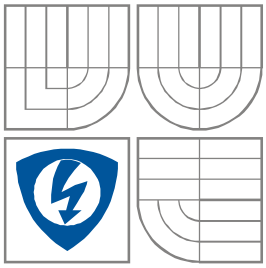


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Petr Kosina
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO, 2012

## Abstrakt

Předložená práce se zabývá návrhem a výrobou 3D struktur v technologii LTCC (Low Temperatue 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 prvku, 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 Temperatue 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.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma "Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu" jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 7. července 2012 _____

*autor práce*

## Bibliografická citace

Kosina, P. *Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu*. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012. 88 stran, 6 příloh.

# Poděkování

Práce na téma "Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu" vznikla výhradně v prostorách školy Vysokého učení technického v Brně, Ústavu mikroelektroniky, kde bylo využito bohaté zázemí výzkumných pracovišť laboratoří. Tímto bych chtěl velmi poděkovat:

- Svému vedoucímu Doc. Ing. Josefu Šanderovi, Ph.D. za zajištění potřebného materiálového vybavení pro práci s technologii LTCC.
- Prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za cennou pomoc při experimentech, měření a vyhodnocení, včetně velmi cenných rad během realizace disertační práce.
- Prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi, který umožnil práci s programem Comsol Multiphysics.

- Ing. Martinu Buršíkovi za kontaktování čipu a pomoc při řešené mechanických částí vytvořených přípravků.
- Ing. Michalu Řezníčkovi za analýzu vzorku rentgenovou fluorescenční spektroskopii a cenné rady v oblasti technologie tlustých vrstev.
- Ing. Editě Hejátkové za cenné rady v oblasti lepení čipů a jejich vsazování do pouzder.
- Doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za pořízení lisu a porézního kamene.
- Ing. Michalu Nicákovi za zajištění materiálu pro výrobu laminační šablony.

- Ing. Janě Jílkové Ph.D. za cenné rady při simulacích v programovém prostředí Comsol Multiphysics.

- Svému dědečkovi Zdeňku Karáskovi za pomoc při realizaci přípravku pro měření THz modulátoru.

Tato práce vznikla za podpory grantových projektů:

- MIKROSYN Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích, MŠM 0021630503.
- Aplikace moderních montážních technologií a materiálů v elektrotechnickém průmyslu, FR-TI1/072.
- Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů, FEKT-S-11-5/962.
- Integrované 3D vícevrstvé struktury a pouzdra s vnořenými (embedded) součástkami, FEKT-S-10-18.
- AV ČR IAA100100907, Aktivně laditelné materiály, struktury a metamateriály pro terahertzovou oblast.

# Seznam zkratek

| | |
|---|---|
| 2D, 3D | dvou dimensionální zobrazení, tří dimensionální zobrazení nebo struktura |
| AC | označení střídavého signálu |
| DC | označení stejnosměrného signálu |
| $Al_2O_3$ | oxid hlinitý (v této práci ve formě korundu) |
| BGA | označení typu pouzdra pro povrchovou montáž (*Ball Grid Area*) |
| CNC | číslicové řízení počítačem (*Computer Numeric Control*) |
| ČV | částečné výboje |
| DPS | deska plošného spoje |
| FR4 | označení desek vyrobené ze samozhášivé tvrzené skelné tkaniny (*Flame Retardant*) |
| HIO | hybridní integrovaný obvod |
| KJ | kulové jiskřiště |
| LTCC | nízkoteplotně vypalovaná keramika (*Low Temperature Cofired Ceramics*) |
| MKP | metoda konečných prvků |
| Nd:Yag | neodym yttrito-hlinitý granát |
| PDR | parciální diferenciální rovnice |
| RFS | rentgenová fluorescenční spektroskopie |
| $SiO_2$ | chemická značka pro oxid křemičitý – silikáte sklo. |
| TFT | technologie tlustých vrstev (*Thick Film Technology*) |

# Seznam symbolů

| | |
|---|---|
| $\omega$ | úhlový kmitočet |
| $\nabla$ | nabla – Laplaceův operátor |
| $\partial^2 u$ | druhá derivace podle napětí |
| $\partial^2 t$ | druhá derivace podle času |
| $\rho$ | měrný odpor |
| $\sigma$ | elektrická vodivost |
| $\delta$ | hloubka vniku |
| $\pi$ | matematická konstanta (Ludolfovo číslo) |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | vektory posunutí |
| $\mu_0$ | permeabilita vakua |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua |
| $\omega_r$ | rezonanční úhlový kmitočet |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita |
| $V$ | elektrický potenciál |
| $A$ | magnetický potenciál |
| $\boldsymbol{d_a}$ | matice |
| $B$ | magnetický tok |
| $C$ | kapacita kondenzátoru |
| $C_1$ | konstanta číslo jedna |
| $C_{prok}$ | kapacita prokládaného vinutí cívek |
| $C_{sep}$ | kapacita separovaného vinutí cívek |
| $C_v$ | vazební kapacita |
| $D$ | elektrické posunutí |
| $d$ | vzdálenost |
| $d\phi$ | změna magnetického indukčního toku |
| $D_{AVG}$ | průměr cívky |
| $D_{in}$ | vnitřní průměr cívky |
| $D_{out}$ | vnější průměr cívky |
| $dt$ | derivace podle času, změna za čas |
| $E_p$ | průrazné napětí |

| | |
|---|---|
| $J_z$ | zetová složka proudové hustoty |
| $f_r$ | rezonanční kmitočet |
| $G$ | vodivost |
| $h$ | výška |
| $H$ | magnetické pole |
| $I_{cel}$ | celkový proud |
| $I_{ef}$ | efektivní hodnota proudu |
| $I_{mag}$ | magnetizační proud |
| $I_{max}$ | maximální proud |
| $j$ | označuje imaginární složku |
| $J_s$ | hustota napětí |
| $k$ | konstanta úměrnosti |
| $l$ | délka |
| $L$ | indukčnost |
| $M_{vz}$ | vzájemná indukčnost |
| $M$ | magnetický vektor |
| $M_{mol}$ | hmotnost molekuly |
| $N,n$ | počet závitů cívky |
| $N_v$ | počet odpařených částic |
| $O$ | obvod vodiče |
| $P$ | elektrický polarizační vektor |
| $p$ | tlak |
| $Pd_{stř}$ | výkonová střída signálu |
| $Q_{napr}$ | $Q$ jakost obvodu |
| $R$ | elektrický odpor |
| $S$ | plocha |
| $t$ | čas |
| $t_l$ | tloušťka vodiče |
| $T$ | teplota |
| $u(t)$ | okamžitá hodnota napětí v čase t |
| $u_i$ | okamžitá hodnota indukovaného napětí |
| $U_i$ | indukované napětí |
| $U_{vst}$ | vstupní hodnota napětí |
| $U_{výst}$ | výstupní hodnota napětí |
| $X_M$ | magnetická reaktance |

| | |
|---|---|
| $X_{roz}$ | rozptylová reaktance |
| $Z$ | impedance |
| Zv | zápalné napětí |

# Obsah


**1. Úvod** **2**

**2. Rozbor současného stavu** **3**

*2.1 Technologie LTCC* *4*

2.1.1 Popis výroby struktury v technologii LTCC 4

*2.2 Vakuové procesy* *10*

2.2.1 Výpal ve vakuu a v inertní atmosféře 10

*2.3. Planární obvodové prvky* *11*

2.3.1 Výpočet indukčnosti planárních cívek 11

2.3.2 Jevy vznikající při průchodu střídavého proudu cívkou 13

*2.4 Výboj s dielektrickou bariérou* *15*

2.4.1 Částečné výboje 15

*2.5 Modelování v program COMSOL Multiphysics* *19*

2.5.1 Metoda konečných prvků 20

2.5.2 AC / DC modul 22

**3. Cíle disertace** **23**

**4. Technologie LTCC na Ústavu mikroelektroniky** **26**

*4.2 Obrábění pásku* *26*
*4.3 Výroba vodivého propojení* *28*
*4.3 Výroba vodivého motivu* *32*
*4.4 Laminace* *36*
*4.5 Výpal* *41*

