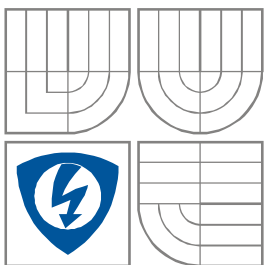


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PLANÁRNÍ OBVODOVÉ PRVKY NA TECHNICKÉ KERAMICE S NÍZKOU TEPLOTOU VÝPALU

PLANAR CIRCUITS ELEMENTS ON LOW TEMPERATURE COFIRED CERAMICS

TÉZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Petr Kosina

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

BRNO, 2012

Abstrakt

Předložená práce se zabývá návrhem a výrobou 3D struktur v technologii LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics). Pro tuto technologii bylo vybudováno pracoviště a byly navrženy a ověřeny technologické postupy pro kvalitní a reprodukovatelnou výrobu. Možnosti zavedené technologie nízkoteplotně vypalované keramiky byly demonstrovány při návrhu a výrobě tlakového senzoru, elektrodových systémů pro generátory ozónu, planárních obvodových prvků (cívky a transformátory) a výkonového pouzdra pro terahertzový modulátor. Vybrané části navržených zařízení byly doplněny o simulace v programu COMSOL Multiphysics. Práce přináší nové poznatky v oblasti konstrukce pouzder výkonových integrovaných obvodů a v konstrukci elektrodových systémů pro různé druhy elektrických výbojů. Výsledky práce mohou významně přispět v oblasti aplikace planárních obvodových prvků, při vývoji různých typů senzorů, při návrhu netradičních typů pouzder nebo při konstrukci elektrodových systémů pro kapacitně buzené výboje.

Klíčová slova

LTCC, planární, TFT, cívka, COMSOL, interdigitální, pouzdra.

Abstract

The present work deals with the design and manufacturing of 3D structures in LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) technology. To use this technology LTCC workplaces have been designed and technological processes for high quality reproducible production were suggested. Technological possibilities of low temperature co-fired ceramics were demonstrated in the design and manufacturing of pressure sensors, electrode systems for ozone generators, planar circuit elements (coils and transformers) and in the design a special package for middle-power terahertz modulator. Design of selected parts of respective devices was proved by simulations in COMSOL Multiphysics. The work provides new insights into the structure of power integrated circuits sleeves and structure of electrode systems for different types of electrical discharges. Results of this work can contribute significantly in the application of planar circuit elements, in the development of different types of sensors, in the design of atypical types of packaging or in the design of electrode systems for capacitive coupled electrical discharges.

Keywords

LTCC, planar, TFT, coil, COMSOL, interdigital, package.

Obsah

ÚVOD	5
1. CÍLE DISERTACE.....	6
2. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	7
2.1. Technologie ltcc	8
2.1.1. <i>Popis výroby struktury v technologii LTCC</i>	8
3. REALIZOVANÉ APLIKACE.....	13
3.1. Senzor tlaku.....	13
3.1.1. <i>Simulace senzoru tlaku</i>	14
3.2. Pouzdro pro čip modulátoru terahertzových vln.....	15
3.2.2. <i>Přípravek pro testování modulátoru</i>	19
3.3. Generování ozónu	21
3.3.1. <i>Volba tvaru a materiálu elektrod</i>	21
3.3.2. <i>Generátor ozónu v technologii LTCC</i>	22
3.3.3. <i>Pro porovnání byl vytvořen generátor ozónu na korundu (Al_2O_3)</i>	23
3.4. Planární obvodové prvky	24
3.4.1. <i>Planární cívka 2D – statická analýza</i>	25
3.4.2. <i>Planární cívka v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz</i>	25
3.4.3. <i>Skin a proximity efekt v planárních cívkách</i>	26
3.4.4. <i>Planární cívka vyrobená v technologii LTCC</i>	29
3.4.5. <i>Planární transformátor</i>	30
6 ZÁVĚR.....	34
SEZNAM LITERATURY	36
AUTOROVI PUBLIKACE	37

ÚVOD

Nízkoteplotně vypalovaná keramika LTCC (*Low temperature Cofired Ceramics*) patří mezi relativně nový typ keramických substrátů. Umožňuje vytváření multivrstvových obvodových 3D struktur, skládáním jednotlivých keramických pásku na sebe, které mohou být použity jako nosný substrát pro vodivé motivy nebo jako konstrukční materiál pro vytvoření různých mechanických částí. Oproti klasické tlustovrstvé technologii vstupuje do procesu výroby nový technologický proces tzv. *laminace*. Jedná se o spojení jednotlivých pásku nízkoteplotně vypalované keramiky při současném působení tlaku a teploty. Následně je struktura vypálena v peci patřičným teplotním profilem, který je definovaný pro každý typ keramiky. Nakonec následují dokončovací operace, kde bývají vsazovány čipy a pasivní součástky, dochází k dělení substrátů aj.

Tento typ technologie umožňuje paralelní zpracování jednotlivých pásků, a tím dochází k snížení celkové doby potřebné pro výrobu. Kromě toho, lze mezi jednotlivými výrobními kroky provádět optickou kontrolu, při které mohou být z procesu odstraněny vadné pásy, a tím je možné zvýšit výtěžnost výroby. Jak je tedy zřejmé, technologie nízkoteplotně vypalované keramiky umožňuje konstrukci netradičních struktur, které není možné vytvořit jiným typem technologie. Zvládnutí jednotlivých technologických procesů nabízí možnost uplatnění technologie LTCC v různých průmyslových aplikacích.

Technologie LTCC nabízí možnost konstrukce složitějších systémů a zařízení vynikající především vyšší spolehlivostí, výkonem, mechanickou a chemickou odolností. Tyto vlastnosti lze efektivně využít například při konstrukci různých typu senzorů, kde dochází k přeměně mechanické energie v elektrickou.

Simulace fyzikálních dějů patří neodmyslitelně k návrhu elektrických zařízení a systémů. Umožňuje provést komplexní analýzu řešeného problému a optimalizovat jednotlivé parametry. Základní požadavkem je přesnost, která souvisí s přesností zadávaných konstant, vhodného nastavení okrajových podmínek, volbou řešícího algoritmu a výpočetním výkonem. Simulace se stávají v dnešní době vhodným prostředkem pro analýzu.

Na Fakultě elektrotechniky bylo vytvořeno pracoviště pro realizaci obvodů LTCC a po zvládnutí této technologie se podařilo získat významné výsledky v oblasti aplikací této technologie v konstrukci pouzder výkonových integrovaných obvodů a v konstrukci elektroodových systémů pro různé druhy elektrických výbojů.

1. Cíle disertace

Rozšíření poznatků z oblasti nízkoteplotně vypalovaných substrátů může do značné míry přispět při konstrukci a návrhu různých typů zařízení s možností dosáhnout lepších elektrických vlastností a mohou pomoci při nalezení nových způsobů řešení. Výchozí situace při stanovení cílů práce byla následující.

- Vytvoření pracoviště pro práci s technologií LTCC na ústavu mikroelektroniky.
- Zjištění parametrů dílčích technologických procesů na vytvořeném pracovišti pro dosažení kvalitní a reprodukovatelné výroby 3D struktur. Získané parametry umožní výrobu struktur různých typů.
- Inovace různých technologických procesů s cílem získání nových vlastností materiálů.
- Vytvoření pracoviště pro měření částečných výbojů pro diagnostiku kvality laminace struktur vyrobených v technologii LTCC a elektrické pevnosti planárních struktur.

Cíle práce byly následující:

- Vývoj keramických pouzder pro speciální polovodičové součástky. Při konstrukci budou řešeny způsoby vytváření kontaktů, z hlediska vyšší proudové zatížitelnosti a odvod tepla z čipu. V rámci vývoje pouzdra bude nutné vytvořit testovací přípravek, na kterém bude realizováno měření, chlazení pouzdra a také posouzena kvalita vyrobených dílčích částí.
- Vývoj elektrodových systémů pro různé typy elektrických výbojů. Jedním z nejzajímavějších je výboj s dielektrickou bariérou např. pro generaci ozónu nebo excimerové výboje.
- Vývoj tlakového senzoru pro měření velmi malých tlaků, který prověří možnost výroby dutin v technologii LTCC. Konstrukce senzoru bude vyžadovat úpravu parametrů technologických procesů.
- Vývoj planárních obvodových prvků v technologii LTCC, jmenovitě planárních cívek, zjištění jejich různých elektrických parametrů. V případě testování elektrické pevnosti bude použito částečných výbojů.
- Ověření principů je potřeba vždy provádět pomocí simulace, protože umožní nahlédnout na řešený problém způsobem, při kterém nejsou kladeny žádné požadavky na technologické zázemí. Simulacemi budou zjištěny různé parametry a vlastnosti materiálů, které budou použity pro porovnání výsledků získaných na vyrobených vzorcích. Výsledky budou prodiskutovány z hlediska přesnosti a vzniku chyb.

2. Rozbor současného stavu

Nízkoteplotně vypalovaná keramika byla vyvinuta koncem 50. let pro zvýšení kapacity kondenzátoru společnosti AEROVOX Corporation. V 60. letech došlo k rozvoji této technologie do podoby vícevrstvých obvodových struktur, která se uplatňuje až do dnešní doby, a tuto myšlenku uvedla na trh RCA Corporation. Obě zmiňované oblasti byly patentovány amerických patentním úřadem. Uvolnění technologie do komerční sféry nastalo v 80. letech.

V dřívějších dobách byla nízkoteplotně vypalovaná keramika využívána pro konstrukci multivrstvových obvodových struktur, která umožňovala integraci pasivních obvodových prvků do struktury. Další výhodou byla možnost vytváření dutin, do kterých byly vsazovány aktivní prvky a pomocí mikrodrátků byly propojeny se strukturou.

Kromě výhody vytváření 3D struktur umožňující zvýšit hustotu integrace na jednotku plochy, bylo také využíváno velmi dobrých mechanických a elektrických vlastností keramických materiálů. Jelikož keramické substráty vynikají svoji vysokou permitivitou, jejich uplatnění bylo především pro vysokofrekvenční aplikace, kde je možné vytvářet rezonanční obvody vysoké jakosti a vysoké spolehlivosti, která je mnohdy v některých aplikacích vyžadována [1], [2].

V současnosti nachází technologie LTCC uplatnění v různých aplikacích. Nízkoteplotní materiály a substráty různých elektrických vlastností nabízejí renovované firmy jako například DuPont, Heraeus, ESL a Koycera. K substrátům je nabízeno velké množství past a jsou vyvíjeny stále další.

Technologie LTCC nachází uplatnění v těchto aplikacích:

- senzorové systémy pro převod mechanických veličin na elektrické
- analýza kapalin a různých vzorků
- vysokofrekvenční a mikrovlnná technika
- řídicí systémy v automobilech
- mikroelektronické systémy
- různé obvodové prvky
- biomedicínské aplikace
- pouzdrění
- výkonové aplikace

Technologie LTCC znovu oživila technologii tlustých vrstev a výrobu hybridních integrovaných obvodů (HIO). V současné době je nabízeno velké množství zařízení pro práci s touto technologií, umožňující dosáhnout velké výtěžnosti a reprodukovatelnosti výroby.

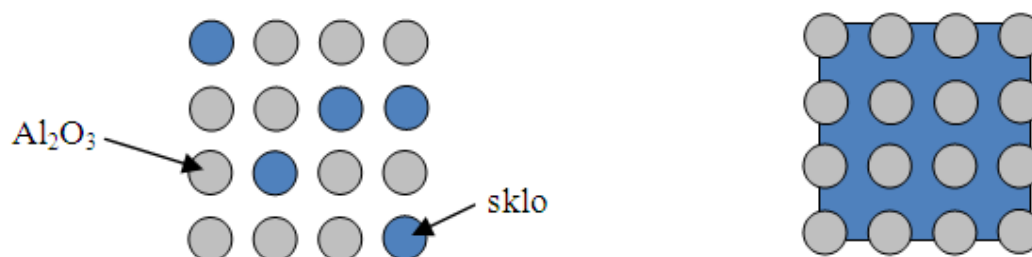
Struktury nízkoteplotní keramiky jsou vyráběny v rozměrech řádu centimetrů a velkého počtu vrstev (až 100 pásku). Velké úsilí je věnováno snížením šířky vodivé stopy a vytváření odporových past, které budou s nízkoteplotně vypalovanou keramikou kompatibilní. V současné době také probíhá výzkum vytváření tenkých vrstev na nízkoteplotní keramice, kde jsou hledány různé metody úpravy povrchu substrátu, aby bylo možné provést depozici tenkých vrstev.

2.1. Technologie ltcc

Novým přístupem v chápání tlustovrstvé technologie je její modifikace nazývaná technologie LTCC (*Low Temperature Cofired Ceramics*). Jedná se o nízkoteplotně vypalovanou keramiku ($850\text{ }^{\circ}\text{C}$), která umožňuje sloučit některé výrobní postupy do jednoho kroku, a tím podstatně redukovat dobu potřebnou na celý technologický proces. Může se například jednat o přímou integraci pasivních obvodových prvků (R, L, C) do struktury [3].

Nízká teplota výpalu je dána složením pásu (označení nevytvrzeného substrátu), která je z 40% Al_2O_3 , 45% SiO_2 a 15% organického pojiva a stopového množství jiných prvků, které výrobce většinou v katalogových listech neuvádí. Z důvodu největšího zastoupení oxidu křemičitého (křemenné sklo) bývá tento typ substrátu také nazýván jako keramika na bázi skla.

Při výpalu nízkoteplotní keramiky dochází ke spojení částic oxidu křemičitého s částicemi Al_2O_3 a současně k odpaření pojivové složky. Ukázka struktury složení LTCC keramiky v syrovém a ve vytvrzeném stavu je na obr.1. [4].



Obr. 1.: Struktura LTCC (vlevo před výpalem, vpravo po výpalu).

Množství jednotlivých částic prvků obsažených v pásu, tvoří po výpalu jeho výsledné mechanické a elektrické vlastnosti. Pojivová složka (organické pojivo) se na výsledných vlastnostech nepodílí, protože při výpalu dochází k jejímu odpaření.

