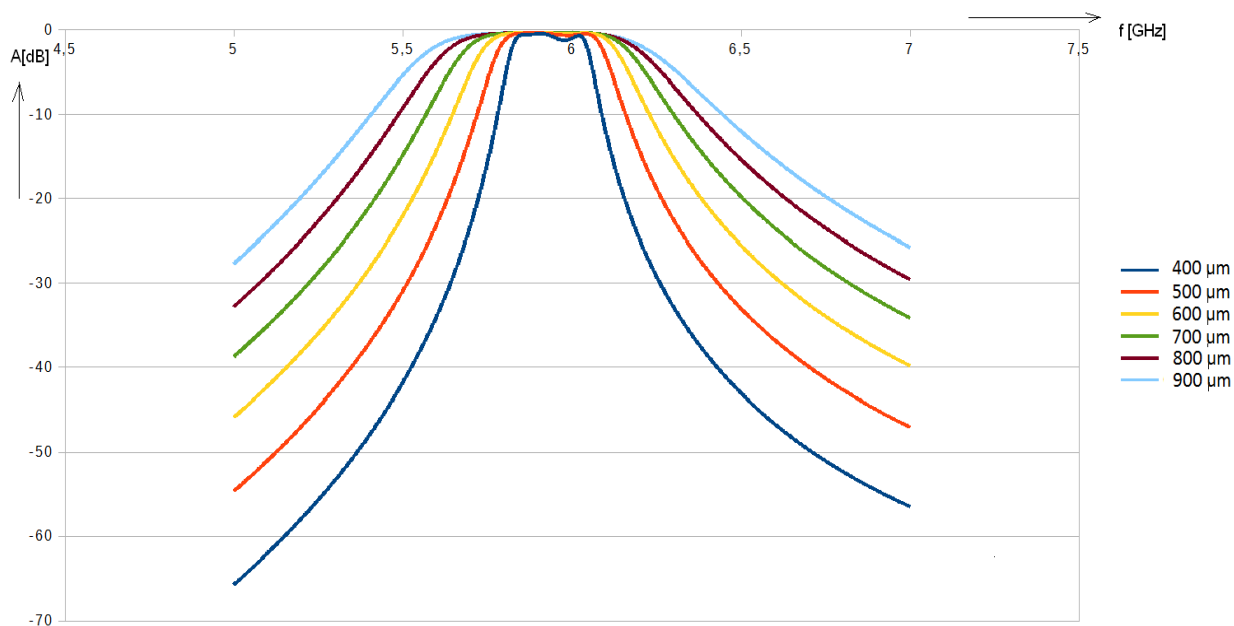


**Obr. 19.** Průběh S11 fázové charakteristiky pro různou tloušťku základního substrátu

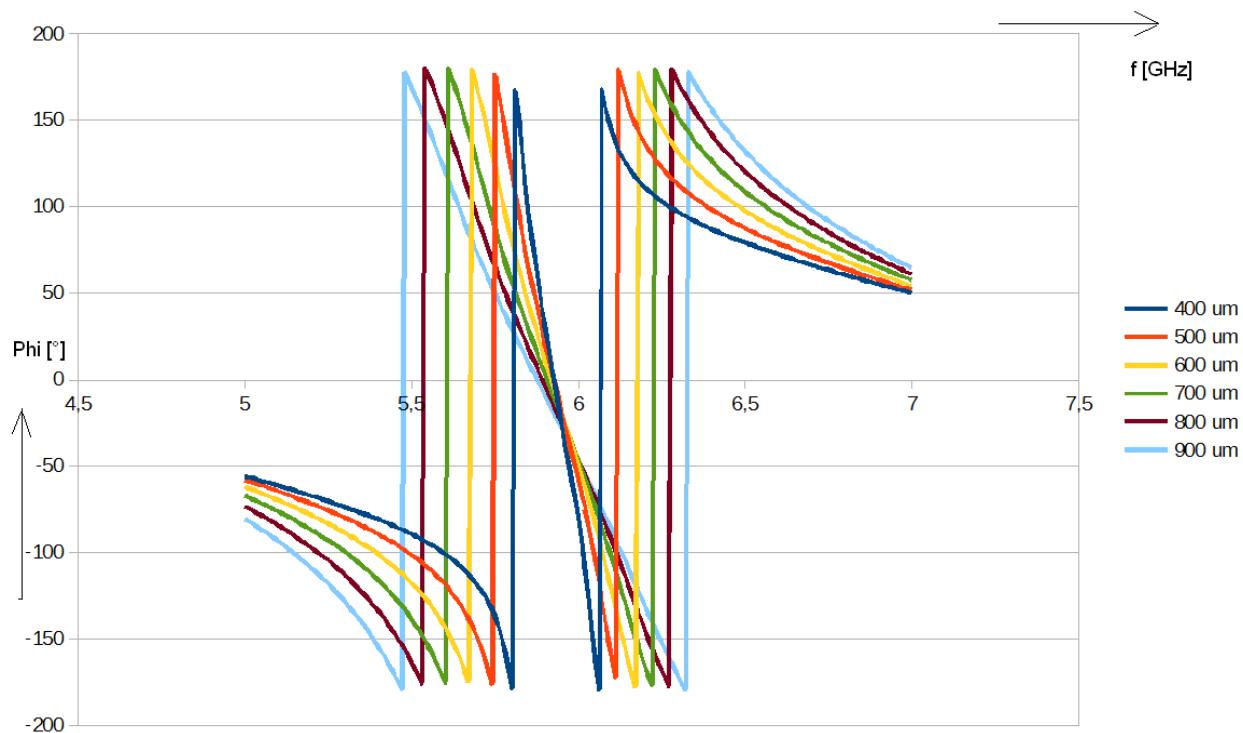


**Obr. 20.** Průběh S11 skupinového zpoždění pro různou tloušťku základního substrátu

Z obr. 18, obr. 19 a obr. 20 je zřejmé rozšíření propustného pásma se zvětšující se tloušťkou základního substrátu. To je dáno zmenšením kapacitní vazby mezi systémem filtru a zemní vrstvou. Na amplitudové charakteristice na obr. 18 lze rovněž pozorovat různý průběh minim charakteristiky.