**5. Realizované aplikace** **48**

*5.1 Senzor tlaku* *48*

5.1.1 Simulace senzoru tlaku 50

5.1.2 Měření senzoru tlaku 52

*5.2 Pouzdro pro čip modulátoru terahertzových vln* *52*

5.2.2 Přípravek pro testování modulátoru 59

*5.3 Elektrodový systém pro výboj s dielektrickou barierou* *63*

5.3.1 Generování ozónu 63

5.3.2 Vlivy a děje působící na výslednou produkci ozónu 63

5.3.3 Volba tvaru a materiálu elektrod 64

5.3.4 Generátor ozónu v technologii LTCC 64

5.3.5 Pro porovnání byl vytvořen generátor ozónu na korundu ($Al_2O_3$) 65

*5.4 Planární obvodové prvky* *69*

5.4.1 Planární cívka 2D – statická analýza 70
5.4.3 Planární cívka v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz 71
5.4.2 Skin a proximity efekt v planárních cívkách 73
5.4.4 Planární cívka vyrobená v technologii LTCC 78
5.5.1 Planární transformátor 79
5.5.2 Kapacita vinutí planárního transformátoru 80
5.5.3 Elektrická pevnost planárního transformátoru 81
5.5.4 Přenos napětí na planárním transformátoru 83
5.5.5 Obvod pro posílení proudu 85

**6 Závěr 87**

**7 Seznam obrázků 89**

**8 Seznam tabulek 91**

**9 Seznam Literatury 92**

**Přílohy 99**

# 1. 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 pásky, 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 systému 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 elektrodových systémů pro různé druhy elektrických výbojů.

# 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 [11], [13].

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
- pouzdření
- 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.

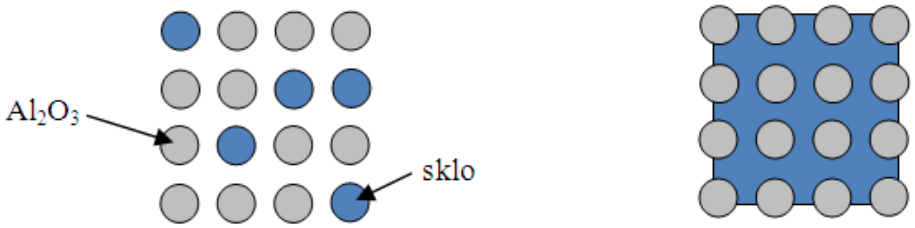
Struktury nízkoteplotní keramiky jsou vyráběny v rozměrech řádu centimetrů a velkého počtu vrstev (až 100 pásku). Velké úsilí je věnováno snížením šířky vodivé stopy a vytváření odporových past, které budou s nízkoteplotně vypalovanou keramikou kompatibilní. V současné době také probíhá výzkum vytváření 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 $^0$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 [28].

Nízká teplota výpalu je dána složením pásku (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 skla) 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 surovém a ve vytvrzeném stavu je na obr.1. [16].




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

Množství jednotlivých částic prvků obsažených v pásku, 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.

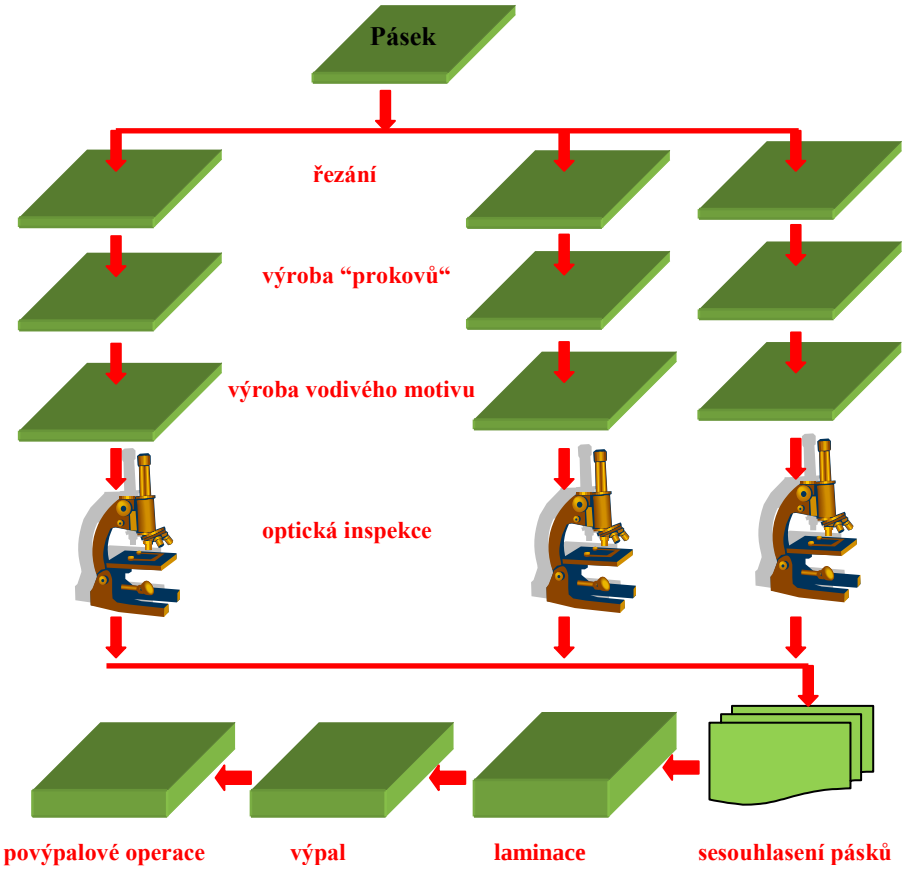
Úlohou pojivové složky je pouze zajistit spojení oxidu křemičitého a korundu v surovém stavu. Tato složka ovšem zajišťuje i jeho flexibilitu a měkkost, kterou lze využít při vytváření struktur různých tvarů.

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 [76].

### 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. Řezaní 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 velikosti řezného nástroje.

Způsoby vytváření děr a dutin:

- *Razicím nástrojem* – Tento způsob nezajišťuje příliš velkou variabilitu vyřezávaných tvarů. Kvalita hran je nižší. Při protlačení nástroje dochází v místě vniku nástroje k zaoblení hran, na opačné straně vlivem střihu hran nástroje vznikne otřep. Jedná se o jednodušší způsob řešení z hlediska požadavku na zařízení. Minimální velikost tvaru je dána velikostí razícího nástroje. Forma může obsahovat více otvorů, tím je možné provádět hromadnější výrobu za velmi krátkou dobu a nízkou cenu.
- *CNC strojem* – Tato možnost obrábění nabízí nepřeberné množství různě komplikovaných tvarů, vhodných pro speciální aplikace. Závisí to především

na obslužném softwaru zařízení. Nevýhodou je opět špatná ostrost hran, ale navíc dochází k znečišťování výrobního prostředí zbytky pásku po řezání. Minimální rozměr je dán velikostí řezacího nástroje.

- *Laserem* – Jedná se o nejlepší způsob řešení, ale z hlediska požadavku na zařízení patří mezi náročnější. Množství vyřezávaných tvarů je závislé především na obslužném softwaru, variabilita tvarů může být tedy značná. Kvalita hran je velmi dobrá a při řezu nevzniká žádný odpad. U řezání substrátu větší tloušťky dochází k mírnému zkosení hran, které souvisí s fokusací paprsku a jeho intenzitou. Uprostřed je intenzita největší a postupně klesá s rostoucí hloubkou vniku paprsku do substrátu. Obecně proti mechanickému obrábění je rozdíl velikosti řezné stopy značný. U laseru je velikost stopy dána typem použitého laseru, optikou a vzdáleností řezné hlavy od substrátu.