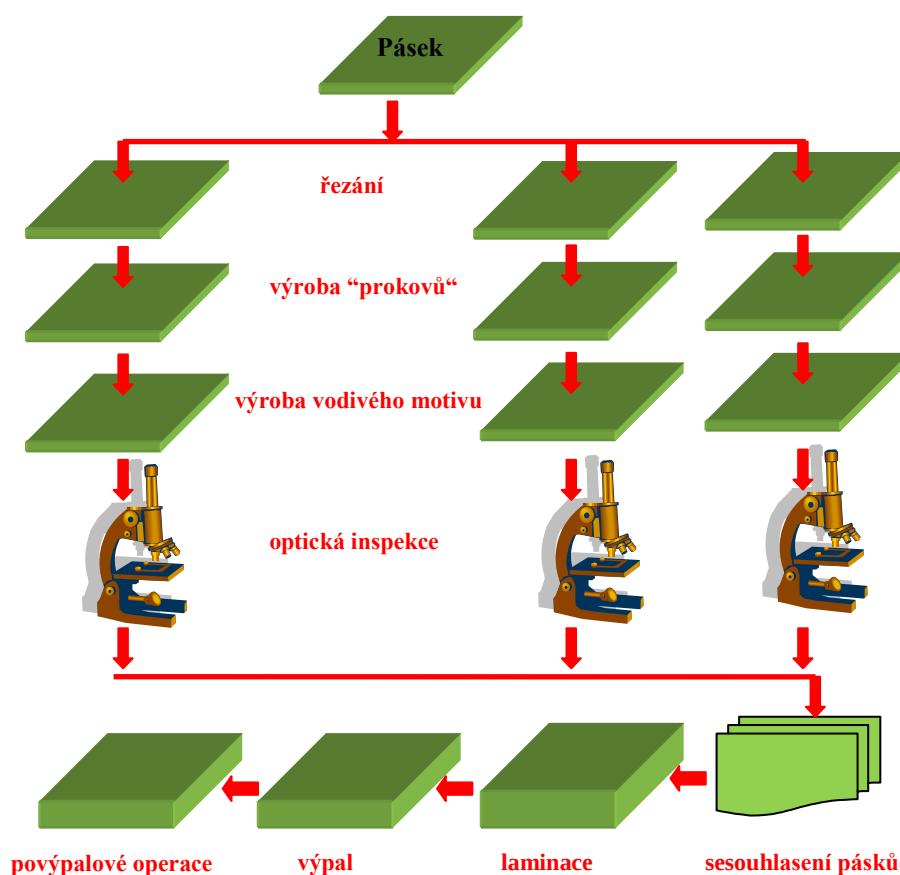
Úlohou pojivové složky je pouze zajistit spojení oxidu křemičitého a korundu v syrovém stavu. Tato složka ovšem zajišťuje i jeho flexibilitu a měkkost, kterou lze využít při vytváření struktur různých tvarů.

Množství organického skla určuje možnost použití. Pásky nízkoteplotní keramiky s vyšším obsahem skelné báze se používají na nižších kmitočtech, a také jsou mnohem vhodnější pro vytváření tenkých vrstev. Pro vyšší kmitočty se naopak používají s menším obsahem skla, protože skleněné pojivo se vyrábí z přírodních surovin obsahujících hodně nečistot, které se projevují negativně na vyšších kmitočtech.

Pro práci s keramikou nízkých teplot jsou v katalogových listech definovány výrobní postupy, které jsou doporučeny pro dosažení kvalitní a reprodukovatelné výroby požadované struktury. Jednotlivé výrobní postupy jsou popsány v následující části.

2.1.1. Popis výroby struktury v technologii LTCC

Výroba struktury v technologii LTCC je popsána jednotlivými dílčími etapami, které jsou zobrazeny v grafickém vývojovém diagramu na obr. 2. Mezi zobrazené výrobní kroky lze zařadit optickou kontrolu, která zajišťuje kontrolu kvality procesu, a tím dochází k zvýšení jakosti a výtěžnosti výroby finální struktury.



Obr. 2.: Vývojový diagram výroby struktury v technologii LTCC.

Řezání

Keramický pásek nízkoteplotní keramiky je v surovém stavu velmi snadno opracovatelný. V prvním kroku výrobního procesu dochází k řezání celkového tvaru struktury, technologických otvorů, různých děr a dutin. Řezání LTCC keramiky je možné zařízením nízkého výkonu, protože jak už bylo řečeno, nejedná se o čistý korund, ale částice korundu a křemičitého skla, které jsou spojeny organickým pojivem. Po výpalu je organické pojivo nahrazeno křemičitým sklem. Z tohoto důvodu je zřejmé, že po výpalu nebude struktura dosahovat tvrdosti korundu. Nejdůležitějším kritériem pro hodnocení kvality řezu je hladkost hran a velikost samotného řezu, která je dána velikostí stopy a tedy velikostí rezného nástroje.

Způsoby vytváření děr a dutin:

- *Razicím nástrojem*
- *CNC strojem*
- *Laserem*

Výroba vodivého propojení skrz vrstvu

Zvláštním typem elektricky vodivého spoje je propojení skrz vrstvu. Jedná se o elektricky vodivý přechod mezi dvěma substráty nebo přechod z jedné strany substrátu na druhý. Velikost otvoru pro vodivé propojení je závislé na tloušťce substrátu a obvykle se uvádí, že by měl být v poměru 1 : 1 nebo by měl mít minimální přípustný průměr 50 µm. Otvor je

následně zaplněn pastou, která je k výrobě vodivého propojení určena, a to pomocí šablonového tisku. Tloušťka kovové šablony se uvádí v rozmezí 40 – 75 μm . Po natisknutí následuje sušení při teplotě 80 °C po dobu 10 minut [4].

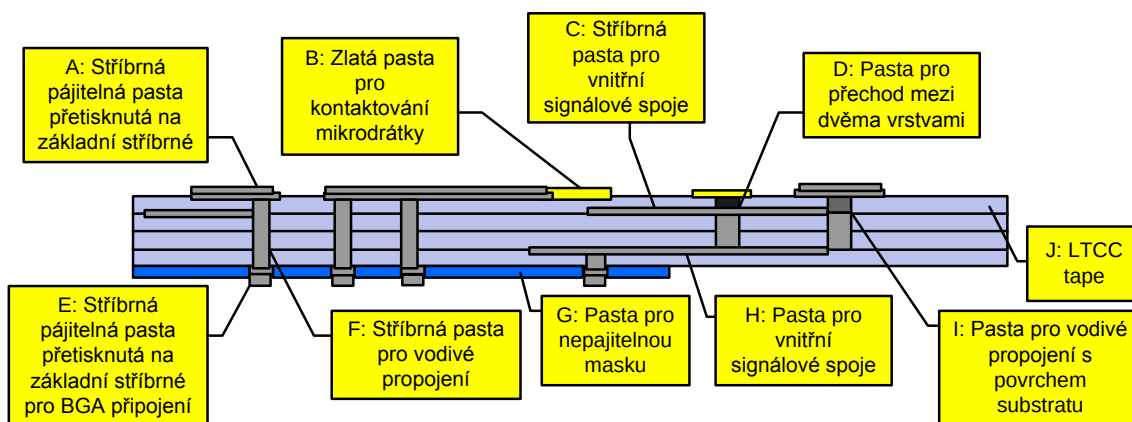
Výroba vodivého motivu

Vodivý motiv je na nízkoteplotní keramice realizován klasickou sítotiskovou metodou. Počet ok na jeden palec síta pro vodivé pasty je uváděn v rozmezí 290 – 400 ok na palec. Při tisku musí být substrát uchycen na sítotiskovém stole pomocí vakua přes porézní kámen, aby nedošlo k poškození pásu LTCC a současně ke špatnému natištění vodivého motivu. Po natištění je vrstvu nutné zasušit při stejných parametrech jako při výrobě vodivého propojení. K nízkoteplotně vypalované keramice jsou dodávány různé typy past, které lze dělit podle účelu použití.

Materiál pro 3D struktury:

- A:** Stříbrná pájitelná pasta, kterou je možné přetisknout základní stříbrnou pastou. Je určena výhradně pro vnější vrstvy. Tloušťka bývá v rozsahu 15 – 21 μm a hodnota odporu na čtverec je udávána $\leq 2 \text{ m}\Omega$.
- B:** Zlatá pasta určená pro kontaktování mikrodrátky. Tento typ pasty se tiskne na vnější vrstvy. Tloušťka bývá kolem 15 μm a hodnota odporu na čtverec je udávána $\leq 10 \text{ m}\Omega$.
- C:** Stříbrná pasta pro vnitřní signálové spoje. Tloušťka vrstvy je v rozsahu 15 – 21 μm a hodnota odporu na čtverec se uvádí $\leq 2 \text{ m}\Omega$.
- D:** Pasta na bázi stříbra a paladia, určená pro přechod mezi dvěma materiálově rozdílnými vrstvami.
- E:** Stříbrná pasta přetisknutá na základní stříbrné vrstvě. Pasta je pájitelná, určená především pro kontakty BGA (*Ball Grid Array*).
- F:** Stříbrná pasta určená pro vytváření vodivého propojení ve vnějších vrstvách.
- G:** Pasta pro vnitřní vrstvy, konkrétně pro vytváření ochranné nepájivé masky. Tato pasta musí být vypalována dodatečně, až je celá struktura vypálená. Má nižší teplotu výpalu.
- H:** Stříbrná pasta určená pro vytváření vodivého propojení z vnitřní vrstvy na povrch struktury.
- I:** LTCC dielektrický pásek určité tloušťky, která se liší podle typu a výrobce pásu.

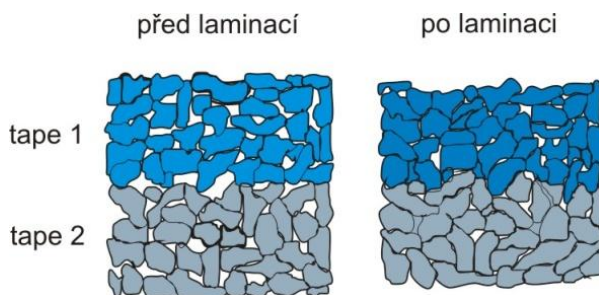
Použití jednotlivých past ve struktuře je ukázána na obr.3.



Obr. 3.: Popis využití jednotlivých past ve struktuře vyrobené v technologii LTCC.

Laminace

Při vytváření multivrstvové obvodové struktury, vstupuje nový technologický proces, který bývá označován jako *laminace*. Jedná se o proces, kde jsou jednotlivé pásy s vytvořeným motivem pokládány na sebe a sesouhlaseny pomocí technologických otvorů. Následně dochází za současného působení tlaku (2100 N/cm) a teploty (70 °C) po dobu 10 minut, k spojení jednotlivých vrstev. Ukázka principiálního spojení dvou pásků je uvedeno na obr.4.



Obr. 4.: Princip spojení dvou pásků nízkoteplotní keramiky.

Při zahřátí pásku dochází k jejich měknutí, a za působení tlaku k vzájemnému spojení, které v této fázi není příliš pevné, a proto není vhodné strukturu mechanicky namáhat ohýbáním. K úplnému spojení jednotlivých vrstev dochází při výpalu, kde se spojí skelné fáze pásků nízkoteplotní keramiky.

Pro každou nízkoteplotní keramiku je výrobcem uvedeno, který typ laminace je pro daný pásek optimální.

Popis základních typů laminací podle působení tlaku:

- *V jednom směru* – při této laminaci působí na laminační šablonu síla jen ze dvou směrů. Tento způsob laminace patří mezi ty jednodušší a lze dosáhnout dobrých výsledků pouze u struktur s menším počtem pásků. Hlavně zde dochází k deformaci hran tím, že se snižuje jejich ostrost, a s tím souvisí výsledná kvalita vyrobené struktury. Tento způsob z hlediska své nízké náročnosti patří mezi nejpoužívanější způsoby.
- *Všesměrová* – patří mezi kvalitnější způsoby laminace, ale je náročnější na zařízení. Tento způsob je realizován většinou v kapalném prostředí, kde na danou strukturu působí síla ve všech směrech. Využívá se většinou při laminaci většího počtu pásků (nad 20 ks) a je u ní dosahováno velmi dobré ostroty hran a tedy kvality výsledné struktury.

Základní typy laminací byly rozšířeny o další z důvodu výroby složitějších struktur a s tím souvisejících požadavků na kvalitu laminace a reprodukovatelnost výroby.

Typ laminace z hlediska počtu laminačních cyklů:

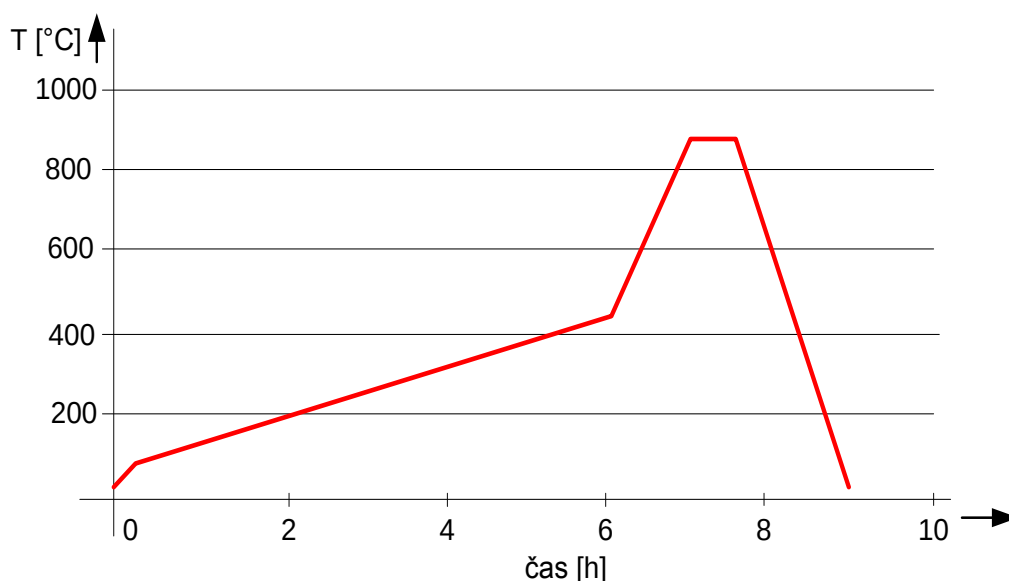
- *Jednorázová laminace*
- *Postupná laminace*

Typ laminace z hlediska teploty:

- *Teplotní*
- *Za studena*

Výpal

Pro každý typ nízkoteplotní keramiky je definován patřičný teplotní profil, při kterém dochází k jejímu vytvrzení a keramika tím získává své specifické vlastnosti. Ukázka teplotního profilu pro konkrétní typ (HERAEUS HeraLock 2000), který udává výrobce, je na obr.5.