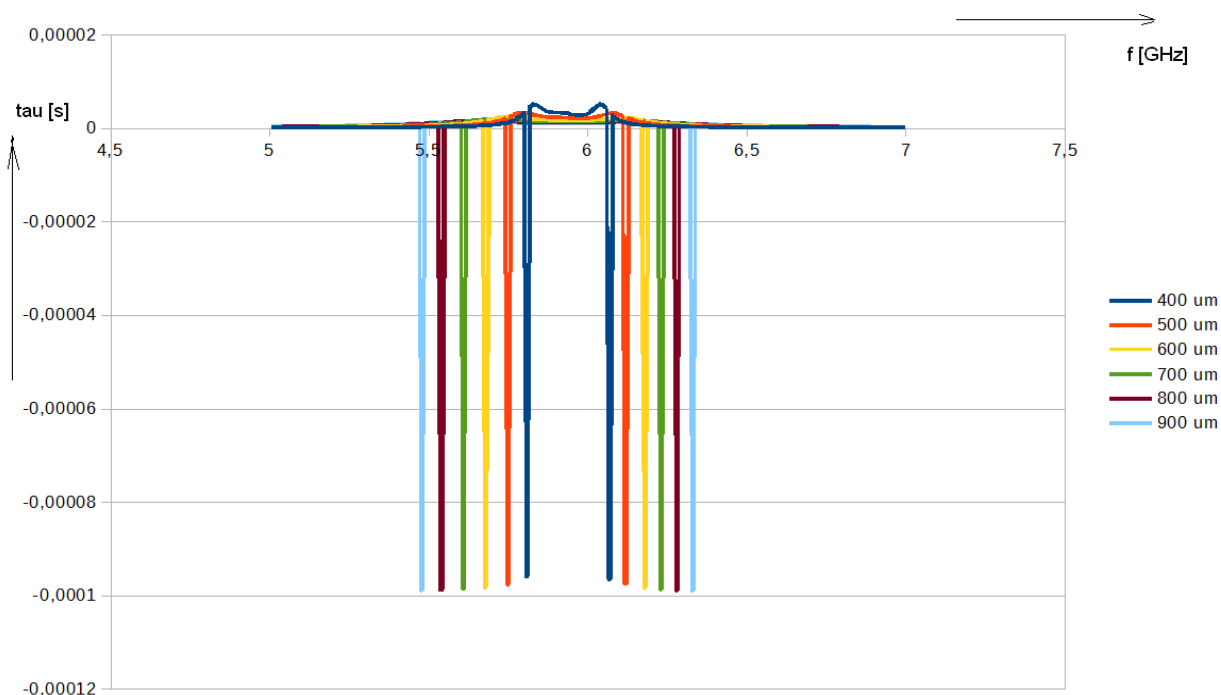


**Obr. 21.** Průběh S12 kmitočtové charakteristiky pro různou tloušťku základního substrátu



**Obr. 22.** Průběh S12 fázové charakteristiky pro různou tloušťku základního substrátu

Na obr. 21 lze opět pozorovat, že se zvětšující se tloušťkou základního substrátu se zvětšuje šířka propustného pásma. Současně klesá strmost charakteristiky na krajích tohoto pásma.



**Obr. 23.** Průběh S12 skupinového zpoždění pro různou tloušťku základního substrátu

#### 4.2.5 Získané výsledky

Uvedená simulace ukázala vliv různých aplikačních materiálů na průběhy S11 a S12 parametrů na obr. 12, obr. 13, obr. 14, obr. 15, obr. 16 a obr. 17, přičemž jsou vyneseny amplitudové a fázové charakteristiky, tak i skupinová zpoždění. Použití pasty s větším plošným odporem při téže geometrii planárního paralelně vázaného filtru vede k většímu útlumu, což je zvláště zřejmé z obr. 20.

Ze simulace provedení filtru s různou tloušťkou základního substrátu na obr. 18, obr.19, obr.20, obr.21, obr.22 a obr.23 vyplývá, že se vzrůstající tloušťkou základního korundového substrátu dochází k rozšíření propustného pásma a rovněž strmost charakteristiky na krajích propustného pásma klesá. Maximum přenosu u amplitudové charakteristiky S12 na obr. 21 zůstává zachováno. Naproti tomu hodnota minim na obr. 18 amplitudové charakteristiky pro S11 kolísá mezi -20 a -50 dB. Se změnou šířky propustného pásma se mění i poloha minim u charakteristik skupinového zpoždění. Velikost těchto minim se nemění.

Vzhledem k nízké hodnotě měrného odporu lze u Au pasty docílit nízkých hodnot útlumu v přenosu v propustném pásmu. Tato výhoda je u tohoto typu pasty potom kompenzována vyšší cenou.