**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 [16].

**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 stolu pomocí vakua přes porézní kámen, aby nedošlo k poškození pásku 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.

Materiálový 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 ≤ 2 mΩ.

**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 ≤ 10mΩ.

**C:** Stříbrná pasta pro vnitřní signálové spoje. Tloušťka vrstvy je v rozsahu 15 – 21 μm a hodnota odporu na čtverec se uvádí ≤ 2 mΩ.

**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*).

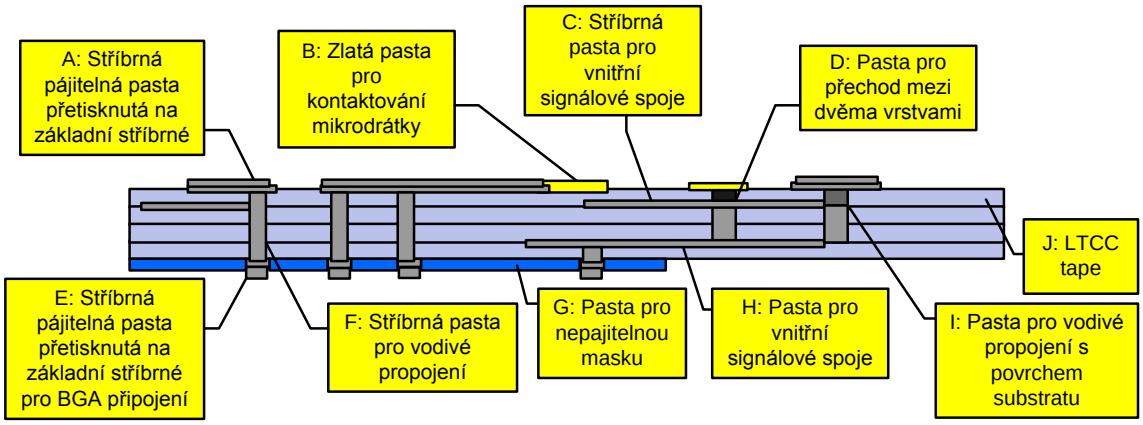
**F:** Stříbrná pasta určena pro vytváření vodivého propojení ve vnějších vrstvách.

**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.

**I:** Stříbrná pasta určená pro vytváření vodivého propojení z vnitřní vrstvy na povrch struktury.

**J:** LTCC dielektrický pásek určité tloušťky, která se liší podle typu a výrobce pásku.

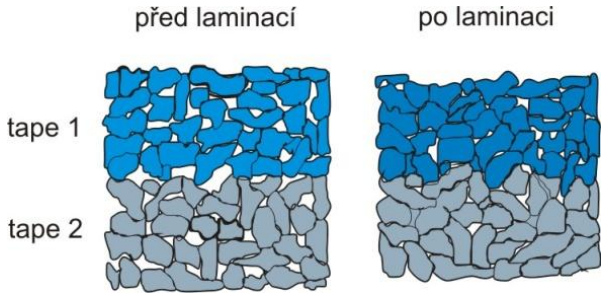
Použití jednotlivých past ve struktuře je ukázána na obr.3.




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

## Laminace

Při vytváření multivrstvové obvodové struktury, vstupuje nový technologický proces, který bývá označován jako *laminace*. Jedná se o proces, kde jsou jednotlivé pásky s vytvořeným motivem pokládány na sebe a sesouhlaseny pomocí technologických otvorů. Následně dochází za současného působení tlaku (2100 N/cm) a teploty (70 $^{0}$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 [76].

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 ostrosti 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.

Typ laminace z hlediska počtu laminačních cyklů:

- *Jednorázová laminace* – jedná se o laminaci celé struktury v jednom kroku. Nelze použít v případě většího množství dutin, protože by mohlo dojít k jejich zborcení. Také není možné použít při laminaci více pásku, než 20.
- *Postupná laminace* – v tomto případě jsou laminovány dílčí části struktury a následně jsou tyto části laminovány v jeden celek - výslednou strukturu. Tento způsob je velmi vhodný, pokud struktura obsahuje velké množství dutin nebo dutinu o velké ploše. U postupné laminace nedochází k velkým deformacím jak v případě jednorázové laminace a je možné vytvářet struktury s větším počtem pásků.

Typ laminace z hlediska teploty:

- *Teplotní* – současně působí tlak i teplota (70 $^0$C). Jedná o základní způsob laminace, uváděný výrobcem v katalogových listech.
- *Za studena* – působí pouze tlak, při pokojové teplotě (25 $^0$C) za využití látky, která naruší povrch pásku například naleptáním [1].

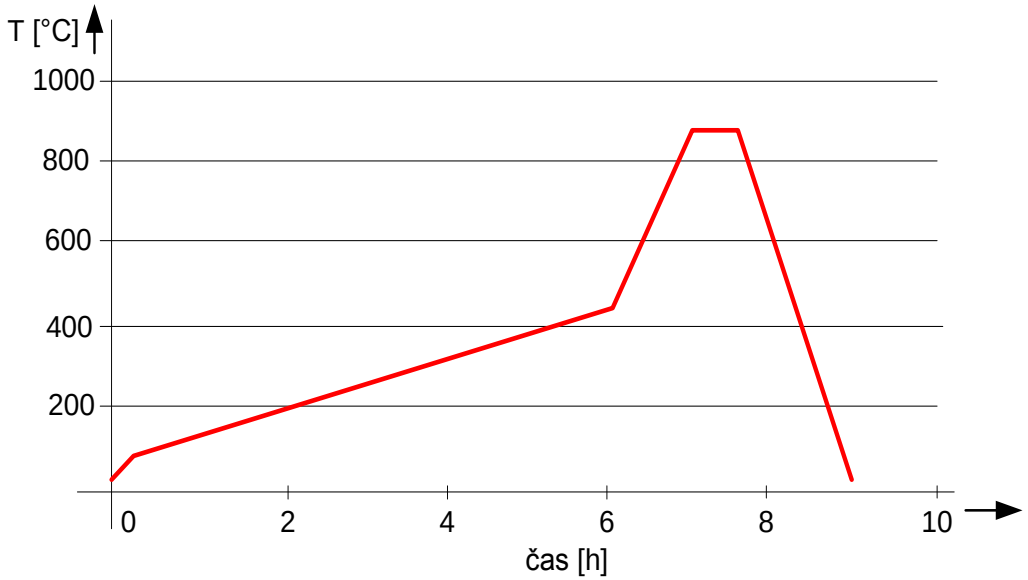
V této dílčí části bylo zmíněno několik způsobu laminace. Každý z nich skýtá určité možnosti a závisí pouze na vhodnosti použití dané metody, aby výroba struktury byla ve výsledku co nejkvalitnější a do značné míry reprodukovatelná.

## 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.

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.