Obr. 5.: Teplotní profil pro výpal LTCC - HeraLock 2000 od firmy Heraeus.

Kromě vytvrzení nízkoteplotní keramiky při výpalu, také dochází k odpaření pojivové složky, která spojuje částice korundu a oxidu křemičitého v surovém stavu. Odpaření těchto složek má za následek smrštivost pásků nízkoteplotní keramiky. U klasických LTCC pásků je udávána smrštivost po výpalu v rozmezí hodnot 13 – 20% ve všech souřadných osách.

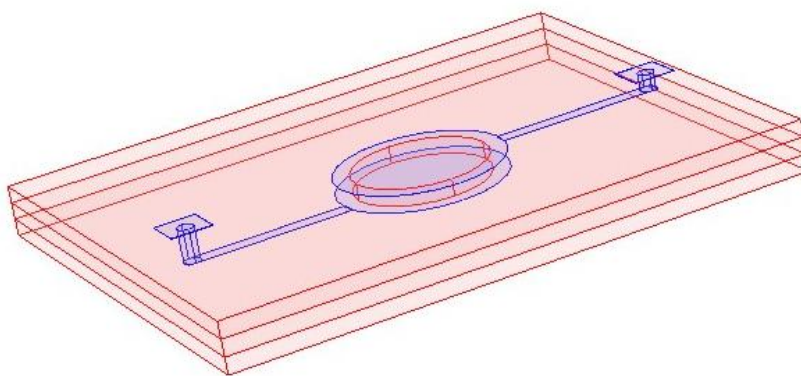
U substrátu s nulovou smrštivostí je to 32% v ose z (tloušťka substrátu) a v ose x, y pouze 0,2 – 0,5 %. Tato vlastnost, jak bývá uváděno v katalogových listech od výrobce, je dána technologií výroby, obsahem organického pojiva a výskytu stopového množství jiných chemických prvků v složení pásku. Při návrhu struktury je nutné s tímto parametrem počítat a zahrnout jej do celkového návrhu.

3. Realizované aplikace

Zjištěné parametry dílčích výrobních procesů byly ověřeny při konstrukci tlakového senzoru, pouzdra pro modulaci terahertzových vln, generátor ozónu a planárního transformátoru. Přínosy této práce v realizovaných aplikacích by nebylo možné dosáhnout bez zvládnutí technologických procesů výroby 3D struktur v technologii LTCC.

3.1. Senzor tlaku

Keramika nízkých teplot byla prvotně určena pro multivrstvové obvodové struktury, ale postupně vlivem velmi dobrých elektrických a mechanických vlastností tohoto typu substrátu našla uplatnění při konstrukci různých typů senzorů. Typickým příkladem je tlakový senzor fungující na principu deskového kondenzátoru. Návrh uspořádání struktury tlakového senzoru je uveden na obr.6. [17].



Obr.6.: Návrh senzoru tlaku v technologii LTCC.

Pro konstrukci tlakového senzoru byly vytvořeny elektrody kruhového tvaru. Při konstrukci elektrod byly řešeny následující problematiky:

Volba umístění elektrod:

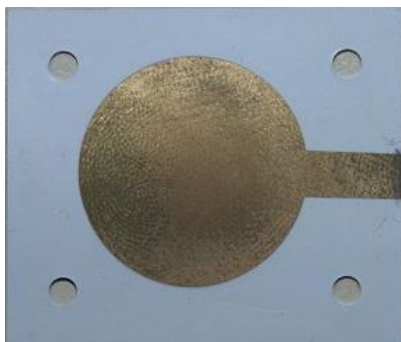
- a) uvnitř dutiny
- b) na povrchu struktury

Způsob vytváření elektrod:

- technologií tlustých vrstev
- technologií tenkých vrstev

Tlakový senzor byl nejprve vytvořen s vnitřními elektrodami, které byly vytvořeny tlustovrstvou technologií. Při výrobě struktury se po laminaci vyskytly defekty v podobě prohnutí substrátu v prostoru dutiny a po výpalu byly dodatečně zjištěny malé praskliny v přechodu mezi substrátem dutinou.

Pro správnou funkci senzoru bylo nutné defekty a praskliny odstranit. Jejich původ byl přisuzován nevhodnému způsobu laminace pro tento typ struktury. Protože pokud se ve struktuře nachází dutina, nutně musí dojít k úpravě laminačních parametrů.

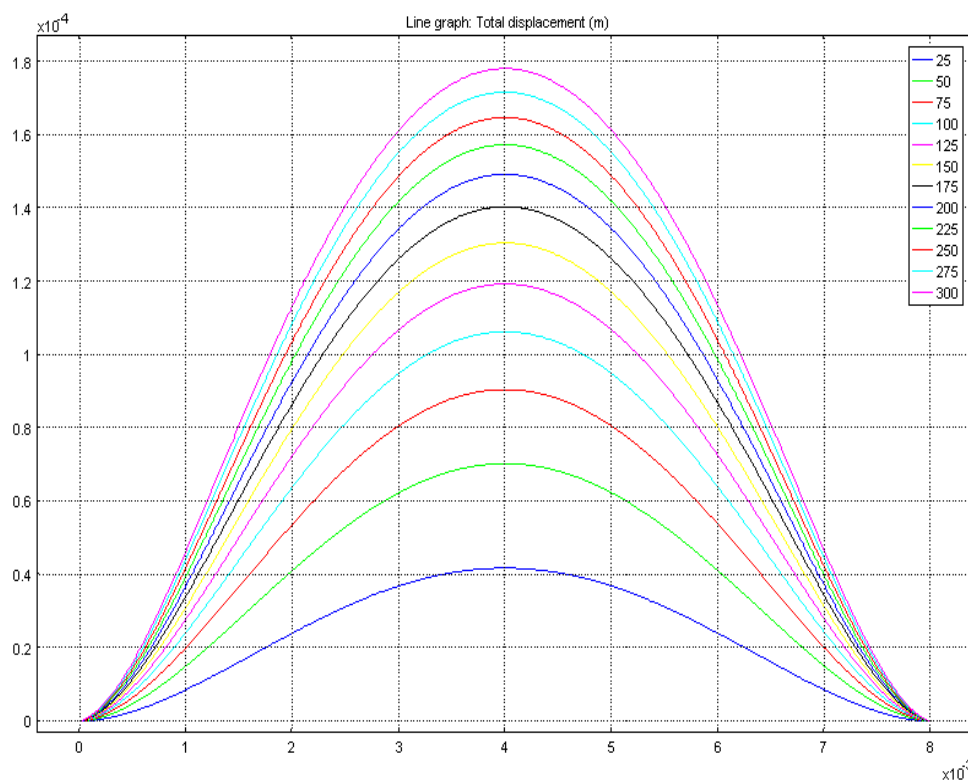


Obr.7.: Tlakový senzor s vytvořenými zlatými elektrodami vakuovým napařováním.

Z tohoto důvodu byla vytvořena struktura tlakového senzoru a elektrody byly vytvořeny napařením tenké zlaté vrstvy o tloušťce 50 nm nad prostorem dutiny viz. obr.7. Testování senzoru bylo realizováno jeho umístěním do exikátoru a měřeno pomocí vodního sloupce.

3.1.1. Simulace senzoru tlaku

Pro zjištění velikosti průhybu substrátu tlakového senzoru byla provedena simulace v programovém prostředí Comsol Multiphysics. V simulaci byl nastaven Youngův modul pružnosti nízkoteplotní keramiky 240 GPa a tloušťka jedné vrstvy 100 μm . Tlak působící na povrch tlakového senzoru byl krokován v rozmezí 25 kPa – 300 kPa po 25 kPa. Hodnota 100 kPa byla nastavena jako hodnota atmosférického tlaku tzv. normálový tlak. Při tlaku 300 kPa byl maximální průhyb zjištěn 180 μm . Výsledný graf jednotlivých hodnot průhybů nízkoteplotní keramiky je uvedeno na obr.8.



Obr.8.: Graf velikosti průhybu substrátu u tlakového senzoru v místě dutiny.

Simulace tlakového senzoru zobrazila průhyb substrátu v závislosti na tlaku. Co ovšem už neukázala, byla velikost kapacity, kterou bylo nutné vypočítat ze známého vzorce deskového kondenzátoru. Ze vzorce byla následně vypočítána kapacita pro jednotlivé průhyby nízkoteplotní keramiky, tento výpočet mohl být zatížen malou systematickou chybou, vlivem nerovnoměrného průhybu keramického substrátu, kde největší průhyb je uprostřed a ke kraji klesá. Veličina $d_{\text{průhyb}}$ udává velikost průhybu v nejnižším bodě pásu nízkoteplotní keramiky. Velikost dutiny byla 200 μm . Tato hodnota udává vzdálenost pásu bez zatížení. Při zatížení, je výsledná vzdálenost dána rozdílem prostoru dutiny a průhybu keramického pásu. Výpočet kapacity tlakového senzoru, pro jednotlivé hodnoty průhybu je uveden v tab.1.

Tab. 1.: Závislost změn kapacity na průhybu substrátu.

tlak [kPa]	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$D_{\text{průhyb}}$ [μm]	0	45	77	98	114	127	149	159	167	175
$D_{\text{přep}}$ [μm]	200	155	123	102	86	73	51	41	33	25
C [pF]	12,2	12,6	12,8	13	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7

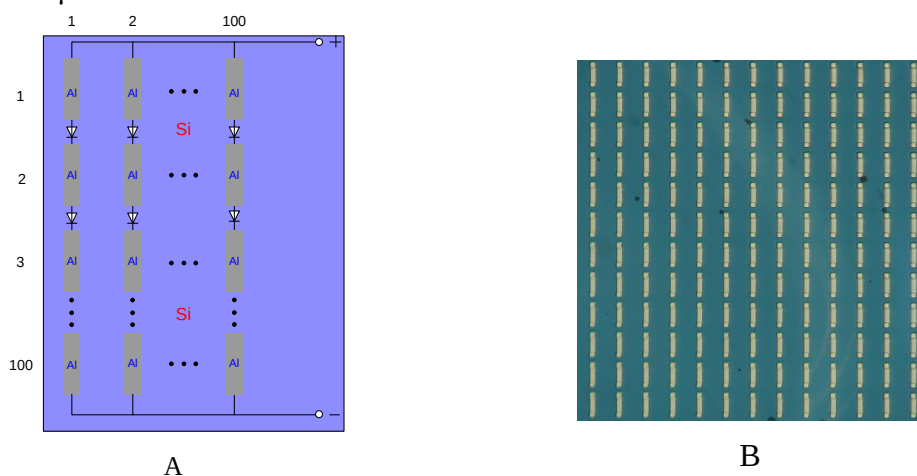
Měření senzoru tlaku

Pro porovnání výsledků simulací bylo provedeno měření na vytvořených vzorcích. U tlakového senzoru s elektrodovým systémem vyrobeným tlustovrstvě v technologii nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Při zatížení docházelo pouze k malým změnám kapacity. U senzoru s elektrodami vytvořenými napařením tenké vrstvy zlata bylo dosaženo uspokojivých výsledků. Kapacita senzoru bez zatížení byla 15 pF.

Měření na vzorku tlakového senzoru bylo provedeno pomocí exikátoru a vodního sloupce. Největší hodnota kapacity při maximálním tlaku 200 kPa byla 17 pF.

3.2. Pouzdro pro čip modulátoru terahertzových vln

Terahertzové vlny se nacházejí ve spektru mezi mikrovlnným a infračerveným zářením. Frekvenční pásmo elektromagnetického vlnění je 0,3 – 10 THz, což odpovídá vlnovým délkám 1 mm až 30 μm .



Obr.9.: Struktura modulátoru pro THz vlny na obrázku A, aktivní část čipu – fotografie pořízena na reálném vzorku obrázek B.

Pro modulaci tohoto záření byl vyvíjen modulátor, který je realizován monolitickými technologiemi na křemíkovém čipu.

Modulátor využívá nelineárních vlastností spínací struktury, složené z matice PIN diod. Při sepnutí se tato struktura chová jako vodivá mřížka, což může být využito pro řízení její průchodnosti pro elektromagnetické vlny s kmitočtem v oboru THz. Navržená struktura spínané mřížky a detail vytvořeného čipu jsou uvedeny na obr. 9. [15], [16], [17].

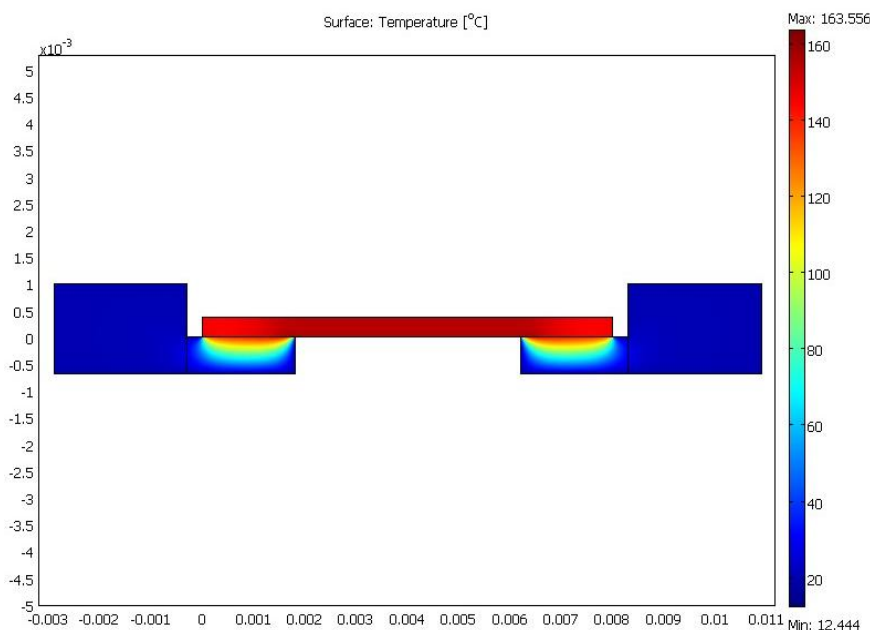
Čip terahertzové mřížky bylo nutné zapouzdit, ale při tom respektovat požadavky, jako například přístup optického signálu z obou stran, odvod tepla a dostatečnou proudovou zatížitelnost. Komerčně vyráběná pouzdra nebyla schopna splnit uvedené požadavky.

Vhodným řešením se ukázalo být použití technologie LTCC, která umožňuje vytváření netradičních keramických struktur.