V případě různé tloušťky základního substrátu je žádoucí, aby hodnota skupinového zpoždění pro S12 byla konstantní pro nezakalený přenos signálu v tomto pásmu. Uvedenému požadavku zde nejlépe vyhovuje uspořádání s tloušťkou 900  $\mu\text{m}$ , kdy je též největší šířka propustného pásma. Pro docílení menší šířky pásma a vyšší selektivity potom možno volit vhodný kompromis mezi požadovanou šířkou pásma a stabilitou hodnoty skupinového zpoždění.

## 4.3 Paralelně vázaný mikropáskový filtr s děleným propustným pásmem

### 4.3.1 Úvod

Paralelně vázaný mikropáskový filtr je rozšířeným systémem používaným k úpravě signálu a k vymezení požadované části kmitočtového spektra. V předchozí části této práce byla věnována pozornost simulaci typického provedení planárního kmitočtového filtru za účelem posouzení vlivu různých typů aplikačních materiálů stejně jako vlivu různé tloušťky základního korundového substrátu.

V této části bude pozornost věnována úpravě topologie planárního mikropáskového filtru, jejímž účelem je změna tvaru propustného pásma a rozdělení tohoto pásma na dvě části, přičemž tato dílčí propustná pásma budou oddělena pásmem s dostatečně vysokým útlumem. Cílem je vytvořit kombinaci filtru typu pásmová propust a pásmová zádrž (notch filter).

### 4.3.2 Teoretický návrh

Základem návrhu je běžná topologie paralelně vázaného kmitočtového filtru, který je zobrazen na obr. 24. Tento filtr je opět navržen s použitím Čebyševovy aproximace pro práci v C-pásmu s centrálním kmitočtem 6 GHz, filtr je třetího řádu. Změny tvaru kmitočtového pásma je dosaženo přidáním pahýlů o rozměrech čtvrtiny vlnové délky v prostředí dielektrika s permitivitou 9,8 a tloušťkou 635  $\mu\text{m}$ .



**Obr. 24.** Topologie paralelně vázaného mikropáskového filtru třetího řádu

K topologii byly přidány pahýly o délce  $\lambda/4$ , aby bylo dosaženo útlumu právě uprostřed propustného pásma. Tato výsledná topologie je znázorněna na obr. 25.

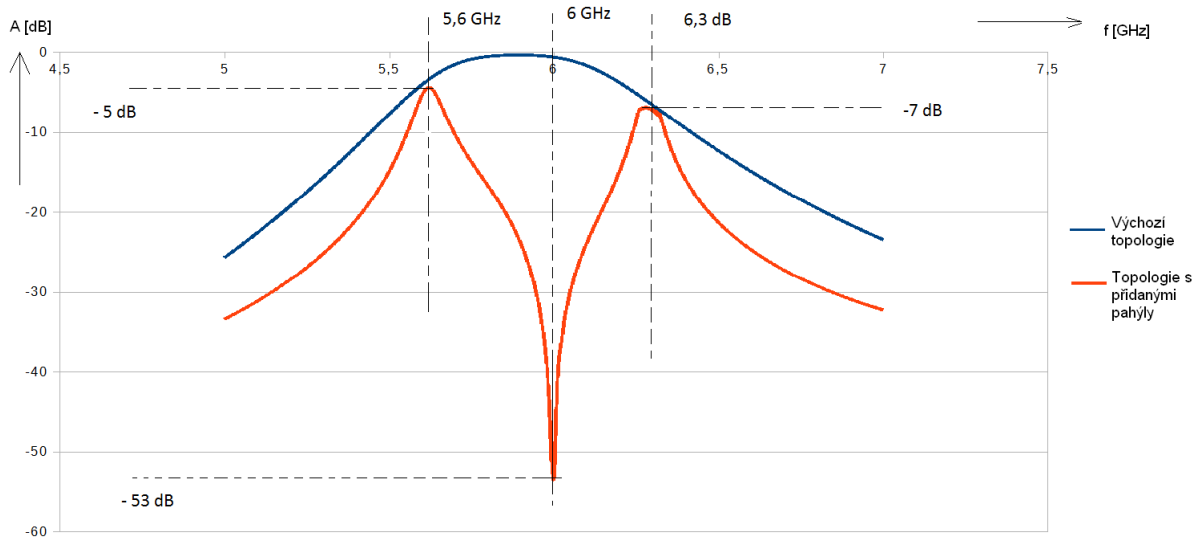


**Obr. 25.** Topologie paralelně vázaného mikropáskového filtru rozšířeného o dva pahýly blokující centrální kmitočet

Přidáním otevřeného vedení vznikne na konci pahýlů kmitna napětí, přičemž uzel napětí v blízkosti výstupní brány filtru blokuje centrální kmitočet, čímž je propustné kmitočtové pásmo rozděleno.