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

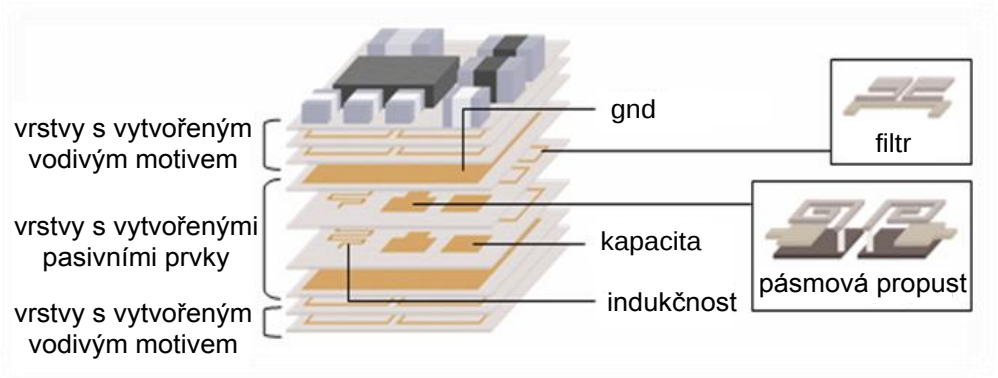
U substrátu s nulovou smrštivostí je to 32% v ose z (tloušťka substrátu) a v ose x, y pouze 0,2 – 0,5 %. Tato vlastnost, jak bývá uváděno v katalogových listech od výrobce, je dána technologií výroby, obsahem organického pojiva a výskytu stopového množství jiných chemických prvků v složení pásku. Při návrhu struktury je nutné s tímto parametrem počítat a zahrnout jej do celkového návrhu. Pro názornost je uvedena smrštivost vybraných substrátů v tab.1. [32]

**Tab. 1.:** Parametry smrštivosti vybraných typů substrátů.

| Výrobce LTCC | Označení pásku | Tloušťka před výpalem [μm] | Smrštivost pásku v ose [%] | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **x a y** | **z** |
| **Heraeus** | CT 700 | 130, 200, 300 | 14,4 | 14,9 |
| **Heraeus** | CT 701 | 50, 130, 200, 300 | 15,7 | 16,1 |
| **Heraeus** | CT 800 | 125 | 14,1 | 30 |
| **Heraeus** | HL 800 | 130 | 0,5 | 32 |
| **Heraeus** | HL 2000 | 135 | 0,2 | 32 |
| **CeramTEC** | CT320AG | 320 | 21,0 | 18,0 |

**Povýpalové operace**

Na závěr celého technologického procesu výroby struktury, dochází k dělení jednotlivých částí substrátu, pájení součástek na povrchu, lepení a kontaktování čipů. Ukázka multivtrstvové obvodové struktury vyrobené v technologii LTCC je uvedena na obr.6.




**Obr. 6.:** Multivrstvová obvodová struktura v technologii LTCC. [12]

## 2.2 Vakuové procesy

Některé technologické procesy se neobejdou bez vakua. Ve vakuu nedochází k nežádoucím oxidacím nebo chemickým reakcím. V některých případech se využívají plyny, jako například argon nebo dusík, které vytvářejí inertní atmosféru.

Pro pájení a výpal se většinou využívá hrubé vakuum. Vytváření různých vrstev naopak vyžaduje jemné až extrémně vysokém vakuum. Hodnoty vakua a střední volné dráhy částic je uvedeno v tab.2.

**Tab. 2.:** Stupně vakua s vybranými parametry

| stupeň vakua | tlak v Pa | počet molekul na $cm^3$ |
|---|---|---|
| hrubé vakuum | $10^{+4}…10^{+2}$ | $10^{19}…10^{16}$ |
| jemné vakuum | $10^{+2}…10^{-1}$ | $10^{16}…10^{13}$ |
| vysoké vakuum | $10^{-1}…10^{-5}$ | $10^{13}…10^{9}$ |
| ultravysoké vakuum | $10^{-5}…10^{-10}$ | $10^{9}…10^{4}$ |
| extrémně vysoké vakuum | $< 10^{-10}$ | $< 10^{4}$ |

### 2.2.1 Výpal ve vakuu a v inertní atmosféře

Při výpalu některých materiálů nelze použít klasickou vzduchovou atmosféru, protože dochází k nežádoucí oxidaci, změně mechanických, elektrických vlastností a struktury materiálu. Z těchto důvodu se používá výpal buď ve vakuu, nebo v inertní atmosféře, kde se využívají plyny jako argon a dusík. Pro tyto typy výpalu jsou na trhu speciální pece, ve kterých pomocí rotační olejové vývěvy dochází k vyčerpání vzduchu z prostoru pece, kde je umístěn vzorek pro výpal.

Postup při výpalu v inertní atmosféře:

1. umístění vzorku do prostoru pece a uzavření
2. vyčerpání zbytku vzduchu z prostoru pece
3. napuštění prostoru pece inertním plynem
4. pro čistotu procesu jsou minimálně 3-krát zopakovány body 2 a 3
5. poslední naplnění inertním plynem je realizováno s menším přetlakem
6. následuje spuštění pece s nastaveným teplotním profilem

## 2.3. Planární obvodové prvky

Patří mezi zvláštní typy obvodových prvků, které se vyznačují nízkou profilovou výškou. Nacházejí uplatnění především na vyšších kmitočtech, kde hrají podstatnou roli rozměry obvodového prvku. Pod pojmem planární obvodové prvky si lze představit kondenzátory, odpory a vinuté prvky (cívky, tlumivky, transformátory). Nejčastěji se používají cívky, protože vynikají svými velmi dobrými vlastnostmi ve spínaných zdrojích, kterými jsou velmi malé rozměry, ale velké výkony.

Transformátory, tlumivky a cívky vyrobené tlustovrstvou technologii využívají pracovního kmitočtu v oblasti desítek MHz, dosahují však měrného výkonu 16 W / $cm^3$. Při jejich výrobě se využívají planární cívky, které jsou vytvářeny v několika vrstvách. Při jejich konstrukci musí být zohledněn průměr vodiče vzhledem k povrchovému jevu, který se bude uplatňovat. Uvádí se, že průměr vodiče nebo tloušťka pásku by měla být větší než trojnásobek hloubky vniku [24].

S rostoucím kmitočtem se tedy snižuje hloubka vniku, a tím se zvyšuje odpor vodiče. Ten se samozřejmě i zvyšuje při oteplování závitů cívky vlivem provozu, nebo jeho okolí. Zatímco u napáječů malých výkonů je potřeba na jeden volt několik závitu, je u transformátorů spínaných zdrojů na několik voltů potřeba pouze jeden závit. To zvyšuje požadavky na izolaci a tuto skutečnost komplikuje fakt, že vinutí jsou často jednovrstvá.

Elektrická pevnost mezi primární a sekundární cívkou bývá předepisována 2,5 kV a pro bezpečnostní nebo oddělovací transformátory je tato hodnota až 4 kV. Průřezy vodičů se volí podle jejich přípustných oteplení, které jsou určeny efektivní hodnotou proudu, která může být zjištěna měřením. Průřez spojů se tedy určí podle přípustných úbytků napětí.

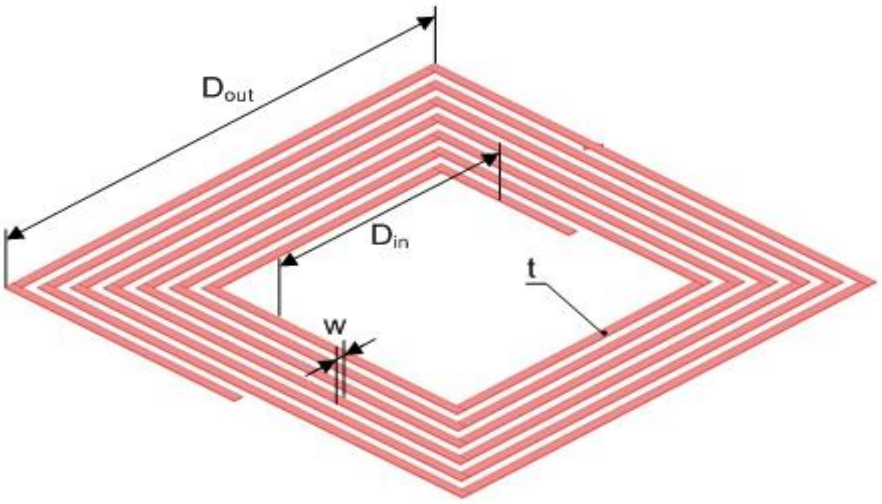
### 2.3.1 Výpočet indukčnosti planárních cívek

Výpočet indukčnosti planárních cívek je velmi složitá problematika. Většina uvedených vzorců poskytuje pouze přibližné hodnoty indukčnosti. Pro výpočet indukčnosti planárních cívek můžeme vycházet ze známého Weelerova vzorce, který je vyjádřen následující rovnicí [2], [14]:

$$L = \frac{a^2 n^2}{8a+11c\ 25{,}4} \quad \mu H\ , \tag{1.1}$$

kde a udává průměrný rádius / velikost spirály ($D_{out}$), *n* je počet závitů a *c* je vnější rozměr mínus vnitřní rozměr ($D_{out}$ - $D_{in}$). Rozměry spirály jsou ve vzorci uvedeny v centimetrech.