Pouzdro modulátoru terahertzové mřížky se skládalo z těchto částí:

- **Lůžko pro uložení čipu**

Lůžko pro čip z důvodu mechanické pevnosti bylo složeno ze dvou pásek nízkoteplotní keramiky. Na tyto dva pásky bylo položeno dalších 6 pásků s vyřezaným obdélníkovým otvorem o rozměrech 9 x 8 mm. Tím byla vytvořena dutina ve struktuře vymezující oblast čipu. Na dně dutiny byl vyřezán otvor kruhového tvaru o průměru 8 mm zajišťující přístup k jeho spodní straně. Připevnění čipu velikosti 8 x 7 mm k pouzdru bylo provedeno přilepením teplotně vodivým tmelem Epotec H31, který byl nanesen kolem vytvořeného otvoru. Upevnění čipu modulátoru v pouzdru je uvedeno na obr.10.



Obr.10.: Simulace přestupu tepla z čipu THz modulátoru do keramického pouzdra.

Odvod tepla z čipu byl simulován v programu Comsol, kde byly zadány parametry jednotlivých materiálů. Maximální teplota na čipu byla nastavena 155 °C a teplota keramického pouzdra 25 °C. Ze simulací bylo zjištěno, že největší teplota se koncentruje v čipu a v místě kontaktu s pouzdrům klesla jen na hodnotu 143 °C viz. obr.10.

Z výsledku vyplývá, že přestup tepla z čipu vlivem malé kontaktní plochy s pouzdrům je velmi malý. Z tohoto důvodu nebude možné zajistit dostatečný odvod tepla a nebude možné uchlazení příliš velké výkony. Schopnost chlazení čipu byla následně ověřena měřením.

- **Kontakty pro připojení mikrodrátků**

Připojení čipu k vývodům pouzdra bývá většinou realizováno pomocí mikrodrátků nebo mikropásku. Volba závisí na výkonovém zatížení čipu. [15] Vytvoření plošky pro nakontaktování, bylo realizováno na posledním pásku nízkoteplotní keramiky, který vymezuje prostor pro samotný čip. Tisk byl proveden zlatou pastou TC 8101, která je doporučena výrobcem pro kontaktování mikrodrátků.

Délka mikrodrátku propojující čip a pouzdro by měla být co nejkratší, aby bylo možné dosáhnout co největší proudové zatížitelnosti. Z tohoto důvodu, byla vodivá plocha o rozměrech 10 x 20 mm vytvořena na okraji kratší strany dutiny. Aby nedošlo vlivem průchodu proudu k tepelnému průrazu vrstvy, byla její značná část překryta dalším páskem nízkoteplotní keramiky. Byly pouze ponechány malé obdélníkové otvory, sloužící pro vytvoření kontaktů mikrodrátky a připojení přírodních měděných pásků. Ochrana vrstvy tímto způsobem umožní dostatečný odvod tepla a ochranu vrstvy před tepelným průrazem. Nakontaktování čipu mikrodrátky je uvedeno na obr.11.



Obr.11.: Nakontaktování čipu mikrodrátky.

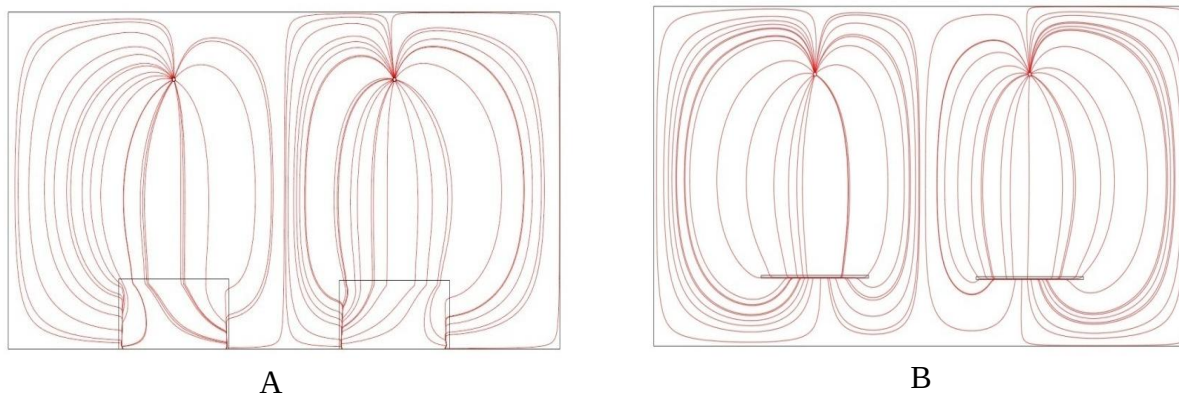
Celkový proud strukturou je daný požadovanou proudovou hustotou, plochou jedné diody a počtem sloupců. Při stávajících rozměrech struktury a počtu sloupců 150 vychází z modelových výpočtů proudů celkový proud $I_C = 15 \text{ mA}$. Při požadavku na vyšší koncentraci nosičů v sepnutém kanálu (odpovídající proudové hustotě až 10 kA cm^2) může být tento proud zvýšen až k hodnotám kolem 150 mA [12]. Pro zajištění velkého proudu je však potřebné výrazně zvýšit řídicí napětí spínače a teplotní namáhání čipu se tím zvětšuje. V případě, že by došlo k překročení teploty čipu, přestala by struktura fungovat a chovala by se jako zkrat, což znamená, že průtok proudem strukturou by byl značný. Struktura ovšem tento proud snese, a z toho důvodu je vhodné, počítat s větším proudovým zatížením kontaktu, kdy při přetížení a následném ochlazení bude celá struktura nadále provozuschopná. Hodnota proudu při krátkodobém zatížení, byla stanovena na 10 A v kontinuálním režimu. Aby propojení čipu a pouzdra sneslo krátkodobě tak vysoký proud, bylo vypočítáno, že na jeden kontakt bude nutné ultrazvukovým svařováním nakontaktovat 50 mikrodrátků.

Maximální proudová zatížitelnost propojení čipu a pouzdra byla zjištěna pomocí stejnosměrného proudového zdroje. Byla nastavena minimální hodnota napětí 2 V a maximální proud byl postupně zvyšován. Nejvyšší dosažená hodnota proudu byla 9 A. Proudová zatížitelnost mikrodrátku je mnohem vyšší, než bylo zjištěno. Z měření je tedy zřejmé, že došlo k tepelnému průrazu. Pokud by tedy bylo efektivně odvedeno teplo, bylo by možné zvýšit proudovou zatížitelnost. Vhodným řešením se ukázalo být zalití kontaktů do tepelně vodivého tmelu Epotec H31, který se používá pro ochranu mikrodrátků před mechanickým poškozením a k odvodu tepla. Vytvrzení tmelu dochází při teplotě 150 °C po dobu 60 minut.

Chráněné kontakty byly následně testovány a bylo dosaženo uspokojivých výsledků, a to krátkodobým kontinuálním proudovým zatížením 10 A.

- **Kontakty pro připojení pouzdra do elektrického obvodu**

Při konstrukci pouzdra byl velký důraz kladen na jeho snadnou výměnu. Z toho důvodu byly kontakty vyrobeny z měděných pásků, které zároveň zaručují velmi dobrý elektrický kontakt zatížitelný ve stejnosměrném režimu až 10 A. Výměnu modulátoru je možné provést po odšroubování dvou šroubů M3, kterými jsou připevněny měděné pásky ke kontaktům přípravku.



Obr. 6.: Rozložení proudové hustoty kontaktu: A) přiložením pásku na vrstvu, B) průchodem pásku skrz vrstvu.

Připojení měděných pásků bylo řešeno dvěma způsoby. V prvním případě se jednalo o připájení pásku jeho přiložením na vodivou, zlatou vrstvu. U tohoto způsobu dochází k nerovnoměrnému rozložení proudové hustoty kontaktu. Vlivem větší proudové zatížitelnosti by mohlo dojít k tepelnému průrazu, a tím k poškození vodivé vrstvy – ztrátě elektrického spojení.

Daný problém lze vyřešit druhým způsobem, kde je měděný pásek ke kontaktu přivedena průchodem skrz vrstvu a připájena. Rozložení proudové hustoty je zde rovnoměrnější a tedy zatížitelnost mnohem větší.

Rozložení proudové hustoty v místě kontaktu bylo simulováno v programu Comsol Multiphysics. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obr.12. Vedení měděného pásku ke kontaktům pouzdra muselo být realizováno pomocí mikrokanálek vytvořených ve struktuře pouzdra. Tento způsob umožňuje využít spodní stranu pouzdra pro připevnění k chladiči a tím nedochází k zmenšení efektivní plochy pro chlazení. [15], [16].

- **Plocha pro upevnění chladiče**

Pro odvod tepla z čipu je určena spodní strana pouzdra, kde je pouze vytvořený otvor pro přístup optického signálu k čipu a dva otvory průměru 3 mm sloužící k upevnění chladiče.



Obr.13.: Pouzdro pro modulaci terahertzových vln s měděnými pásky pro připojení do elektrického obvodu.

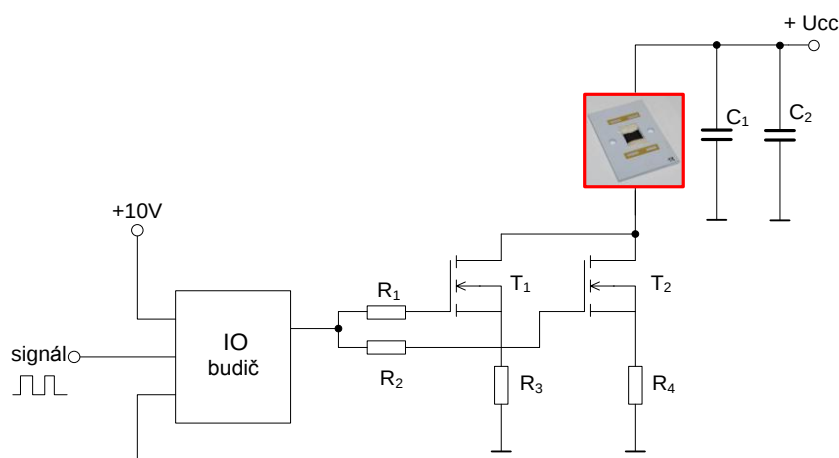
Pro odvod tepla z keramického pouzdra slouží vyrobený přípravek, s kterým byla struktura spojena pomocí tepelně vodivé silikonové pasty. Efektivita chlazení byla zjištěna

měření. Na obr.13 je uvedeno keramické pouzdro s vloženým čipem a měděnými pásky pro připojení do elektrického obvodu přípravku.

5.2.2 Přípravek pro testování modulátoru

Přípravek pro testování terahertzové mřížky se skládá z elektronické a mechanické části. Elektronická část obsahuje budič NCP 5181, který je napájený 12 volty a na který je přiváděn pulz s definovanou délkou, výškou a periodou. Výstup budiče je připojen na dvojici paralelně zapojených tranzistorů FET (IRFPC50), které umožňují spínat napětí 600 V a proud 11 A. Tyto parametry by měly být dostačující pro testování vlastností terahertzového modulátoru.

Kolektory tranzistoru jsou spojeny a přes THz modulátor připojeny na napájecí napětí zdroje. Kondenzátory C1, C2 připojené paralelně k napájecímu zdroji zajišťují rezervu náboje pro okamžik sepnutí. Odpory R3 a R4 slouží jako součást proudové ochrany spínačů FET. Schéma zapojení elektronické části pro měření na terahertzovém modulátoru je uvedeno na obr.14.



Obr.14.: Zapojení elektronické části modulátoru terahertzové mřížky.

Mechanická část přípravku byla vyrobena z desky plošného spoje (DPS), kde na horní straně byl připevněn pásek mědi o tloušťce 1 mm pro zlepšení tepelné vodivosti. Chlazení pásku je realizováno vodou, která protéká měděnou trubičkou o průměru 4 mm. Trubička byla ohnuta a připájena na kratších stranách pásku, což zajišťuje efektivní odvod tepla. Na pásek byla přiložena spodní strana keramického pouzdra potřená silikonovou pastou a přitlačena přes pružné kontakty.

Měřicí přípravek s modulátorem bude provozován ve vakuu, a z toho důvodu je nutné, aby odvod tepla byl co nejefektivnější. Spodní strana přípravku byla určena pro řídicí elektroniku modulátoru. V současném uspořádání, je možné uchladiť ztrátový výkon do 5 W. Tato skutečnost byla předpokládána podle výsledků, které byly získány při simulaci odvodu tepla z čipu v programu Comsol. Výsledek je zobrazen na obr.10.

Pro proud $I_c = 15 \text{ mA}$ (odpovídající proudové hustotě ve vodivém kanálu 1 kA cm^{-2}) a napětí na struktuře v rozmezí 100 V až 150 V, by maximální ztrátový výkon neměl být překročen. Při požadavku na větší proudy bude nutné pulzní napájení. Protože injekční schopnost oblastí P a N bude při velkých proudových hustotách omezená a tedy bude nutné výrazně zvětšit řídicí napětí struktury. Při použití dostatečného řídicího napětí lze však relativně velkých proudových hustot dosáhnout. Účinnost chlazení modulátoru pro terahertzové vlny bylo testováno v závislosti na napájecím napětí, šířce budícího pulzu a na jejich opakovacím kmitočtu.

Příklad okamžitých proudů v závislosti na řídicím napětí pro délku pulzu $5 \mu\text{s}$ je v tabulce Tab. 2. Při kmitočtu 10 kHz byla doba periody $100 \mu\text{s}$ a činitel plnění použitý pro stanovení středního ztrátového výkonu je 5 %.

Tab.2.: Závislost celkového proudu I_C , středního ztrátového výkonu P_S a teploty čipu T při použití vodního chlazení na řídicím / napájecím napětí U_{CC} ; $t_p = 5\mu s$, $f = 10\text{ kHz}$, činitel plnění pro výpočet středního výkonu je 5%.

$U_{CC} [V]$	90	150	210	240	270	300
$I_C [mA]$	140	200	280	320	320	320
$P_S [W]$	0,63	1,5	2,94	3,84	4,32	4,8
$T [^\circ C]$	31	50	69	86	95	114

Závislost oteplení čipu na šířce budících pulzů byla měřena pro $U_{CC} = 300\text{ V}$ a opakovacím kmitočtu $f = 10\text{ kHz}$. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab.3.