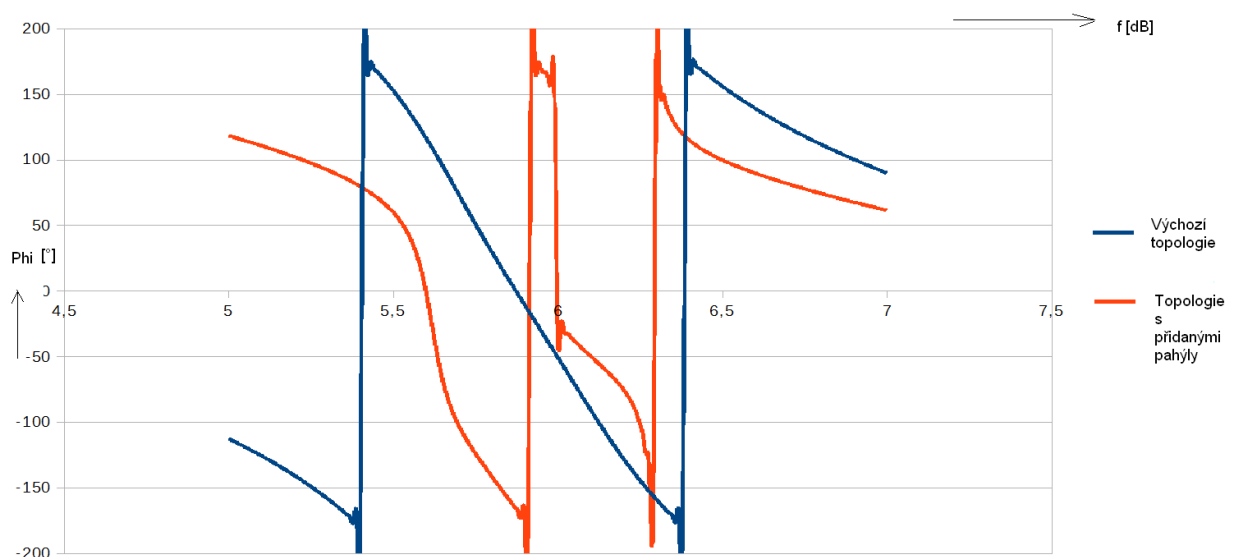
#### 4.3.3 Simulace paralelně vázaného mikropáskového filtru s děleným propustným pásmem

Na obr. 26 je uvedeno porovnání kmitočtových amplitudových charakteristik pro S12 parametr.



**Obr. 26.** Průběh S12 parametrů u navrženého filtru třetího řádu a u filtru s přidanými otevřenými pahýly – amplitudová charakteristika

Porovnání fázových charakteristik pro parametr S12 je uvedeno na obr. 27.



**Obr. 27.** Průběh S12 parametrů u navrženého filtru třetího řádu a u filtru s přidanými otevřenými pahýly – fázová charakteristika

#### 4.3.4 Získané výsledky

Z obr. 26 je zjevné, že úpravou planárního filtru přidáním otevřených pahýlů lze upravit kmitočtovou charakteristiku tak, že dojde k rozdělení propustného pásma na dvě části, přičemž tyto dílčí části jsou od sebe odděleny pásmem útlumu, které se nachází v oblasti centrálního kmitočtu. Výsledný obvod má tedy dvě blízká propustná kmitočtová pásma.

Přidané pahýly představují pásmovou zádrž, kdy vzhledem k délce  $\lambda/4$  @  $f_0$  v daném prostředí vzniká na jejich konci kmitná napětí, přičemž uzel napětí na jejich začátku vede k eliminaci složky o kmitočtu právě  $f_0$ . Začleněním pásmové zádrže do filtru typu pásmové propusti byl získán filtr spojující oba typy charakteristik. Vzhledem k vysoké selektivitě pásmové zádrže je minimum přenosové funkce na centrálním kmitočtu ostré.

Útlum na centrálním kmitočtu nastává přesně pro 6 GHz, přičemž dosahuje hodnoty -53 dB. Jednotlivá dílčí propustná pásma dosahují zisku -5 dB a -7dB a od centrálního kmitočtu jsou vzdálena 0,4 a 0,3 GHz.

Z obr. 26 je dále patrná vyšší strmost charakteristiky na bocích propustného pásma, a to jak po stranách původní charakteristiky, tak i u nově získaného pásma útlumu.

Důležité změny nastaly i u fázové kmitočtové charakteristiky, kde došlo rovněž k rozdělení charakteristiky na více částí.

Tyto důsledky lze aplikovat tam, kde je z nějakého důvodu žádoucí propustné kmitočtové pásmo rozdělit na více sekcí (např. selektivita přijímače). K získání přesného návrhu je nezbytné využití simulace.

## 5 Závěr

Náplní disertační práce bylo rozšíření poznatků ohledně realizace mikroelektronických struktur pro vysoké kmitočty. Tyto struktury mohou být dále vestavěny do složitějších systémů. U těchto systémů bývá kritickým faktorem jak provozní spolehlivost, tak i reprodukovatelnost a cena.

Pokrok v oblasti tlustovrstvových technologií, a to jak v dostupných materiálech, tak i v technologických procesech, posunul rozlišení na hodnoty řádově desítek až jednotek mikrometrů. Dnešní moderní fotolitografické techniky umožňují realizovat jak mikropásková vedení, tak elektronické prvky s rozloženými parametry s vysokou přesností a také reprodukovatelností, což v minulosti nebylo možné. Pro tlustovrstvou technologii se otevírá možnost významných aplikací v oblasti mikrovlnné techniky.