Uvedené vzorce platí pouze pro cívky čtvercového tvaru. Všechny popisované parametry jsou pro názornost popsány na obr.7.




**Obr. 7.:** Popis parametrů cívky pro výpočet indukčnosti.

Mnohem přesnější výsledky výpočtu lze dosáhnout podle nedávno zveřejněné publikace od čínského vývojového designera pro telekomunikační aplikace Jonsensera Zhaa. Jeho vzorec umožňuje vypočítat výsledek indukčnosti planární cívky s relativně velkou přesností [15]:

$$L = \mu_0 N^2 D_{AVG} C_1 \ /2 \quad \ln \frac{C_2}{\rho} + C_3\rho + C_4\rho^2 \ , \tag{1.2}$$

kde N je počet závitů, $\mu_0$ permeablilta vakua a C konstanty pro daný typ cívky jsou uvedeny v tab.4.

**Tab. 3.:** Tabulka koeficientu pro vypočet planární čtvercové cívky

| koeficient | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|---|---|---|---|---|
| hodnota | 1,27 | 2,07 | 0.18 | 0.13 |

Dále je ve vzorci uveden střední rozměr cívky $D_{AVG}$ a plnicí poměr $\rho$, které jsou popsány následujícími rovnicemi:

$$D_{AVG} = \frac{D_{IN}+D_{OUT}}{2} \tag{1.3}$$

$$\rho = \frac{D_{OUT}-D_{IN}}{D_{OUT}+D_{IN}} \tag{1.4}$$

Parametry $D_{out}$ a $D_{in}$ jsou uvedeny na obr.7.

Výpočet indukčnosti planárních cívek je velmi složitá problematika, proto vzorce pro jejich výpočet ve většině případů poskytují pouze přibližné hodnoty, které je nutné ověřit měřením. Největší chyby výpočtu jsou v případech, kdy planární cívka je vytvořena ve více vrstvách.

### 2.3.2 Jevy vznikající při průchodu střídavého proudu cívkou

Při průchodu střídavého proudu cívkou vznikají v jednotlivých vinutích různé parazitní jevy, které ovlivňují jejich výsledné vlastnosti. Tyto jevy způsobují snížení jakosti obvodu, ale hlavně nárůst výkonových ztrát, které způsobují nárůst teploty. Jakékoliv namáhání izolace velkou intenzitou elektrického pole snižuje životnost izolantu. Z těchto důvodů byly provedeny simulace, které mohou poskytnout přibližnou představu o tom, co se děje s napětími a rozložením elektrického a magnetického pole ve vinutých prvcích na vyšších kmitočtech.

**Povrchový jev**

Elektrický povrchový jev ve vodiči, je fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Vlivem průchodu střídavého elektrického proudu vodičem, dochází k vytváření magnetického indukčního toku v místě a okolo vodiče. Určitá část jim prochází a způsobuje vytváření vířivých proudů, které mají blíže ke středu vodiče, ale opačný směr než směr procházejícího proudu. Tím dochází k jejich odčítaní.

V případě povrchu mají tyto vířivé proudy souhlasný směr se směrem průchodu proudu, a tedy dochází k jejich sčítání. Povrchový jev se neuplatňuje při průchodu stejnosměrného proudu vodičem a do kmitočtu 20kHz bývá zanedbatelný. Vlivem povrchového jevu se zvyšuje také odpor vodiče [25].

Celkově lze říci, že skin efekt je tím větší, čím je větší:

- kmitočet proudu
- průřez vodiče
- vodivost materiálu vodiče
- relativní permeabilita materiálu, z kterého je vodič vyroben

Elektrický povrchový jev je hodnocen hloubkou vniku $\delta$. Hloubka vniku je tloušťka, v které proudová hustota klesne na 1 / e proudové hustoty na povrchu vodiče. Hloubka vniku je dána vztahem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}}, \tag{1.5}$$

kde $\omega$ je kmitočet, $\mu_0\mu_r$ je permeabilita a $\sigma$ elektrická vodivost.

V případě tlustovrstvé technologie jsou používány ušlechtilé kovy, které se vyznačují velkou elektrickou vodivostí a paramagnetickými vlastnostmi u kterých se uvádí $\mu_r\mu_0=1.26\ 10^{-6}$ H/m. Rezistivita a vodivost vybraných kovů je uvedena v tab.4.

**Tab. 4.:** Elektrické vlastnosti vybraných kovů

| Kov | $\sigma$ [$10^6$S/m] | $\rho$ [$10^{-8}\Omega$m] |
|---|---|---|
| stříbro | 61,6 | 1,629 |
| zlato | 45,6 | 2,35 |
| měď | 58,1 | 1,75 |

**Jev blízkosti**

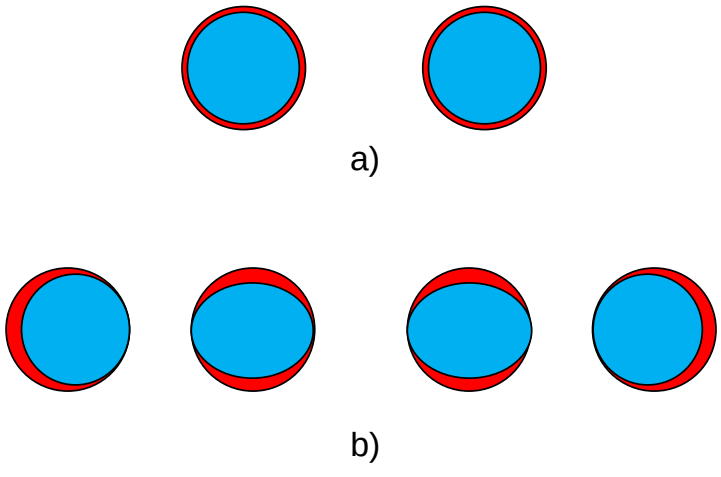
Kromě skin efektu se na vyšších kmitočtech také uplatňuje, převážně u vinutých prvků s větším počtem závitů, proximity efekt. U tohoto efektu proud neteče rovnoměrně rozmístěný po obvodu vodiče, ale více teče v průřezu drátu a blíže k okraji cívky.

Tento jev je způsoben tím, že magnetické pole vodiče působí na protékající proud v okolních vodičích, a tedy závitech cívky. Vlivem průchodu proudu jen částí vodiče se zvyšuje jeho odpor, a tím dochází k zvýšení ztrát a snížení jakosti, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Q = \frac{2\pi f L}{R}, \tag{1.6}$$

kde $2\pi f$ udává uhlový kmitočet, $L$ indukčnost a $R$ odpor vodiče.

Zatímco skin efekt lze pozorovat u přímého vodiče až od kmitočtu 100 kHz, proxmity efekt je možné pozorovat u vinutých prvků s větším počtem závitu již od kmitočtu 1 kHz. Rozložení proudové hustoty pro skin a proximity efekt je zobrazeno na obr.8. [25], [23].




**Obr. 8.:** Průtok proudu vlivem a) skin efektu b) vlivem proximity efektu.

## 2.4 Výboj s dielektrickou bariérou

Výboj s dielektrickou bariérou nastává v elektrodovém systému, je-li v něm zastoupena minimálně jedna vrstva izolačního materiálu a mezera je vyplněná plynem nebo směsí plynů. Přiložené napětí musí být dostatečně velké, aby došlo k elektrickému průrazu v mezeře.