Tab.3.: Závislost teploty čipu $T [^\circ C]$ na šířce budících pulzů pro $f = 10\text{ kHz}$: $U_{CC} = 300\text{ V}$, $I_C = 320\text{ mA}$, $P_M = 96\text{ W}$

$t_{pulz} [\mu s]$	3	4	5	6	7	8
$P_{dstř} [\%]$	3	4	5	6	7	8
$P_S [W]$	2,88	3,84	4,8	5,76	6,73	7,68
$T [^\circ C]$	70	90	114	123	132	>150

Výsledky získané z měření ukázaly, že při prodloužení impulzu na $8\mu s$ došlo k přílišnému zahřátí čipu a měřící přípravek musel být okamžitě odpojen, aby nedošlo k jeho zničení. Dalším měřením byla zjišťována závislost oteplení na kmitočtu pro různé doby sepnutí.

Tab.4.: Závislost teploty čipu $T [^\circ C]$ na době sepnutí t_{pulz} a změně opakovacího kmitočtu v rozsahu v rozsahu 20 kHz až 65 kHz : $U_{CC} = 300\text{ V}$, $I_S = 320\text{ mA}$, $P_M = 96\text{ W}$

	délka pulzu $t_{pulz} = 3\mu s$; $P_M = 96\text{ W}$				
$f [\text{kHz}]$	20	25	30		
$t [\mu s]$	50	40	33		
$P_{dstř} [\%]$	6	7,5	9,1		
$P_S [W]$	5,7	7,2	8,7		
$T [^\circ C]$	130	133	147		
	délka pulzu $t_{pulz} = 2\mu s$; $P_M = 96\text{ W}$				
$f [\text{kHz}]$	30	35	40	45	50
$t [\mu s]$	33,3	28,6	25	22,2	20
$P_{dstř} [\%]$	6,1	7,0	8,0	9,0	10
$P_S [W]$	5,7	6,7	7,6	8,6	9,6
$T [^\circ C]$	100	125	140	145	>150
	délka pulzu $t_{pulz} = 1,5\mu s$; $P_M = 96\text{ W}$				
$f [\text{kHz}]$	40	50	55	60	65
$t [\mu s]$	25	20	18,8	16,6	15,4
$P_{dstř} [\%]$	6,0	7,5	8,2	9,0	9,7
$P_S [W]$	6,72	7,2	7,84	8,64	9,28
$T [^\circ C]$	91	111	136	130	>150

Tab.5.: Závislost teploty čipu na opakovacím kmitočtu pulsů při $t_{\text{pulzu}} = 400 \text{ ns}$; $P_M = 96 \text{ W}$, 30 W a $12,6 \text{ W}$; pro zachování srovnatelného středního výkonu při narůstání četnosti pulzů, byl pulzní výkon postupně snižován.

	Napětí $U_{cc} = 210 \text{ V}$; $P_M = 59 \text{ W}$				
f [kHz]	100	150	180	210	250
t [μs]	10	6,66	5,55	4,76	4,0
Pdstř [%]	4	6	7,2	8,4	10
P _s [W]	2,36	3,54	4,25	5,0	5,9
T [°C]	72	100	115	127	150
	Napětí $U_{cc} = 150 \text{ V}$; $P_M = 30 \text{ W}$				
f [kHz]	300	350	400	450	500
t [μs]	3,3	2,85	2,5	2,2	2,0
Pdstř [%]	12	14	16	18,2	20
P _s [W]	3,6	4,2	4,8	5,46	6,0
T [°C]	102	100	100	103	114
	Napětí $U_{cc} = 90 \text{ V}$; $P_M = 12,6 \text{ W}$				
f [kHz]	400	500	600	650	800
t [μs]	2,5	2,0	1,66	1,54	1,25
Pdstř [%]	16	20	24	26	32
P _s [W]	2,0	2,52	3,0	3,3	4,0
T [°C]	100	70	43	50	50

Při měření na terahertzové mřížce protékala chladícím systémem na přípravku voda o teplotě 20 °C a docházelo k chlazení keramického pouzdra čipu. Pro měření teploty na čipu, byl použit termočlánek s multimetrem UNI-T UT 72.

3.3. Generování ozónu

Při malých koncentracích ozónu, je syntéza ozónu velmi jednoduchý proces. Výtěžek ozónu je pouze měřítkem disociace kyslíkových molekul s aktivační energií přibližně $6,4 \text{ eV}$. Účinnost generace ozónu je většinou lepší při menších koncentracích (větší než 200 g/kWh), k poklesu dochází při zvýšení koncentrace nad 50 g/m^3 . Od této hodnoty koncentrace velmi záleží na uspořádání elektrodového systému, způsobu napájení výboje a na složení pracovního plynu.

U koplanárního výboje dochází ke generaci ozónu, podobně jako u povrchového výboje tzn. v těsné blízkosti povrchu dielektrického materiálu. U tohoto typu uspořádání elektrod se do značné míry projevuje vliv tvaru elektrod, výška kanálu pro proudění plynu nad výbojovým prostorem a vlastnosti dielektrika. Samozřejmě i složení pracovního plynu, v tomto případě se jednalo o vzduch. Elektrické pole roste se zmenšující se šířkou i vzdáleností elektrod roste při snižování těchto rozměrů i redukované elektrické pole. To znamená, že u koplanárního uspořádání elektrod, je možné dosáhnout hodnoty redukovaného elektrického pole 2x větší, než u klasických ozonizátorů. Elektrické pole je tedy možné regulovat šířkou a vzdáleností elektrod.

3.3.1. Volba tvaru a materiálu elektrod

V koplanárním uspořádání elektrod je na jednom nosném substrátu až několik párů elektrod. Jednotlivé výbojové elementy lze skládat paralelním řazením do libovolně velkých celků.

Výboj se vyskytuje u koplanárního uspořádání, mezi elektrodami a při zvýšení výkonu se rozšíří až do prostoru nad elektrodami. Pro konstrukci elektrodového systému jsou důležitými parametry napětí pro udržení výboje a redukované elektrické pole.

Velikost napětí potřebné pro výboj se mění podle:

- vzdálenosti elektrod
- tlaku
- použitým pracovním plynu
- typem dielektrického materiálu

Generace ozónu úzce souvisí s elektrodovým systémem, který lze různým způsobem modifikovat, pro dosažení optimálních parametrů a dlouhodobější generace.

3.3.2. Generátor ozónu v technologii LTCC

Výroba generátoru ozónu v technologii LTCC nabízí velmi dobrý způsob řešení. Při výrobě generátoru v této technologii lze velmi dobře uplatnit vlastností keramických materiálu (mechanická, elektrická, chemická odolnost) a možnost vytvářet hermeticky uzavřené 3D struktury. Tímto způsobem může být vyroben elektrodový systém, který je uzavřený mezi dvěma keramickými substráty. Dielektrikem v tomto případě bude elektrický substrát a elektrody umístěny uvnitř struktury budou tímto substrátem chráněny před silnými oxidačními účinky ozónu. Další výhodou je velmi dobrá tepelná vodivost nízkoteplotní keramiky, která zabraňuje vzniku tepelného průrazu.

Návrh generátoru pro výboj s dielektrickou bariérou:

- Elektrody – musely být navrženy a uspořádány podle požadavků na velikost zápalného napětí. Dále muselo být v návrhu počítáno s tím, že při laminaci dochází k mírnému rozšíření vodivé stopy.
- Umístění elektrod – má vliv na kvalitu a množství generovaného ozónu, ale hlavně na životnost elektrodového systému.

Generace ozónu v nízkoteplotní keramice je uvedena na obr.15. Z obrázku je patrné, že výboj hořel mezi elektrodami, kde byla největší intenzita, ale v podstatě hořel v celé ploše téměř rovnoměrně. Hodnota zápalného napětí byla 1,5 kV a je dána především tloušťkou keramického substrátu HL 2000, která je 100 μm .



Obr.15.: Generace ozónu v technologii LTCC.

Při generaci vlivem dobré tepelné vodivosti keramického substrátu docházelo k dobrému chlazení a lze tedy předpokládat, že výroba ozónu v tomto případě bude dlouhodobě efektivní. Experimentálně také bylo zjištěno, že výboj hořel z obou stran substrátu, což zvyšuje množství generovaného ozónu na dvojnásobek.

Generátor ozónu v technologii LTCC nabízí velmi dobré řešení z hlediska návrhu, konstrukce a nákladů na výrobu. Struktura pro generaci ozónu už pracuje nepřetržitě šestý měsíc. Výhodou tohoto systému je v tom, že nedochází k oteplování desky a ke změně elektrických parametrů. Dále jsou elektrody chráněny před velmi agresivním ozónem vrstvou keramického substrátu

3.3.3. Pro porovnání byl vytvořen generátor ozónu na korundu (Al_2O_3)

Klasické generátory ozónu jsou vytvořeny na korundové keramice, kde dielektrikem je korundový substrát a kde elektrody jsou vytvořeny na protilehlých stranách. V některých případech bývají nanесeny na jedné straně a jsou překryty izolačním materiálem. Pro porovnání byly vytvořeny všechny tři systémy. Korundový substrát byl použit o rozměrech 50 x 50 mm a tloušťce 0,215 mm. Na substrátu byl natištěn tlustovrstvou technologií motiv stejný jako v technologii LTCC.

Popis vyrobených vzorků pro porovnání z hlediska dielektrického materiálu:

- dielektrikum je korundový substrát
- dielektrikem je korundový substrát a elektrody jsou chráněny vrstvou
- dielektrikem je ochranná vrstva

Korundový substrát jako dielektrikum

V případě, že je dielektrikem substrát, tak elektrody jsou umístěny na protilehlých stranách substrátu. Výsledná hodnota zápalného napětí je dána tloušťkou keramického substrátu Al_2O_3 . Při tloušťce 0,215 mm byla zjištěna hodnota napětí 1,2 kV. Výboj hoří po celém povrchu, ale pouze na jedné straně substrátu nebo generace není příliš silná. Elektrody vytvořené tímto způsobem hodně degradují vlivem působení ozónu, a tím dochází k snížení životnosti celého systému.

Jako dielektrikum a současně ochrana elektrod byly použity dva druhy past:

- a) Ochranná skelná od firmy **ESL** s označením **4771 - P2**.
- b) Multivrstvová dielektrická od firmy **ESL** s označením **4905 - CandCH**.

Testování životnosti vytvořených elektrodových systémů

Vytvořené elektrodové systémy byly testovány z hlediska jejich životnosti při provozu. Pro měření bylo stanoveno, že musí dojít k rozvinutí výboje po celém povrchu vytvořeného systému. Měření bylo prováděno na všech vytvořených vzorcích. Nejnížší životnost měly elektrody bez povrchových úprav, pak následovaly s povrchovými úpravami a nejlepší byl systém vytvořený v technologii LTCC. Měření probíhalo po dobu 6 měsíců beze změny elektrických parametrů elektrodového systému. U komerčních systémů je tato doba kolem 1 – 2 měsíců.

Vytvořené elektrodové systémy byly testovány z hlediska délky provozu. Souhrn jednotlivých parametrů je uveden v Tab.6.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo v technologii LTCC, kde doba provozu byla zjištěna delší než 6 měsíců bez změny elektrických parametrů a množství generace. U komerčních systémů je tato doba téměř poloviční.

Tab.6.: Porovnání výsledků technologie LTCC s křemičitou izolační vrstvou.

vzorek	zapálení výboje Zv [kV]	životnost	kvalita generace
Dielektrikem Al ₂ O ₃ substrát	1,2	středně dlouhá	pouze kolem elektrod
Al ₂ O ₃ s ochrannou skelnou vrstvou	1,6	žádná	bez generace
Al ₂ O ₃ s křemičitou izolační vrstvou	2,7	středně dlouhá	na většině povrchu pouze z jedné strany substrátu
struktura LTCC	1,5	velmi dlouhá	na celém povrchu z obou stran substrátu

3.4. Planární obvodové prvky

V dnešní době roste poptávka po zařízeních malých rozměrů, ale velkých výkonů. V těchto zařízeních nacházejí uplatnění prvky s nízkou profilovou výškou pracující na vyšších kmitočtech. Další nespornou výhodou je, že jsou schopny pracovat i při teplotě 300 °C oproti tradičním součástkám, u kterých bývá maximální provozní teplota 150 °C. Typickým představitelem jsou planární cívky a transformátory. Při návrhu těchto obvodových prvků jsou využívány simulace, které umožňují vykreslit například rozložení elektrického potenciálu, nebo různé parazitní jevy uplatňující se při provozu. Na základě získaných výsledků lze provést optimalizaci návrhu.

Návrh planární cívky v technologii LTCC

Pro konstrukci planárních cívek a transformátoru byly navrženy dvě planární cívky s označení C1 a C2. Navržené cívky je možné vrstvit na sebe a tím dosáhnout velkého počtu závitů. Při návrhu byly respektovány parametry zajišťující kvalitní a reprodukovatelnou výrobu. Výsledkem jsou cívky o 10 závitů s šířkou vodiče a mezery 250 μm na konci opatřeny čtvercovou ploškou o velikosti 5 mm. Ukázka planárních cívek je uveden na obr.16.



Obr.16.: Planární cívky vyrobené v technologii LTCC vlevo C1 a vpravo C2.

3.4.1. Planární cívka 2D – statická analýza

Provedením statické analýzy pomocí simulačního programu Comsol byla zjištěna hodnota indukčnosti podle vzorce (1.9). Pro porovnání byl také proveden výpočet podle Wheelerova vzorce (1.1) a podle nedávno uveřejněného vzorce v publikaci od Jonsenser Zao (1.2). Simulované hodnoty indukčnosti se pohybovaly mezi hodnotami obou teoretických výpočtů.[14],[13]

Při simulaci byla použita cívka C_1 , stejná jako v případě testování vodivého motivu sítotiskem. Aby bylo možné vytvořit cívku s více závity, byla navržena cívka C_2 , která zajišťuje stejnou orientaci vinutí, jako v případě C_1 . Získané výsledky jsou uvedeny v tab.7.