Práce je rozdělena na části, v nichž jsou rozebrány návrh a realizace jednotlivých typů funkčních struktur, které tvoří základ velkého množství elektronických systémů v současnosti využívaných. Celkově je práce zaměřena na realizaci obvodů na bázi keramických substrátů, přičemž samotné funkční struktury jsou zde realizovány metodou keramických tlustovrstvových past, které jsou po natisknutí a zasušení vypáleny a získají požadované elektrické a mechanické vlastnosti. Dosažené výsledky jsou následující:

1. Byl vytvořen soubor tlustovrstvových interdigitálních kondenzátorů. Tyto kondenzátory byly realizovány na korundové keramice tlustovrstvovou technologií, přičemž celý systém kapacitní struktury je vytvořen v jedné vrstvě. U těchto kondenzátorů byl sledován vliv šířky izolační mezery na celkovou velikost kapacity. Pro měření byla použita rezonanční metoda. Pro daný rozsah šíře izolační mezery nebyl nicméně patrný žádný významný trend změny celkové kapacity na šířce izolační mezery. Byl rovněž testován vliv použitého materiálu u základního substrátu. Simulací bylo zjištěno, že elektrická indukce u korundové keramiky dosahuje vlivem vysoké permitivity vyšších hodnot. Kapacitu lze dále zvýšit zařazením společné zemní plochy.

2. Byl vytvořen soubor planárních cívek. Tyto cívky byly natištěny na korundovém substrátu tlustovrstvovou keramickou pastou ve tvaru pravoúhlých závitnic. Byly vytvořeny dva korundové substráty, kde na každém jsou umístěny čtyři totožné cívky. Byla sledována velikost indukčnosti, dále rozptýl této hodnoty u jednotlivých vzorků. Dané měření bylo dále podpořeno simulací ve výpočetním systému ANSYS, kde bylo cílem určit velikost a tvar generovaného magnetického pole cívky, kterou protékal stálý proud. Byla modelována cívka se stejnými geometrickými rozměry a fyzikálními vlastnostmi, jako byly cívky realizované a proměřované. Dále bylo provedeno určení celkové velikosti generovaného magnetického indukčního toku a určení indukčnosti, za účelem ověřit výsledky získané předchozím měřením. Výsledky simulace potvrdily hodnoty získané měřením. Pro prověření kmitočtových vlastností tlustovrstvových cívek byly provedeny simulace již realizované cívky na různých typech substrátu a s konfigurací se zemní plochou a bez této plochy. Z výsledků je potom zřejmé, že cívka bez zemní plochy, a tím s mnohem menší hodnotou parazitní kapacity, je použitelná do kmitočtů v řádech v jednotkách GHz, zatímco cívka s touto plochou pouze do stovek MHz.

3. Návrh a realizace planárního kmitočtového filtru třetího řádu. Tento kmitočtový filtr byl navržen v systému Ansoft Designer, přičemž byla využita Čebyševova aproximace. Následně byl vytvořen layout pro vytvoření šablon pro tlustovrstvovou technologii. Uvedený filtr je složen z cívek a kondenzátorů, přičemž tyto kondenzátory jsou realizovány jako vrstevové, s natisknutým dielektrikem. Pro vlastní měření kmitočtových charakteristik bylo

dále vytvořeno kovové pouzdro opatřené SMA konektory. Měření probíhalo na vektorovém analyzátoru Agilent Technologies, E8364B. Získaná amplitudová kmitočtová charakteristika ovšem vykazuje menší šířku propustného pásma, než byla teoreticky navržena. Výsledky jsou ovlivněny vznikem parazitní nuly přenosu, která je důsledkem parazitní induktivní vazby mezi cívkami, která je příčinou snížení horního mezního kmitočtu.

4. Problémem u struktur s natisknutým dielektrikem je možnost vzniku parazitních svodů, popř. i zkratu. Toto riziko lze snížit použitím více vrstev tvořících dielektrikum kondenzátoru. Toto řešení nicméně povede k větší tloušťce dielektrika, a tím i k nárůstu plochy kondenzátoru, která je potřebná pro zachování požadované kapacity. Proto byla vytvořena další varianta filtru, kde byly místo tištěných kondenzátorů použity kondenzátory vsazované. Uvedené řešení nicméně vykazuje další zúžení propustného kmitočtového pásma. Navíc zde dochází ke snížení strmosti na okrajích propustného pásma. Tento fakt je pravděpodobně způsoben vznikem dalších induktivních struktur tvořených terminály vsazovaných součástí.

5. Byl navržen planární paralelně vázaný kmitočtový filtr pro C-pásmo s centrálním propustným kmitočtem 6 GHz za použití návrhové systému Ansoft Designer. Jde o filtr třetího řádu, tvořený paralelně vázanými mikropásky, přičemž byla využita Čebyševova aproximace. Pozornost byla věnována použití různých typů aplikačních materiálů (tlustovrstvových past), přičemž simulací byly prověřeny charakteristiky filtru. Použitý typ tlustovrstvové pasty zde ovlivňuje útlum na centrálním kmitočtu. Nejvhodnější pastou pro realizaci vodivé sítě je podle měření pasta na bázi Au, jež se nicméně vyznačuje i vyšší cenou. Dále byl simulací prověřen vliv tloušťky základního korundového substrátu, přičemž bylo zjištěno, že s rostoucí tloušťkou se zvětšuje šířka propustného pásma, což je způsobeno klesající hodnotou kapacity mezi systémem planárního filtru a zemní vrstvou. Při vyšší tloušťce substrátu je též dosaženo i stabilnější hodnoty skupinového zpoždění v propustném pásmu, což vede k nižšímu zkreslení signálu. Simulace představují rozšíření poznatků z experimentu provedeném v [5]. Výsledky budou publikovány na konferenci IMAPS 2016.