Pokud je průrazné napětí vrstvy dielektrika mnohem větší než napětí, při kterém dojde k průrazu plynu v mezeře, vrstvy dielektrika se po rozvinutí průrazu nabije a brání v pokračování výboje.

Pro další pokračování je nezbytně nutná změna napětí na elektrodách. Toho lze dosáhnout dalším zvýšením napětí nebo lépe, změnou jeho polarity.

V této práci bude výboj s dielektrickou bariérou použit pro:

1. testování kvality 3D struktur
2. testování izolační pevnosti
3. aplikace struktur LTCC pro generování výboje s dielektrickou bariérou, pro přípravu nízkoteplotního plazmatu s možnými aplikacemi pro ozonizaci, čištění a úpravu povrchu, spalování odpadu

### 2.4.1 Částečné výboje

Jsou zvláštní a nechtěnou formou elektrického výboje s dielektrickou bariérou, z tohoto důvodu se také sledují a jejich diagnostika je v dnešní době velmi propracovaná. Jedná se o lokální elektrický výboj, který částečně přemosťuje izolaci mezi dvěma vodiči a který se může, ale nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání na povrchu nebo uvnitř izolace.

Výboje se objevují jako impulzy s dobou trvání řádově menší než 1μs. Kromě těchto krátkých impulzů se také mohou vyskytnout plynulejší formy výbojů svým mechanizmem připomínající doutnavý výboj.

Částečné výboje jsou velmi často doprovázeny vyzařováním zvuku, světla, tepla a různými chemickými reakcemi.

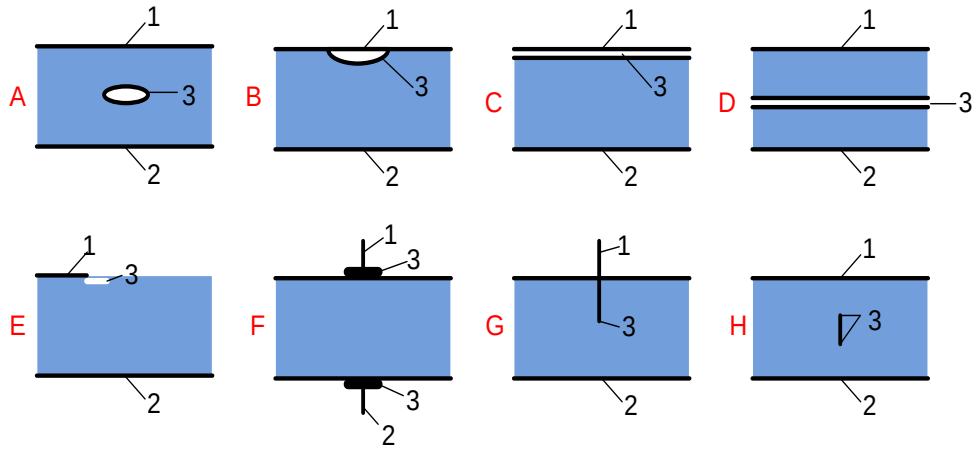
Elektrická odezva částečných výbojů

Jedná se o proudový nebo napěťový impuls, vznikající v důsledku přítomnosti částečného výboje objevující se ve zkoušeném objektu. Impuls může být měřen pomocí vhodných detekčních obvodů, které mohou být včleněny do zkušebního elektrického obvodu pro účel zkoušky.

Rozdělení částečných výbojů:

- vnější částečné výboje – vyskytují se v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, mohou to být například: doutnavé nebo korónové výboje a Trichelovy impulsy atd.
- vnitřní částečné výboje – tento typ výbojů se objevuje v plynech, které jsou obklopeny pevným nebo kapalným dielektrikem. Mohou to být například výboje v plynných dutinkách pevného dielektrika
- povrchové částečné výboje – jsou výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Typickým představitelem jsou klouzavé výboje

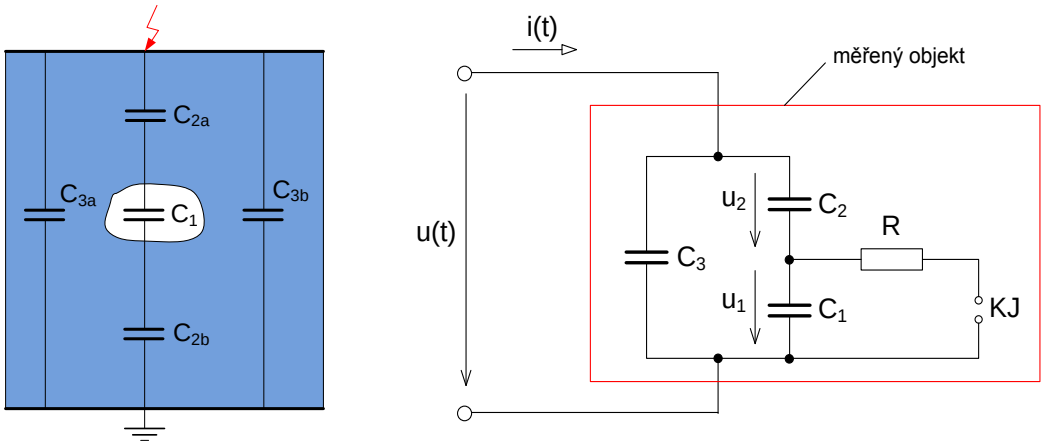
Typické rozmístění elektrod na kterých lze částečné výboje na povrchu a uvnitř modelovat je na obr.10. Kde čísla 1, 2 označují elektrody a 3 výskyt částečného výboje a vzduchových bublin [21].




**Obr. 9.:** Elektrodové uspořádání pro modelování částečných výbojů v izolantech.[18]

**A:** v izolaci
**B**: pod elektrodou
**C** a **D**: mezi dvěma vodivými plochami oddělenými dielektrikem
**E** a **F**: povrchové (klouzavé) výboje
**G**: rozhraní jehlová elektroda – izolant
**H**: rozhraní jehlová elektroda – pevný či kapalný izolant

Model a náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje ukazuje obr.11. Kapacita plynové dutinky je $C_1$, $C_2$ je kapacita zbývající zdravé části izolace v sérii s dutinkou a $C_3$ je velká kapacita celého dielektrika.




**Obr. 10.:** Rozmístěný jednotlivých kapacit uvnitř dielektrika vlevo a náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje vpravo (Gemantův model).[18]

Kulové jiskřiště zapojené paralelně ke kapacitě plynové dutinky symbolizuje v náhradním obvodu přeskok ve vzduchové bublince při překročení meze elektrické pevnosti. Odpor R nahrazuje odpor výbojové cesty po přeskoku na kulovém jiskřišti

(KJ). Vzhledem k tomu, že tyto děje probíhají ve velmi malých prostorách uvnitř dielektrika, bude tedy jeho trvání v řádu jednotek ns. Jestliže na svorkách měřeného objektu je přiložené střídavé napětí u(t) a pokud by nedošlo k přeskoku v dutině (kulovém jiskřišti), je průběh napětí $u_{10}(t)$ na kondenzátoru $C_1$ (kapacitě plynové dutiny) vyjádřen vztahem [61]:

$$u_{10}\ t\ = \frac{C_2}{C_1+C_2} u\ t \tag{6.10}$$

Všechny druhy částečných výbojů mají destruktivní účinky na izolační systém. Tyto účinky mohou být [20]:

- **elektrické** – vznikne-li v dutince elektrický oblouk je pravděpodobným následkem vznik vodivé dráhy. Při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace v daném místě způsobit čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může postupně šířit dielektrikem. Ničivé působení vyvíjí také ionty a elektrony, které dopadají na stěny dutiny.
- **erozivní** – výbojem v dielektriku, zejména dopadáním iontu a elektronů na stěny dutinky způsobuje erozi. Tím dochází k jejímu zvětšování a při pokračující eroze může dojít k průrazu celého dielektrika.
- **chemické** – pokud dutinka obsahuje kyslík, výboje vytváří v dutince ozón, který má velké oxidační účinky. Chemické zničení izolantu muže způsobit i rozklad některých izolantu při částečných výbojích.
- **tepelné** – přímým důsledkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita, protože jeho opakovaným působení dochází k oteplení dielektrika, a tím k snížení hladiny napětí tepelného průrazu.