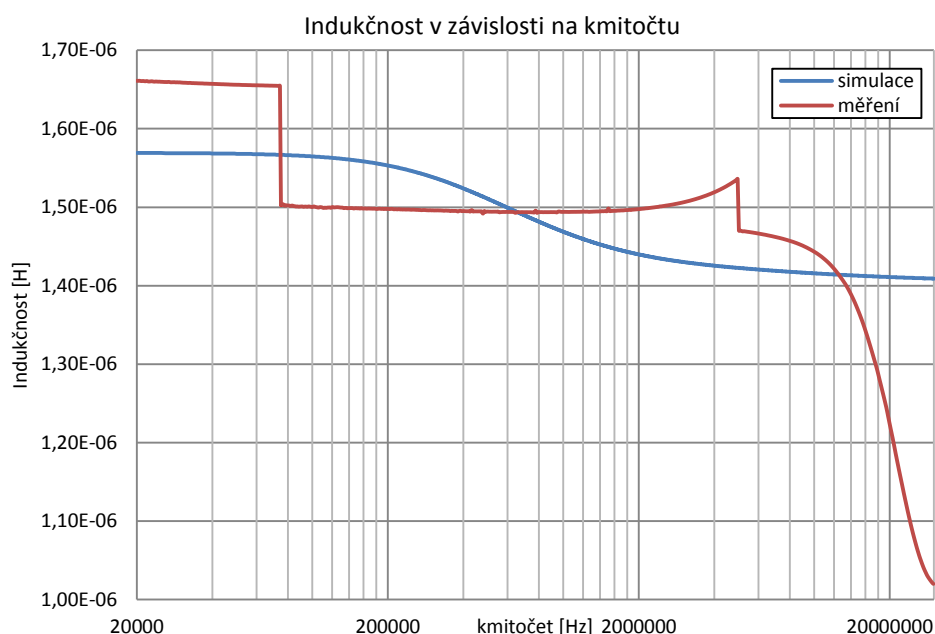
Tab.7.: Porovnání simulovaných a vypočítaných hodnot planárních cívek C_1 , C_2 .

	simulovaná v Comsolu [μH]	vypočítaná podle Weelera [μH]	vypočítaná podle Jonsenser Zhao [μH]
Indukčnost C_1	1,116	0,935	1.294
Indukčnost C_2	1,081	0,929	1.188

Zjištění hodnoty planární cívky třemi uvedenými způsoby poskytují rychlý a relativně přesný způsob řešení. Simulace indukčnosti pomocí statické analýzy v 2D zobrazení umožňuje výpočet, v kterém se neuplatňují žádné parazitní jevy. Z tohoto důvodu stačí pouze vhodné nastavení okrajových podmínek.

3.4.2. Planární cívka v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz

Statický výpočet planární cívky C_1 příliš nevypovídá o vlastnostech cívky, které se mohou měnit se změnou kmitočtu. Tyto změny se vyskytují jen v určitých kmitočtových pásmech, kde vnáší chybu do výsledku.



Obr.17.: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot planární cívky C_1 .

Hodnota indukčnosti v kmitočtovém rozsahu byla zjištěna použitím časově harmonické analýzy výpočtem z rozložení proudové hustoty v cívce. Aby bylo možné získané výsledky

porovnat, byla vytvořena planární cívka v technologii LTCC a byla změřena její indukčnost ve stejném kmitočtovém rozsahu. Měření bylo provedeno na RLC mostech Agilent v rozsazích 20 kHz – 2 MHz a 2 MHz – 30MHz. Pro porovnání byly výsledky ze simulace a měření vyneseny do jednoho grafu viz. Obr.17. Skoková změna hodnot indukčnosti při měření byla způsobena změnou rozsahu u RLC mostů.

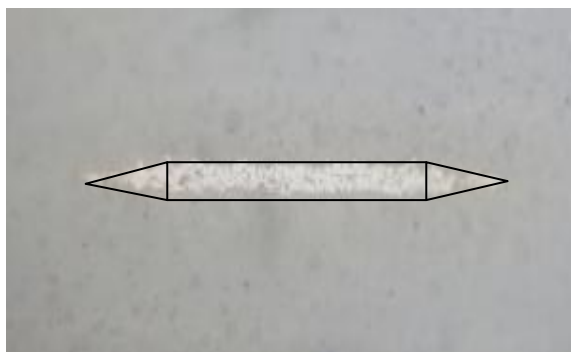
3.4.3. Skin a proximity efekt v planárních cívkách

Při průtoku střídavého proudu vznikají některé negativní jevy, které ovlivňují výsledné rozložení elektrického potenciálu uvnitř vodiče. Prvním jevem je skin efekt, který souvisí s vysokými kmitočty a lze ho pozorovat už u přímého vodiče. Druhým jevem je prokmitý efekt, nebo-li efekt blízkého pole, který vzniká už na nižších kmitočtech řádově jednotek kHz, pokračuje na vyšších a uplatňuje se především u vinutých prvků s větším počtem závitů.

Simulace skin efektu v planární cívce vyrobené v technologii LTCC

Vodiče v planární cívce vyrobené v technologii LTCC mají svůj specifický tvar. Je to dáno procesem výroby, kdy při laminaci dojde k protažení ostrých hran konců vodiče. S tím je nutné při návrhu počítat, protože tím dochází ke snížení vzdálenosti mezi jednotlivými závity a tedy k snížení elektrické pevnosti.

Přesné zjištění tvaru jednoho závitu bylo provedeno výbrusem ze struktury. Z výsledku je zřejmé, že působením tlaku při laminaci došlo k zvětšení šířky vodiče z 250 μm na 270 μm. Tloušťka závitu byla 15 μm, což odpovídá hodnotám uváděných v katalogových listech výrobce. Výsledný tvar zjištěný při výbrusu je na obr.18.



Obr.18.: Jeden závit planární cívky vyrobené v technologii LTCC v řezu (zjištěno výbrusem).

Hloubka vniku pro tři kovy (Cu, Au, Ag) byla vypočítána pro 5 hodnot kmitočtu. Pro porovnání byla provedena simulace v programovém prostředí Comsol Multiphysic v modulu AC Power Elektromagnetics. Tento model používá při řešení následující rovnici:

$$j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_r \mathbf{A} + \nabla \times \mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \mathbf{A} - \sigma \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A} = \frac{\sigma\Delta V}{L} + J_z^e \mathbf{e}_z, \quad (1.1)$$

kde ω je úhlový kmitočet

$\varepsilon_0, \varepsilon_r$ permitivita relativní

μ_0, μ_r permeabilita relativní

$\mathbf{A}$ vektor magnetického potenciálu

σ elektrická vodivost

∇ Laplaceův operátor

ΔV změna elektrického potenciálu
 J_z^e extreně generovaná proudová hustota v ose z
 e_z piezoelektrická vazba v ose z.
 v vektor.

Hodnoty hloubky vniku pro tři nejpoužívanější kovy jsou uvedeno v tab.8. Výsledky simulací a výpočtů se lišily v řádu desetin mikrometrů.

Tab.8.: Vybrané kmitočty a velikost hloubky vniku pro 1 závit planární cívky.

kmitočet [MHz]	0,020	0,2	2	20	30
$\delta_{\text{vypočítaná}} [\mu\text{m}]$ pro Ag	453,1	143,2	45,3	14,3	11,7
$\delta_{\text{simulovaná}} [\mu\text{m}]$ pro Ag	453,4	143,5	45,3	14,3	11,7
$\delta_{\text{vypočítaná}} [\mu\text{m}]$ pro Cu	466,8	147,7	46,7	14,8	12,1
$\delta_{\text{simulovaná}} [\mu\text{m}]$ pro Cu	466,3	147,4	46,6	14,7	12,0
$\delta_{\text{vypočítaná}} [\mu\text{m}]$ pro Au	526,3	166,4	52,6	16,6	13,6
$\delta_{\text{simulovaná}} [\mu\text{m}]$ pro Au	527,0	166,6	52,7	16,6	13,6

Hloubka vniku je zjišťována podle rozložení proudové hustoty ve vodiči, která byla u vytvořeného modelu jednoho závitu planární cívky vypočítána podle vzorce (1.2).

$$J_s = -\frac{I_{\text{cel}}}{O}, \quad (1.2)$$

I_{cel} popisuje celkový proud ve vodiči a O udává obvod průřezu vodiče v metrech.

Mnohem lepší vypovídající hodnotu má ztrátový výkon, který popisuje energii, která se přemění v teplo při provozu cívky na vyšších kmitočtech. Výpočet ztrátového výkonu vychází ze známého vzorce, kde odpor na metr je definován jako:

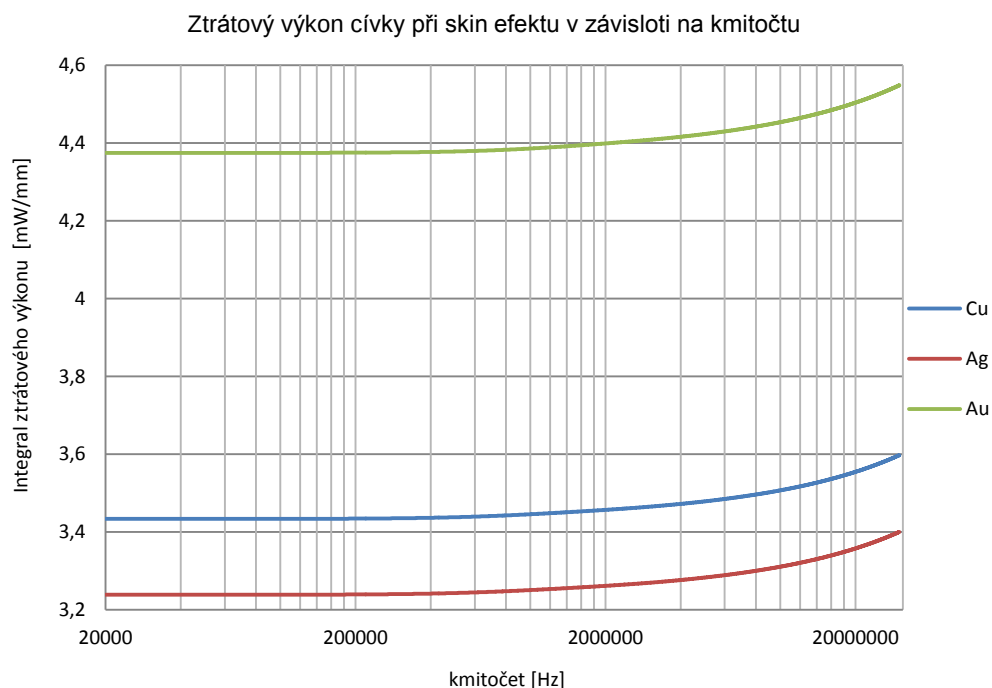
$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (1.3)$$

kde P je ztrátový výkon na metr a I je proud procházející vodičem. Z tohoto lze odvodit vzorce pro výpočet proudu:

$$I = J_z dA, \quad (1.4)$$

kde J_z je z-tová složka hustoty proudu, dA je změna magnetického potenciálu.

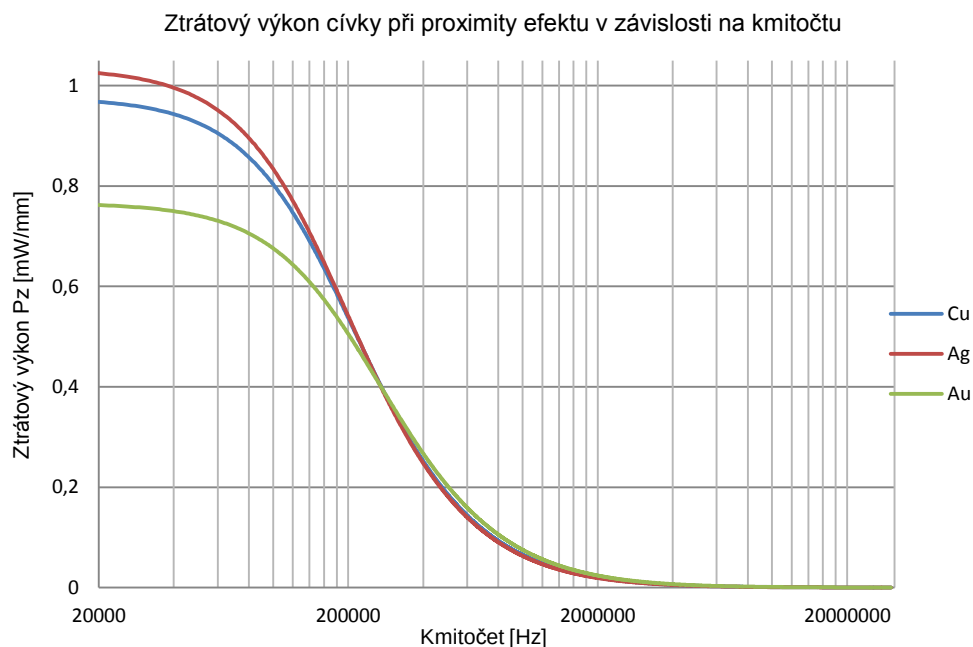
Pro výpočet ztrátového výkonu je mnohem vhodnější použití vzorce (1.4), protože celkový proud je součástí okrajových podmínek. Výsledek výpočtu ztrátového výkonu je na obr.19. Z výsledku je zřejmé, že největší hodnota byla pro zlato a nejmenší pro stříbro. Dále je zřejmé, že s rostoucím kmitočtem roste i hodnota ztrátového výkonu u všech materiálů.



Obr.19.: Ztrátový výkon planární cívky při skin efektu pro tři různé materiály (Au, Ag, Cu).

Simulace proximity efektu v planární cívce vyrobené v technologii LTCC

Simulace proximity efektu planární cívky byla provedena, jako rotačně symetrická, tzn. že byla simulována pouze pravá půlka cívky C_1 . V simulaci bylo zjištěno rozložení proudové hustoty, pomocí které byl vypočítán odpor na čtverec v jednotlivých závitech.



Obr.20.: Ztrátový výkon planární cívky při proximity efektu.

Bylo zjištěno, že nejmenší hodnota odporu je u závitů blíže ke středu cívky a směrem k okraji dochází k jeho nárůstu. Pro proximity efekt byl opět simulací zjištěn celkový ztrátový výkon cívky a výsledek je zobrazen na obr.20. Z obrázku je zřejmé, že největší ztrátový výkon vlivem proximity efektu byl na nižších kmitočtech u stříbra a s jeho nárůstem klesal. Nejmenší hodnota byla pozorována u zlata. Simulace byla provedena v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz. Pro zjištění jednotlivých parametrů bylo využito simulačního programu Comsol a teoretických vzorců.