6. Pro rozšíření aplikačních možností planárního mikropáskového filtru byl vytvořen experimentální návrh filtru kombinujícího typ kmitočtové propusti s kmitočtovou zádrží. Návrh planárního mikropáskového paralelně vázaného filtru pro C-pásmo byl upraven tak, aby bylo propustné pásmo rozděleno na dvě části, přičemž mezi těmito částmi se bude nacházet oblast útlumu. Toho bylo docíleno zařazením otevřených pahýlů o délce  $\lambda/4$  při centrálním kmitočtu, přičemž tyto pahýly blokují centrální kmitočet.

Na základě teoretických předpokladů a provedených experimentů lze konstatovat, že planární struktury se soustředěnými parametry lze v závislosti na konfiguraci používat do kmitočtů do řádově jednotek GHz, v případě struktur se zemní plochou lze tyto prvky používat do kmitočtů řádově ve stovkách MHz. Zejména u cívek se při vyšších kmitočtech negativně projevuje kapacitní vazba mezi systémem cívky a zemní plochou, což vede k výraznému zhoršení vlastností. Pro dosažení lepších výsledků lze nahradit keramickou technologii technologií založenou na PTFE, jež ve srovnání s jinými organickými substráty vykazuje stabilní hodnotu permitivity i při vyšších kmitočtech. Jiná je situace u obvodů s rozloženými parametry, kde navrhovaná nová technologie umožňuje realizaci obvodů s rozloženými parametry (vytvořené tlustovrstvou technologií na základě optimalizace jednotlivých kroků) do kmitočtu min. 10 GHz s reprodukovatelnými výsledky.

Použití hybridní technologie kombinující planární struktury se vsazovanými prvky vede k zanesení velkého množství parazitních vazeb, použití vsazovaných kondenzátorů pro vyvedení terminálů z cívek se ukázalo jako nevhodné. Mnohem lepších výsledků bylo dosaženo realizací všech obvodových prvků pouze tlustovrstvou technologií.

Simulací byl dále ověřen vliv různých typů tlustovrstvových past na vlastnosti realizovaného mikropáskového filtru. Zde bylo nejlepších výsledků dosaženo pro pastu na bázi Au. Pro vliv tloušťky základního substrátu na vlastnosti mikropáskového filtru planí, že nejstabilnější hodnoty skupinového zpoždění, a tím nejmenšího zkreslení signálu, je docíleno při tloušťce substrátu na horní hranici testovaného rozsahu.

Jako hlavní disertabilní výsledek práce považuji návrh a ověření tlustovrstvé technologie tisku mikrovlnných obvodů se soustředěnými i s rozloženými parametry. Tato nová technologie umožňuje realizaci obvodů s rozloženými parametry (vytvořené tlustovrstvou technologií na základě optimalizace jednotlivých kroků) do kmitočtu min. 10 GHz s reprodukovatelnými výsledky. V práci je popsán návrh a ověření pásmové propusti pro kmitočty z pásma C. Optimalizace technologie byla umožněna počítačovým modelováním struktur a jejich následným experimentálním vyhodnocením.

Uvedené oblasti je možno dále rozvíjet. Lze například optimalizovat uspořádání prvků na substrátu u planárního kmitočtového filtru se soustředěnými parametry za účelem odstranění nežádoucích vazeb a minimalizace útlumu, prověřovat vliv jiných substrátů na průběh kmitočtových charakteristik u mikropáskového paralelně vázaného filtru nebo tento typ filtru kombinovat s diskrétními součástkami.

V dalším výzkumu bych se chtěl zaměřit na modelování, simulaci, realizaci a experimentální ověřování struktur, u nichž relace mezi odezvou a budicí veličinou obsahuje derivaci nebo integrál necelistvého řádu (tzv. fraktální struktury či obvody). Realizace bude v tlustovrstvé technologii s využitím RC struktur s rozloženými parametry. Aplikace předpokládáme v oblasti mikrovlnných kmitočtových filtrů, rekonfigurovatelných filtrů či přeladitelných oscilátorů.