Částečné výboje snižují spolehlivost a životnost různých přístrojů a zařízení. Z tohoto důvodu jsou velmi nežádoucí a mají tyto dva negativní vlivy:

- **snižují životnost izolantů** – přehřátím a bombardováním elektronů a iontů ničí izolační materiál
- **působí rušivě na okolí** – impulsy částečných výbojů mají velmi strmé čelo a opakují se s velmi vysokou frekvencí, amplitudou a mohou způsobit rušení jiných elektrických zařízení

Částečné výboje byly probrány podrobněji, protože budou použity na diagnostiku kvality vybraných procesů.

Chování výboje je do značné míry také závislé na tlaku plynu. Při nízkých tlacích klesá podle Paschenova zákona zápalné napětí výboje. Nejmenší hodnota zápalného napětí je přibližně 300 V. Tato hodnota závisí především na druhu plynu a uspořádání elektrodového systému.

V atmosférickém tlaku přechází výboj na jiskrový nebo obloukový s charakteristickým vzrůstem proudu ve výboji a výrazným poklesem napětí na elektrodách.

**Elektrodové systémy pro výboj s dielektrickou bariérou:**

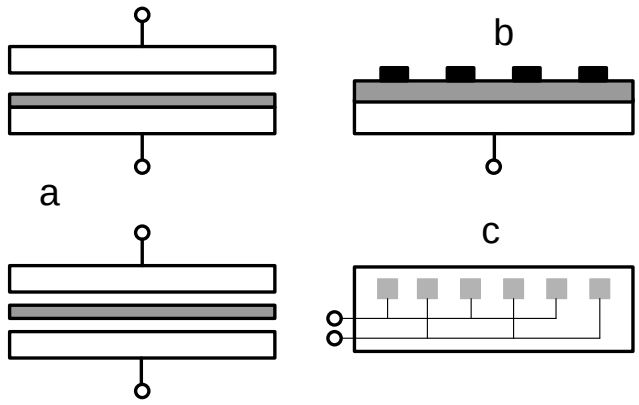
a) **Objemový výboj** – dielektrický materiál je vložen do vzduchové mezery mezi dvěma elektrodami. V případě, že by dielektrikum bylo připojeno k jedné

elektrodě, je nutné, aby mezi tímto spojením neexistovala žádná vzduchová mezera, kde by mohly vznikat parazitní výboje. Tento typ výboje je typický pro větší diskrétní systémy, ale není vhodný pro LTCC technologii.

b) **Povrchový výboj** – elektrody jsou v kontaktu s povrchem dielektrika. V tomto případě je požadavkem, aby alespoň jedna elektroda neměla žádnou vzduchovou mezeru mezi dielektrikem. Pak dochází k rozvinutí výboje v těsné blízkosti povrchu dielektrika. Tento způsob umožňuje účinné chlazení. Výboj je použitelný i pro technologii LTCC.

c) **Koplanární uspořádání elektrod** – jedná se o strukturu střídajících se rovnoběžných elektrod s opačnou polaritou napětí. Elektrody se stejnou polaritou jsou připojeny ke zdroji napětí. Takto vytvořený systém je pokrytý vrstvou dielektrika. Mezi elektrodami se při připojení napětí vytváří elektrické pole, které se dostává i do oblasti nad dielektrikem. Jakmile je dosaženo určité intenzity, dochází zde k ionizaci a vzniku povrchového výboje. Tento výboj nastává mezi mnoha páry elektrod umístěných pod izolační vrstvou, která je chlazena stejným způsobem jako u povrchového výboje. Pro LTCC je ideální, umožňuje způsoby řešení, které neposkytuje žádný jiný typ technologie.

Uspořádání jednotlivých typů elektrod pro výboj s dielektrickou bariérou je uveden na obr.9.




**Obr. 11.:** Rozložení elektrod pro výboj s dielektrickou bariérou a) objemový výboj, b) povrchový výboj, c) koplanární uspořádání elektrod.

Vlastní výboj je složen z řady mikrovýbojů, které jsou distribuovány v celém objemu. Každý průraz obvykle doprovází záření ionizovaného plynu z vzniklého výbojového kanálku o průměru, který nepřesahuje několik desítek μm. Koncentrace elektronu v mikrovýboji je $10^{14} - 10^{15}$ cm$^{-3}$ (při atmosférickém a vyšším tlaku). Lze tedy říci, že se jedná o slabě ionizovaný plyn [34].

**Permitivita dielektrického materiálu**

Má zásadní vliv na průběh výboje a ovlivňuje především rozšíření oblasti výboje po povrchu dielektrika. V případě objemového a povrchového výboje se oblast rozšíření výboje se zvětšující permitivitou zmenšuje.

Situace je obdobná i s tloušťkou dielektrické vrstvy. Čím je vrstva tenčí, tím je menší rozšíření výboje, ale o to je účinnější chlazení, které je významné hlavně u materiálů s nízkou teplenou vodivostí.

Co nejmenší velikost relativní permitivity naopak požadujeme u koplanárního uspořádání elektrod. Vytvořené elektrické pole se více rozšíří nad povrch dielektrika, zmenší se zápalné napětí i parazitní kapacita elektrodového systému.

Formy rozvinutí výboje jsou velmi závislé na geometrii elektrod, složení pracovního plynu a jeho tlaku. Může se projevovat i jako difúzní, může hořet téměř kontinuálně nebo v jednotlivých pulzech, které jsou náhodně rozděleny v čase a prostoru v celém objemu nebo povrchu výbojového systému.

U objemového výboje lze výbojové kanálky považovat za axiálně symetrické. Co se týká povrchového a koplanárního výboje, tam se předpokládá, že je výboj rovnoměrně rozložen v těsné blízkosti povrchu dielektrika. K popisu systému v obou zmiňovaných případech lze použít dvojrozměrného modelu [21].

**Využití výbojů s dielektrickou bariérou**

Ve většině aplikací se výboj s dielektrickou bariérou využívá k excitaci vnitřních stavu atomů a molekul, za účelem získání přesně disociovaných částic nebo přesně definovaného záření v oblasti UV. Nejčastější použití výboje s dielektrickou bariérou je výroba ozónu z kyslíku.

## 2.5 Modelování v program COMSOL Multiphysics

Simulace v dnešní době patří k neodmyslitelné části návrhu různých funkčních bloků nebo prvků. Umožňují snížit náklady na výrobu nebo upřesnit technologické postupy výroby a odstranit nežádoucí problémy, které zvyšují cenu výrobku. Takovým vhodným simulační programem je například Comsol Multiphysics, který umožňuje řešit rozsáhle problematiky z inženýrské praxe.

Simulační software Švédské firmy Comsol, který dodává pro Českou republiku firma Humusoft umožňuje řešení multi-fyzikálních úloh, a tím provádět komplexnější analýzu požadovaného modelu.

Modely v programovém prostředí Comsol jsou řešeny parciálními diferenciálními rovnicemi, které jsou stanoveny na základě definice prostředí, které tyto rovnice popisují a zadáním okrajových podmínek na plochách, hranách nebo bodech v simulovaném geometrickém modelu. Samotný Comsol tedy obsahuje knihovnu zmiňovaných parciálních diferenciálních rovnic, které definují různé aplikační režimy, které si uživatel definuje sám v grafickém rozhraní této aplikace. Nejedná se ovšem o dialogy vyžadující matematické definice, ale jde o zadávání vlastností fyzikálních.