V případě skin efektu bylo zjištěno:

- programem Comsol, rozložení proudové hustoty a hloubka vniku pro 5 hodnot kmitočtu
- výpočet hloubky vniku podle vzorce pro stejných 5 hodnot kmitočtu
- minimální odchylka výsledných hodnot simulace a výpočtu
- nejmenší hloubka vniku byla pro stříbro a největší pro zlato
- ztrátový výkon pro skin efekt zjištěný simulací:
 - největší pro zlato **4,4 mW / mm**
 - nejmenší pro stříbro **3,2 mW / mm**

V případě proximity efektu bylo zjištěno:

- uplatňuje se již při nízkém kmitočtu a především u vinutých prvků s větším počtem závitů
- hodnota odporu pro jednotlivé závity cívky pomocí simulace s využitím rotační symetrie byla:
 - nejmenší hodnota ve středu cívky **0,01 ohm / mm**
 - vzrůstala směrem k okraji na hodnotu **0,024 ohm / mm**
- ztrátový výkon pro skin efekt zjištěný simulací:
 - největší pro stříbro **1 mW / mm** při $f = 200$ kHz
 - nejmenší pro zlato **0,8 mW / mm** při $f = 200$ kHz

Ze získaných výsledků je zřejmé, že pro konstrukci vinutých prvků by bylo vhodné použít měď. Bohužel pro pásek HL 2000 výrobce měděnou pastu nevyrábí, z tohoto důvodu byla použita stříbrná pasta.

3.4.4. Planární cívka vyrobená v technologii LTCC

Při konstrukci planárního cívky tlustovrstvou technologií jsme rozměrově limitováni velikostí oka síta a viskozitou pasty. Pokud je motiv příliš jemný dochází v takovém případě k mezi závitovým zkratům při tisku nebo laminace, kdy dojde k malému rozšíření vodivého spoje a tedy k změně geometrických rozměrů. Rozšíření je způsobeno tlakem, kdy dochází k tzv. vlisování natištěného motivu do pásu. Tento negativní jev samozřejmě způsobí změnu elektrických parametrů cívky.

Vlastní kapacita vinutí planárních cívek

Jeden z parazitních jevů, který zhoršuje vlastnosti reálných cívek je vlastní kapacita vinutí, kterou je možné zjistit nepřímo. Na měřené cívce jsou provedena dvě měření s dvěma různými kapacitami, při kterých jsou zjištěny rezonanční kmitočty. Podle vzorce byla vypočítána hodnota vlastní kapacity vinutí:

Měření bylo prováděno na třech cívkách s různým počtem závitů. Základní cívka měla 10 závitů v jedné vrstvě. Další varianty jsou analogicky zvyšovány přidáváním dalších vrstev skládáním motivů cívek C_1 a C_2 . Vodivé propojení motivů cívek je realizováno vodivým propojením skrz pásek. Pro tisk planárních cívek byla použita stříbrná pasta TC 0307 a pro vodivé propojení skrz pásek TC 0308. Na povrchu byly vytvořeny plošky pájitelnou pastou TC 0306 pro připojení

měřících svorek. Měření kapacity bylo realizováno rezonanční metodou s použitím generátoru 33220A a osciloskopu DSO3102A od firmy Agilent.

Tab.9.: Závislost kapacity vinutí planární cívký na počtu závitů

počet závitů N [závitů]	počet vrstev	kapacita vinutí C_v [pF]	použitý motiv cívky
10	1	1,5	C_1
20	2	13,5	$C_1 + C_2$
40	4	58	$C_1+C_2+C_1+C_2$

3.4.5. Planární transformátor

Při výrobě tohoto typu transformátoru se využívají planární cívký, které jsou vytvářeny v několika vrstvách. Tento způsob umožňuje výrobu velmi jednoduché kompaktní konstrukce s velmi dobrými mechanickými a elektrickými vlastnostmi.

Planární vzduchový transformátor

Zajištění dostatečného přenosu energie z primární na sekundární cívký transformátoru, musí být tloušťka dielektrika mezi cívkami co nejmenší. Tím bude docházet k největšímu vzájemnému ovlivňování magneticky vázaných cívek. Tuto podmínku lze splnit v případě technologie LTCC, kde jeden pásek nízkoteplotní keramiky má tloušťku pouze 100 μm . Pak je mezi jednotlivými vinutími vytvořena těsná vazba. Řez planárním transformátorem o 20 závitěch primární a sekundární cívký vyrobeného v LTCC je na obr.21.



Obr.21.: Výbrus ze struktury planárního vzduchového transformátoru vyrobeného v technologii LTCC.

Vytvořená struktura se skládala ze 4 pásků, na kterých byly natištěny vodivou stříbrnou pastou TC0307 cívký (C_1 , C_2). Další 2 pásky pouze překrývaly a chránily vinutí cívek. Přechod mezi jednotlivými vrstvami byl realizován přes vodivé propojení skrz vrstvu (pasta TC0308). Na vrchních stranách struktury byly vytvořeny kontakty (pasta TC0306) pro připojení do obvodu.

Kapacita vinutí planárního transformátoru

Další ze základních parametrů hodnotící kvalitu transformátoru je kapacita mezi primární a sekundární cívkou. Při zjišťování kapacity lze vycházet z předpokladu, že jednotlivé závitě cívký jsou jako desky deskového kondenzátoru, kde dielektrikem je keramický substrát. Měření a simulace byla provedena na planárním transformátoru o 20 závitěch na primární a sekundární cívkě. Simulace kapacity byla provedena v programu Comsol Multiphysics v modulu AC / DC – elektrostatika.

Tab. 10.: Kapacita mezi primární a sekundární cívkou

kapacita	simulace	měření
prokládané vinutí C_{prok} [pF]	275,60	336,17
separované vinutí C_{sep} [pF]	107,51	82,89

Výsledky z měření na reálných vzorcích byly získány měřením na RLC metru Agilent E4980A 20 Hz – 2 MHz. Výsledky pro varianty s prokládaným a separovaným vinutím cívek je uvedeno v tab.10. Z výsledků je zřejmé, že u prokládaného vinutí je kapacita mezi vinutím primární a sekundární cívky o dvojnásobek větší, než u separovaného vinutí.

Simulované hodnoty se mírně lišily. Rozdíl získaných výsledku se mohl lišit nepřesností sesouhlasení jednotlivých vrstev a krytí vodivých motivů. Problém se souhlasení nejlépe vystihuje obr.21, z kterého je zřejmé, že jednotlivé závity nejsou umístěny přímo nad sebou, ale jsou mírně posunuty.

Elektrická pevnost planárního transformátoru

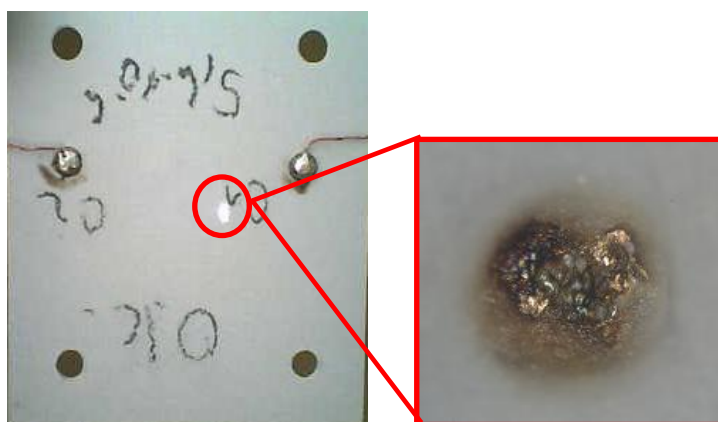
Pro detekci částečných výbojů byla použita amplitudová analýza, která patří v dnešní době mezi nejvíce používané. Vybavení pro tuto metodu se skládá z amplitudového detektoru, filtru, vyhlazovacích obvodu a obvodů pro zpracování signálu. Pro přesnost měření je důležitá kalibrace celého systému.

Pracoviště pro měření částečných výbojů bylo sestaveno z generátoru sinusového průběhu s regulací kmitočtu do 30 kHz, vysokonapětového transformátoru, zdroje stejnosměrného napětí a testovací komůrky, v které je umístěn vzorek pro měření. Testovací vzorky planárních transformátorů se skládá z 20 závitů primární a sekundární cívky, kde šířka vodiče a mezery byla 250 μm .

Umístění jednotlivých vinutí ve struktuře planárního transformátoru:

- prokládané vinutí
- separované vinutí

U obou vytvořených struktur bylo předpokládáno, že nejslabším místem pro vznik elektrického průrazu bude v okolí vodivého propojení skrz pásek.



Obr.22.: Ukázka vzniku elektrického průrazu v planárním transformátoru (vlevo) a optická inspekce povrchu v místě elektrického průrazu (vpravo).

Měření ovšem bylo zjištěno, že k degradaci dielektrika dochází, jak mezi vodivým propojením skrz pásek a nejbližším závitem cívky, tak i mezi jednotlivými závity. Výskyt částečných výbojů na planárním transformátoru byl pozorován na osciloskopu při napětí 1 kV.

Při zvyšování napětí nedošlo k průrazu v místě vodivého propojení skrz vrstvu, jak by se dalo předpokládat, ale v místě, kde jsou jednotlivé závity cívky. Tento výsledek může být způsobený tím, že jednotlivé závity cívky vytvořené vodivou pastou jsou do substrátu vtlačeny při procesu laminace a dochází tedy k zmenšení tloušťky dielektrika v tomto místě. Ukázka vzniku elektrického průrazu je na obr.22, kde jsou i zobrazeny kousky roztečeného kovu.

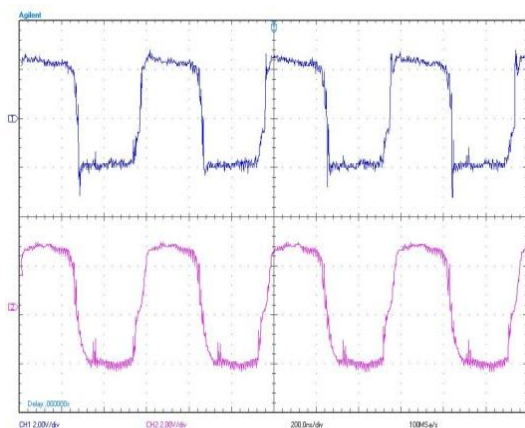
Přenos napětí na planárním transformátoru

Pro zjištění rozsahu pracovních kmitočtu planárního vzduchového transformátoru byl měřen průběh napětí na primárním a sekundárním vinutí planárního transformátoru. Na sekundární straně vinutí byla připojena zátěž o definovaném odporu $R_z = 1\Omega$. Měření bylo provedeno pomocí obdélníkového signálu s amplitudou 1 V v kmitočtovém rozsahu 20 kHz – 20 MHz. Magnetizační proud cívky rostl s časem. Pro delší periody signálu je nárůst magnetizačního proudu tak velký, že vlivem úbytku na vnitřním odporu generátoru klesne výstupní napětí generátoru k nule. Magnetizační proud se přitom omezí přibližně na hodnotu, která je dána podílem výstupního napětí generátoru na prázdko a jeho vnitřního odporu. Dále nenabývá vyšší hodnoty a výstupní napětí je nulové.

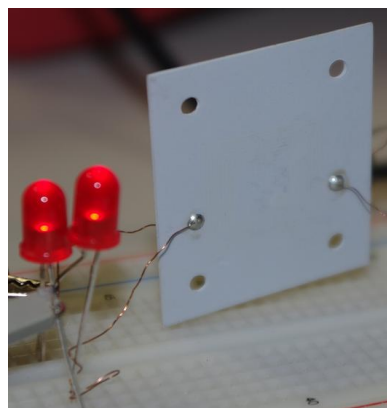
Jediným řešením jak dosáhnout obdélníkového signálu i při nízkém kmitočtu je použít proudové posílení. Magnetizační proud potom může dosáhnout relativně velké hodnoty. Pokud magnetizační proud lineárně poroste, bude na výstupu obdélníkový signál.

Obvod pro posílení proudu

Připojením cívky primárního vinutí k budiči signálu se většinou neobejde bez proudového posílení. To je dáno různými parazitními vlivy, které utlumí nebo jiným způsobem zkreslí vstupní signál.



A



B

Obr.23.: Měření na planárním transformátoru A) průběh signálu na primární a sekundární cívce, B) zatížený planární transformátor pomocí dvojice LED diod.

Proudové posílení lze řešit například vhodným spojením několika hradel integrovaného obvodu. Tímto způsobem bylo možné získat proudové zatížení do hodnoty 140 mA. Protože planární transformátor je složen z 20 závitů planární a sekundární cívky je poměr napětí roven 1 : 1 a ve stejném poměru budou i hodnoty napětí.

Na primární vinutí byl přiveden obdélníkový signál o amplitudě 2 V z obvodu proudového posílení, který je dále připojený ke generátoru. Průběhy signálů na transformátoru jsou uvedeny na obr.23A. Ve vstupním signálu (modrý) se v sestupné hraně objevil zákmit cca 100 ns, který je nejspíš způsobený komutací obvodu přes rozptylovou indukčnost. Stejný jev je možné pozorovat i v případě nástupné hrany, ale tento jev už není tak patrný.

Planární transformátor byl zatížen dvojicí led diod, které při kmitočtu 1,27 MHz svítily největší intenzitou. Lze tedy předpokládat, že při tomto kmitočtu pracuje transformátor s největší účinností. Transformátor se zapojenými LED je uveden na obr.23B.

6 Závěr

Náplní disertační práce bylo rozšíření poznatků a znalostí z oblasti nízkoteplotně vypalovaných substrátů, které mohou být využívány při konstrukcích planárních obvodových prvků, senzorů nebo keramických konstrukčních prvků. Tyto dílčí části mohou být integrovány do složitějších systémů, u kterých jsou kladeny vyšší nároky na spolehlivost, na možnost výroby struktur netradičních tvarů a různého konstrukčního uspořádání.