## Seznam literatury

- [1] SVAČINA, J., Mikrovlnná technika. Praha: SNTL, 1987, 2. vyd.
- [2] HOFFMANN, K. Planární mikrovlnné obvody. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 2.vyd. ISBN 978-80-01-13705-8
- [3] BROWN, R., Materials and Processes for Microwave Hybrids. Reston, VA: ISHM, 1991, ISBN: 0-930815-31-9
- [4] ULRICH, R. K., SCHAPER, L. W., Integrated Passive Component Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003, ISBN 0-471-24431-7
- [5] SZENDIUCH, I., K možnosti využití tlustých vrstev v mikrovlnných integrovaných obvodech. Brno: Knižnice odborných a vědeckých spisů Vysokého učení technického v Brně
- [6] SOUTOR, Z., ŠAVEL, J., ŽŮREK, J., Hybridní integrované obvody. Praha: SNTL. 1982. ISBN 04 -532-82
- [7] SUE, R., NAGUIB, H. M., Mid-Film Interconnects for Multilayer Microcircuit Packages, Electrocomponent Science and Technology, 1984, Vol. 11, pp. 97-108, Gordon and Breach Science Publishers, Inc.
- [8] ILGENFRITZ, R. E. , MOGEY, L. E. , WALTER, D. W. A High Density Thick Film Multilayer Process for LSI Circuits, IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, Vol. PHP-10, No. 3, September 1974
- [9] CONN, D. R., NAGUIB, H. M., ANDERSON, C. M. Mid/Film for Microwave Integrated Circuit. IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-5, No. 1, March 1982
- [10] PODPROCKY, T., VANDERCASTEELE, B., DE BAETS, J., VAN CALSTER, A., BANSKY, J. Integration of Thick Film Resistors in a Multilayer Structure. 26th International Spring Seminar on Electronics Technology. May 8 – 11, 2003
- [11] OHSAKI, T., SUGITA, E., YAMAGUCHI, S., New Thick Film Multilayer Interconnection Technology Using a Nd-YAG Laser, IEEE TRANSACTIONSON COMPONENTS, HYBRIDS, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL. CHMT-5.NO. 4, DECEMBER 1982
- [12] ISHIDA, A., HATAGI, K., Hybrid IC Packaging Technology for Microwave Communication Systems. Proceedings of the 1982 International Microelectronics Conference, IMC 1982, May 24 - 26, 1982, Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan. 445 p.
- [13] SCHAFFER, CH. , SERGENT, J.: The Effect of Particle Size Distribution on the Electrical Properties of RuO<sub>2</sub> TFR. University of South Florida, College of Engineering, 1979.
- [14] PIKE, G.E., SEAGER, C. H.: Electrical and Conduction Mechanism of Ru – based Thick-Film/Cermet/ Resistors. J.Appl.Phys. 48/12. December 1977.
- [15] CAULTON, M.: Lumped Elements in Microwave Integrated Circuits. RCA Laboratories D.S Research Center, New Jersey, 1975.
- [16] BARNWEL, P.G. : The Properties of Thick Film Inductors at VHF. Brighton Pol., 1973
- [17] Marconi Com.S.Ltd. Nuovi sistemi di paste per microonde. Int. Informazioni 1983

- [18] ELECTRO SCIENCE LABORATORIES, Product Catalogue, 2012
- [19] Distributed-Element Circuit Analysis Techniques. Dostupné z <http://ee.sharif.edu/~comcir/readings/tran%20line.pdf>
- [20] SÜLI, E. Lecture Notes on Finite Element Methods for Partial Differential Equations. Dostupné z <http://people.maths.ox.ac.uk/suli/fem.pdf>
- [21] LEMON, T.H. : Thick Film Ruthenium Resistor Pastes. Research Laboratories, Johnson Matthey & Co Limited
- [22] Katalogový list Electro-Science Laboratories, 8880, dostupné z <http://www.electroscience.com/pdf/8880.pdf>
- [23] PURI, V., RANE, S. B. : Microwave Related Properties of Fritless Ag Thick Film Metallisation and Effect of Long-Term Air Exposure. Dostupné z [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24463/1/IJEMS%208\(6\)%20366-372.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24463/1/IJEMS%208(6)%20366-372.pdf)
- [24] Three Roll Mill and Thick Film Paste. Dostupné z [http://www.threerollmill.com/documents/thick\\_film\\_paste.pdf](http://www.threerollmill.com/documents/thick_film_paste.pdf)
- [25] LYNCH, F.A. Smith Chart. Dostupné z [http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/smith\\_chart\\_tutorial.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/smith_chart_tutorial.pdf)
- [26] HENKE, H., MERTE, R.: Millimeter-wave RF Structures. Dostupné z <http://linac96.web.cern.ch/Linac96/Compendium/PAPERS/TUESDAY/TUP75.pdf>
- [27] GIPPRICH, J., STEVENS, D., HAGEMAN, M., PILOTO, A., ZAKI, K., RONG, Y.: Wireless Applications Using Cofired Ceramic Technologies. Dostupné z <http://www.imaps.org/journal/1998/Q3/gipprich.pdf>
- [29] HILL, M.E., CALLIN, R.S., LIN, X.E, WHITTUM, D.H.: Planar Dielectric Accelerator Structures at W-band. Dostupné z <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-8666.pdf>
- [30] RAJ, P.M., CHAKRABORTI, P., MISHRA, D., SHARMA, H., GANDHI, S., SITARAMAN, S., TUMMALA, R.: Novel Nanostructured Passives for RF and Power Applications: Nanopackaging with Passive Components. Dostupné z: [http://www.prc.gatech.edu/sites/default/files/documents/Publications2015/novel\\_nanostructured\\_passives\\_for\\_rf\\_-\\_raj.pdf](http://www.prc.gatech.edu/sites/default/files/documents/Publications2015/novel_nanostructured_passives_for_rf_-_raj.pdf)
- [31] SRINATH, S., Design of 4th Order Parallel Coupled Microstrip Bandpass Filter at Dual Frequencies of 1.8 GHz and 2.4 GHz for Wireless Application. Dostupné z [http://www.ijirce.com/upload/2014/june/13\\_Design.pdf](http://www.ijirce.com/upload/2014/june/13_Design.pdf)
- [32] NAGHAR, A., AGHZOUT, O., NAGHAR J., LATUI, H., ESSAADI, M. A New Matlab Simulation Interface Based on the Transmission Line Theory Approach to Design a Microstrip Parallel Coupled Band Pass Filters. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. Dostupné z <http://www.ijirce.com/upload/2013/october/1ANewMatlab.pdf>
- [33] SHAKDWIPEE, P., VYAS, K., SHAKDWIPEE, N. Design and Simulation of Microstrip Edge-Coupled Band Pass Filter for GPS Application. International Journal of Electrical, Electronics and Mechanical Controls. Dostupné z <http://www.ijeemc.com/November2012/3.pdf>
- [34] ŽENÍŠEK, A. Konvergence metody konečných prvků pro okrajové problémy systému eliptických rovnic dostupné z [http://dSPACE.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/103246/AplMat\\_14-1969-5\\_2.pdf](http://dSPACE.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/103246/AplMat_14-1969-5_2.pdf)