Hlavní cíle disertační práce jsou obsaženy v aplikačních možnostech technologie LTCC a to konkrétně ve vývoji keramických pouzder, konstrukci elektrodových systémů pro generaci ozónu, konstrukci tlakového senzoru a ve vývoji planárních obvodových prvků. Dosažené výsledky lze shrnout následujícím způsobem:

- 1) Vývoj a výroba keramického pouzdra pro modulátor terahertzových vln v rámci projektu AV ČR IAA100100907 „Aktivně laditelné materiály, struktury a metamateriály pro terahertzovou oblast.“ Při vývoji byly řešeny způsoby vytváření kontaktu z hlediska vyšší proudové zatížitelnosti a přístup optického signálu k horní i spodní straně čipu a jeho přilepení. Dále byly zkoumány různé způsoby propojení z hlediska proudové zatížitelnosti, možnosti snadného připojení a výměny. Pro optimalizaci dílčích částí návrhu keramického pouzdra bylo využito simulačního programu Comsol Multiphysics. Protože čip modulátoru bude provozována ve vakuu bylo nutné navrhnout efektivní chlazení. pro optimální provoz mřížky. Účinnost chlazení celého modulátoru byla testována na vytvořeném přípravku v závislosti na napájecím napětí, šířce budicího pulzu a na jejich opakovacím kmitočtu. Vytvořené pouzdro je původním výsledkem této disertační práce, osvědčilo se v aplikaci a je velmi dobře použitelné pro pouzdření výkonových čipů.
- 2) Vývoj a výroba elektrodového systému pro výboje s dielektrickou bariérou a ověření jeho funkčnosti při použití jako generátor ozónu. Pro výboj s dielektrickou bariérou, který se využívá pro generaci ozónu, byl vytvořen elektrodový systém na klasické korundové keramice a v technologii LTCC. Ochranu elektrod na korundových substrátech zajišťovala dielektrická vrstva vytvořená sítotiskem pomocí dvou různých past. Vytvořené elektrodové systémy byly testovány z hlediska délky provozu a množství generovaného ozónu. Nejlepší výsledky poskytla technologie LTCC, kde byla účinnost generace největší. Tento systém také zaručuje podstatně větší životnost než srovnatelné standardní systémy. Při analýze povrchu tohoto elektrodového systému po nepřetržité době provozu delší než 6 měsíců nebyly zjištěny žádné podstatné změny. Účinnost generace ozónu se prakticky nezměnila. Další možnou aplikací jsou plazmatické reaktory nebo světelné generátory s excimerovými výboji. Navržený elektrodový systém je původním výsledkem této disertační práce.
- 3) Při vývoji a výrobě tlakového senzoru byly ověřeny technologické procesy pro výroby dutin s definovanými rozměry jako původní výsledek disertační práce. Pro ověření byl proveden návrh senzoru tlaku s různým uspořádáním elektrodového systému a způsobu jeho vytvoření. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo u senzoru, který měl elektrody vytvořeny pomocí vakuového napařování. Naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky simulací. Senzor tlaku, vyrobený touto inovovanou technologií (LTCC) je možné použít pro měření tlaků do hodnoty 200 kPa.
- 4) Vývoj různých aplikací planárních obvodových prvků v technologii LTCC. V této části disertační práce bylo rozpracováno konstrukční řešení planárních cívek a planárních transformátorů jako původní výsledek disertační práce. Vlastnosti vyrobených planárních cívek byly ověřovány měřením a simulacemi. Výsledná hodnota indukčnosti byla zjištěna pomocí časově harmonické analýzy výpočtem z rozložení proudové hustoty ve vinutí cívky. Výsledek simulací byl ověřen měřením na reálném vzorku. Simulace parazitních jevů, které

se mohou vyskytnout ve vinutí planárních cívek, byla provedena v programovém prostředí Comsol. Simulace skin efektu a proximity efektu byla provedena pro nejpoužívanější materiály stříbro, zlato a měď.

Vytvoření vzduchového planárního transformátoru ukazuje další možnosti aplikace technologie LTCC - v tomto případě vytváření vodivého motivu uvnitř struktury. Transformátor byl vyroben ve dvou verzích lišících se umístěním jednotlivých vinutí (prokládané / separované). Pro měření izolačních vlastností takto zhotoveného transformátoru byla využita metoda měření částečných výbojů. Při testování bylo zjištěno, že průraz nastal mezi závity primární a sekundární cívky při napětí 1 kV. Tato hodnota byla experimentálně zjištěna pro dva typy transformátorů s prokládaným a separovaným vinutím. Protože se jednalo o vzduchové transformátory, byl minimální pracovní kmitočet poměrně vysoký. Optimální pracovní kmitočet byl experimentálně ověřen a byl přibližně 1,3 MHz. Další experimenty budou prováděny s feromagnetickými pásky LTCC, kde lze očekávat snížení optimálního pracovního kmitočtu do oblasti několika set kHz. Tyto výsledky by mohly být zajímavé pro jejich využití v oblasti spínaných zdrojů – měniče.

Pro zajištění úspěšných aplikací LTCC technologie bylo nutné na ústavu mikroelektroniky vytvořit pracoviště pro práci s tímto typem technologie. Bylo rozšířeno stávající vybavení o an-axiální lis a upraven stůl sítotiskového stroje. Na vytvořeném pracovišti byly testovány jednotlivé výrobní procesy, u kterých byly zjišťovány optimální parametry, nebo hledány nové technologické způsoby řešení. Kvalita jednotlivých technologických kroků výroby 3D struktury v technologii LTCC byla posuzována měřením. V některých případech pro porovnání výsledků byl využit simulační program Comsol Multiphysics.

Jednotlivé aplikace řešené v disertační práci lze nadále rozvíjet. Může se jednat například o integraci mikrokanálku pro chlazení v případě keramického pouzdra, optimalizovat rozmístění elektrod ve struktuře pro zvýšení účinnosti generace ozónu, vytvořit senzor tlaku s diferenčním systémem, nebo vytvořit planární transformátor s využitím feromagnetických pásek.

Seznam literatury

- [1] GOLONKA, L. J., Technology and applications of Low Temperature Cofred Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 54, no. 2, pp. 221-231, 2006.
- [2] "LTCC introduction", [online], [cit.10.8.2011] dostupné na WWW: www.ltcc.de.
- [3] Pietriková, A.; Somora, M., *Vývojové trendy materiálov pre hrubé vrstvy*, Košice, 1998. ISBN 80-7099-316-2.
- [4] *Heraeus Thick Film* 2011 LTCC Materials [online], [cit.10.2.2011] dostupné na WWW: http://www.heraeusthickfilm.com/en/productsapplications/ltccmaterials/ltcc_materials_1.aspx
- [5] LEE, Y-S., Principles of terahertz science and technology. Springer, 2009, ISBN 978-0-387-09539-4
- [6] FRANK, H.; ŠNEJDAR, V., Principy a vlastnosti polovodičových součástek, SNTL Praha 1976
- [7] KOCH, T.; RICHLING, W.; WHITLOCK, J.; HALL, D., "A Bond Failure Mechanism", Proceedings of IEEE IRPS, 1986, pp. 55- 60.
- [8] MUSIL, V.; BOUŠEK, J.; MACHÁČEK, M.; VOVES, J. Návrh mřížkové struktury s modulací vodivosti pro terahertzové vlny. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelettronických systémech a nanotechnologiích*. Brno: Novpress, 2010. s. 86-110. ISBN: 978-80-214-4229- 0.
- [9] ROSA, EDWARD, B., "Calculation of the self-inductances of single-layer coils," Bulletin of the Bureau of Standards, Volume 2, No. 2, 1906, pg 161, <http://bit.ly/9YpeeX>.
- [10] ZHAO, J., *Electronic News* [online]. 2010 A new calculation for designing multilayer planar spiral inductors, [online], [cit.15.8.2011] dostupné na WWW: http://www.edn.com/article/509901A_new_calculation_for_designing_multilayer_planar_spiral_inductors.php.
- [11] VITRIOL, W.A. and POND, R.G., "Custom packaging in a thick film house using low temperature cofired multilayer ceramic technology," *Proceedings of Proceedings of the 1984 International Symposium on Microelectronics*, Int. Soc. Hybrid Microelectron, 1984, pp. 268-271.
- [12] PETERSON, K.A.; WALKER, C.A.; PATEL, K.D.; TURNER, T.S., Microsystem Integration with New Techniques in LTCC. in *IMAPS Ceramic Interconnect Technology Conference. 2004. Denver*.
- [13] O'REILLY, S.; FLANNERY, J.; O'DONNELL, T.; MUDDIMAN, A.; HEALY, G.; BYRNE, M. L., O MATHUNA, S. C.; DUFFY, M.; HURLEY, G., *A comparative analysis of interconnection technologies for integrated multilayer inductors*, Microelectronics International, vol. 15, no. 1, pp. 6/10, 1998
- [13] SERGENT, J. E.; and HARPER, C. A.; (editors), Hybrid Microelectronics Handbook, McGraw-Hill, Inc., second edition, New York, Chapter 1 & 3, 1995.

- [14] CHAI, L.; SHAIKH, A.; STYGAR, V.; JANEZIC, M.; GEYER, R.; HOLLOWAY, C.; STARR, T. and PAULSON, D., "Characterization of LTCC Material System at Microwave Frequencies", *IMAPS Advanced Technology Workshop: Ceramic for Microwave*, March 26-27, 2001, Denver.
- [15] GREENHOUSE, H. M., "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", *IEEE Transactions On Parts, Hybrids, and Packaging*, vol. PHP-10, No. 2, pp.101-109, June.1974.
- [16] GONGORA-RUBIO, M. R.; ESPINOZA-VALLEJOS, P.; SOLA - LAGUNA, L.; SANTIAGO-AVILÉS, J. J.; "Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST)", *Sensors and Actuators A* 89, pp. 222-241, 2001.

Autorovi publikace

- [1] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Interconnection In 3D Structure. In *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2008 proceedings*. Vysoké učení technické v brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Ondráčkova 105, 628 00 Brno, 2008. s. 261-264. ISBN: 978-80-214-3717-3.
- [2] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Sintering Low Temperature Co-fired Ceramics. In *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2008 proceedings*. Vysoké učení technické v brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Ondráčkova 105, 628 00 Brno, 2008. s. 251-254. ISBN: 978-80-214-3717-3.
- [3] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Bonding in 3D structure. In *Reliability and Life - time prediction Abstract Proceedings*. 2008. Hungary, 1191 Budapest, Vak Bottyán u.30- 32: Printinghouse Ltd, 2008. s. 246-247. ISBN: 978-963-06-4915- 5.
- [4] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. *Bonding in 3D structure*. Budapest, Hungary: Budapest, Hungary, 2008. s. 246-247.
- [5] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Spojení tenkých vrstev s keramikou nízkých teplot. In *Sborník příspěvků konference Zvuile 2008*. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií: Vysoké Učení Technické v Brně, 2008. s. 99-102. ISBN: 978-80-214-3709-8.
- [6] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Vapour deposition on LTCC for 3D structure. *Electronics*, 2008, roč. 2008, č. 1, s. 115-120. ISSN: 1313-1842.
- [7] KOSINA, P.; ADÁMEK, M.; ŠANDERA, J. Micro-channel in LTCC. *Electronics*, 2008, roč. 2008, č. 1, s. 109-114. ISSN: 1313-1842.
- [8] KOSINA, P.; HUBÁLEK, J. Micro-flow Systems created in the LTCC. In *IX. Pracovní setkání Fyzikálních chemiků a elektrochemiků*. Mendlova zemědělská a lesnická universita v Brně: 2009. s. 82-83. ISBN: 978-80-7375-309-2.

- [9] KOSINA, P.; HÁJKOVÁ, L.; ŠANDERA, J.; SYMERSKÝ, T. The Capacitive sensor. In *ISSE 2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*. 2009. Brno, Česká republika: Novpress s.r.o., 2009. s. 1-4. ISBN: 978-1-4244-4260- 7.
- [10] KOSINA, P.; ŠANDERA, J.; BLÁHA, V. Inductance sensor for measurement of the metal materials. In *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2008 proceedings*. 1. Vysoké učení technické v brně, Antonínská 548/1, 602 00 Brno: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Ondráčkova 105, 628 00 Brno, 2009. s. 13-19. ISBN: 978-80-214-3933- 7.
- [11] KOSINA, P.; ŠANDERA, J.; HEJÁTKOVÁ, E. Perspektiva LTCC technologie. *Bulletin of SMT/ISHM Int. Conference "New Trends in Microelectronics"*, 2009, roč. 2009, č. 64, s. 4-5. ISSN: 1211- 6947.
- [12] KOSINA, P.; HÁJKOVÁ, L.; ŠANDERA, J. Reaktor pro analýzu a míchání kapalin. In *Sborník příspěvků konference Králíky 2009*. Brno: MJ servis s.r.o., Božetěchova 133, 2009. s. 145-148. ISBN: 978-80-214-3938- 2.
- [13] KOSINA, P.; ŘEZNÍČEK, M.; ŠVECOVÁ, O.; SYMERSKÝ, T. Senzor průtoku v technologii LTCC. In *Mikrosyn. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích*. 1. Brno 2010: Novpress, 2010. s. 44-49. ISBN: 978-80-214-4229- 0.
- [14] KOSINA, P.; ŘEZNÍČEK, M.; ŠANDERA, J.; SYMERSKÝ, T. Thermodynamic flow sensor. In *Proceeding of 8th international conference*. 1. BUT, Ústav Radioelektroniky: Tiskárna Atom, Ltd., Chuchelna 254, Semily, 2010. s. 72-75. ISBN: 978-80-214-4139- 2.
- [15] KOSINA, P.; ZAPLETAL, P.; ŘEZNÍČEK, M. Thermodynamic Sensor System. *Bulletin of SMT/ISHM Int. Conference "New Trends in Microelectronics"*, 2010, roč. 2010, č. 67, s. 25-26. ISSN: 1211- 6947.
- [20] KOSINA, P.; BOUŠEK, J.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J. 3D- LTCC struktura pro pouzdření modulátoru terahertzových vln. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích*. Brno: Novpress, 2012. s. 50-55. ISBN: 978-80-214-4405- 8.
- [22] KOSINA, P.; MIKULÍK, P.; MUSIL, V.; BOUŠEK, J.; PROKOP, R. Spínaná mřížková struktura pro modulaci terahertzových vln. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích*. Brno: Novpress, 2012. s. 44-49. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

Curriculum Vitae

Name: Petr Kosina

Born: July 12st 1982 in Brno

Contact: xkosin03@stud.feec.vutbr.cz

Education

2002 – 2005 **Brno University of technology / Department of Radio Electronics**

Bachelor study of Electronics and Communication
State exam passed in June 2005
Bachelor thesis Digital filtering of MR signal by use of Wavelet transform

2005 – 2007 **Brno University of technology / Department of Radio Electronics**

Master study of Electronics and Wireless Communication
State exam passed in June 2007
Diploma thesis Data interpreter of television teletext signal

2007 – 2011 **Brno University of technology / Department of Microelectronics**

Doctoral study of Microelectronics and Technology
Doctoral thesis Planar circuits elements on Low Temperature Co-fired Ceramic

Languages

English, German, French

Other activities

He is interested in: reading books, traveling, sports and history.