[35] OLIVER, G. Using Flex in High Speed Applications. Dostupné z : <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/flexible-rigid-flex-circuit-materials/documents/DEC-Using-Flex-in-High-Speed-Applications.pdf>

[36] KLIMO, O. Čebyševovy aproximace. Dostupné z <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~klimo/nm/17.pdf>

## Seznam vlastních publikací

[37] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Modeling of Current Density in Thick Film Resistors. In STUDENT EEICT 2010. Brno, NOVOPRESS. 2010. p. 236 - 240. ISBN 978-80-214-4079-1.

[38] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Contribution to modeling of stressing in microelectronic structures. Abstract proceedings. Polymer Electronics and Nanotechnologies: towards System Integration. Warsaw, Poland, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2010. p. 218 - 219. ISBN 978-83-7207-870-4.

[39] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; PULEC, J.; ŠANDERA, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead-free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structures. 6th International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture - MSMF6 - Abstract booklet. Brno, VUT Brno, FSI & Reprpress, Srbská 53, Brno. 2010. p. 184 - 184. ISBN 978-80-214-4112-5.

[40] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Contribution to modeling of stressing in microelectronic structures. In ISSE 2008 Conference Proceedings. 2010. p. 383 - 385. ISBN 978-1-4244-7849-1.

[41] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Analýza vlivu pouzdření na izolační vlastnosti. Slaboproudý obzor. 2010. 67(2). p. 12 - 15. ISSN~0037-668X.

[42] SZENDIUCH, I.; PULEC, J. Nové aspekty v pouzdření moderních elektronických systémů. In MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. 1. Brno, Novpress. 2010. p. 25 - 32. ISBN 978-80-214-4229-0.

[43] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Nové aspekty v pouzdření moderních mikroelektronických systémů. In MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. (id 15937). 1. BRNO, NOVOPRESS. 2011. p. 1 - 200. ISBN 978-80-214-4229-0.

[44] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Příspěvek k problematice termomechanického namáhání v mikroelektronických strukturách. In MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. (id 15937). 1. BRNO, NOVOPRESS. 2011. p. 19 - 133. ISBN 978-80-214-4229-0.

[45] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; ŠANDERA, J.; PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead-Free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structure. In Key Engineering Materials Vol. 465 (2011), Key Engineering Materials (print). Švýcarsko, Trans Tech Publications. 2011. p. 491 - 494. ISBN 978-3-03785-006-0, ISSN 1013-9826.

[46] PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Contribution to characterization of interdigital capacitors. In ISSE 2011 Conference Proceedings. 2011. p. 50 - 52. ISBN 978-1-4577-2111-3.

[47] ADÁMEK, M.; ŠTEKOVIČ, M.; PULEC, J.; BURŠÍK, M. The Increase of Electrode Surface of Thick-film Electrochemical Sensors by Unconventional Method. In 2011 34th

- International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. 1. NY USA, Curran Associates, Inc., 57 Morehouse Lane, Red Hook, NY 12571 USA. 2011. p. 616 - 621. ISBN 978-1-4577-2112-0, ISSN 2161-2528.
- [48]PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Thick Film Planar Inductor Characterization. In Proceedings of 18th European microelectronics packaging conference EMPC 2011. Brighton, UK, IMAPS-Europe. 2011. p. 458 - 461. ISBN 978-0-9568086-0-8.
- [49]PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Planar Thick Film Frequency Filter Design. In 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27-29A-1040 WIEN - Austria, IEEE Xplore digital library. 2012. p. 485 - 487. ISBN 978-1-4673-2241-6, ISSN 2161-2528.
- [50]PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Frequency bandpass filter in hybrid thick film technology. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>. 2013. 2012(VI.). p. 1 - 4. ISSN~1802-4564.
- [51]SZENDIUCH, I.; PULEC, J. Planární filtr v tlustovrstvové technologii. Slaboproudý obzor. 2013. 69(3). p. 10 - 14. ISSN~0037-668X.

# Životopis

Jméno a příjmení: Jiří Pulec  
Adresa: Čápkova 46 , 602 00 Brno  
E-mail: ji.pulec@post.cz  
Tel. kontakt: 605 740 766  
Datum narození: 13.10.1984

## Vzdělání:

1. 2000 – 2004: Gymnázium, Brno  
ukončení: maturita (2004)
2. od r. 2004: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno,  
obor mikroelektronika  
Bc. titul v roce 2007
3. v letech 2007 – 2009 navazující magisterské studium, titul Ing. udělen v roce  
2009
4. V současné době student PhD.

## Znalosti:

- simulace OrCAD SPICE
- programování C, C++ , částečně PHP
- jazyk VHDL
- návrhový systém EAGLE
- Výpočetní systém ANSYS
- Návrhový systém ANSYS

## Jazykové znalosti:

- anglický jazyk
- německý jazyk

## Zaměření:

Návrh a konstrukce elektronických systémů včetně simulací vlastností, technologie elektronických obvodů. Dále problematika komunikací a sítí a kryptografie.