V práci byly modelovány následující fyzikální děje a elektrické vlastnosti:

1. rozložení proudové hustoty ve vodiči
2. zjištění ztrátového výkonu planárních cívek
3. zjištění hodnoty indukčnosti planární cívky v kmitočtovém pásmu (20kHz - 30MHz)
4. šíření elektromagnetického pole
5. kapacita mezi jednotlivými vinutími planárního transformátoru
6. velikost průhybu membrány tlakového senzoru

Simulace poskytuje velmi elegantní způsob jak modelovat různé fyzikální děje, ale výsledky je vhodné experimentálním způsobem ověřit. Přesnost simulace závisí především na hustotě sítě rozdělující strukturu, přesnosti materiálových konstant a popisu úlohy.

Metody rozdělení struktury:

a) konečných diferencí
b) momentová
c) konečných prvků

Nejpoužívanější je metoda konečných prvků, která je v dnešní době integrována v různých CAD systémech. Diskretizace úlohy se provádí automaticky na základě definovaných uzlů na povrchu tělesa nebo transpozicí základních prvků (posunutí, rotace, kombinace).

### 2.5.1 Metoda konečných prvků

Patří mezi moderní metody, které jsou používány při analýze různých inženýrských výpočtů. Metoda konečných prvků (MKP) je založena na variačním principu hledání minima nějakého funkcionálu.

Důležitým krokem ve výpočtovém modelu je volba typu prvku. Velké množství praktických úloh lze řešit zjednodušeně, bez plného trojrozměrného modelu. Jedná se o úlohy rovinné nebo rotačně symetrické. U nich používáme k vytvoření modelu metodou konečných prvků čtyřúhelníky nebo trojúhelníky, jejichž vrcholy představují uzlové body [27].

Nelineární řešení pomocí MKP

Nelineární chování jsou řešeny MKP tak, že analyzovaná struktura je rozdělena na malé dílčí části, které jsou řešeny a tím je možné chování v daném rozměru s dostatečnou přesností linearizovat.

Princip výpočtu spočívá v řešení jedné dílčí části, ke které je přiřazen další přírůstek (další část). Tento postup je několikrát opakován až k vymezení celé struktury. Každý přírůstkový krok vyžaduje několik iterací, tím dochází k prodloužení doby výpočtu, která bývá řádově vyšší než u úloh lineárních.

### Rozdělení struktury 2D metodou konečných prvků

Při simulaci je nutné vytvořenou strukturu rozdělit metodou konečných prvků (MKP). Princip spočívá v diskretizaci plochy do určitého konečného počtu prvků. Pro diskretizaci je nejvodnější použít trojúhelník, protože umožňuje rozdělit strukturu libovolného tvaru s minimálními odchylkami. Řešení jsou následně hledána v získaných uzlových bodech.

Metoda konečných prvků vznikla z nutnosti řešit úlohy z pružnosti a strukturální analýzy. Počátky MKP lze nalézt v práci **Alexandera Hrennikoffa** a **Richarda Couranta**. Jejich přístup byl odlišný, ale jedno měl společné, a tím bylo rozdělení spojité oblasti do množiny samostatných podoblastí. Hernnikoffa práce dělí strukturu podle mřížky [68], ale užívanější je Courantův přístup [69], kde byla oblast rozdělena na konečné množství trojúhelníkových elementů.

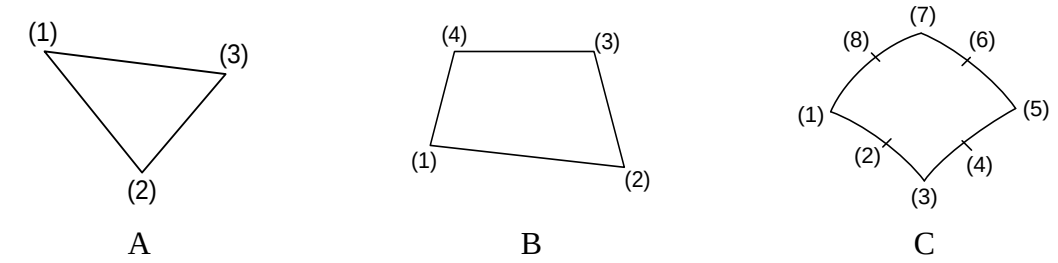
MKP v české republice úspěšně rozvíjeli matematici Prof. M Zlámal, Prof. A. Ženíšek a stavební inženýr Prof. J. Kratochvíl. [34]

## Rozdělení struktury 3D metodou konečných prvků

Při řešení 3D modelů se pro rozdělení struktury nejčastěji využívají čtyřstěny tzv. Tetrahedrony. Trojrozměrná tělesa v prostoru, jehož stěny tvoří čtyři obecné trojúhelníky a bývá označováno jako platónské těleso.

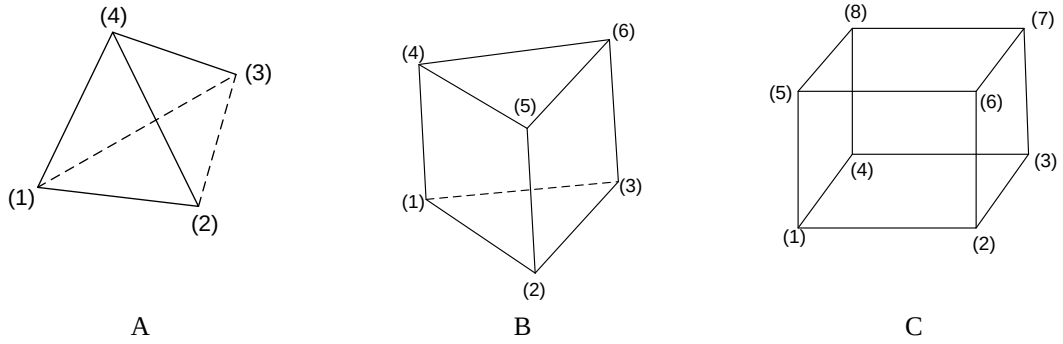
Přehled základních prvků podle tvaru:

- 2D prvky (rovinné, rotačně symetrické) používají se převážně trojúhelníky, čtyřúhelníky a parametrický prvek a jsou uvedeny na obr.12.

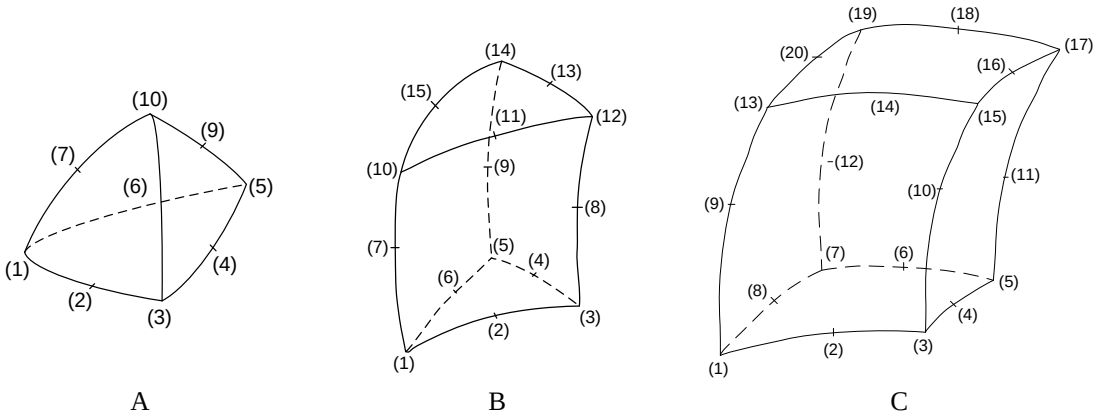



**Obr. 12.:** Prvky 2D pro dělení struktury A) trojúhelník B) čtyřúhelník C) parametrický prvek.

- 3D prvky (prostorové) se nejčastěji používají čtyřstěny, pětistěny a šestistěny obr.13. nebo isoparametrická tělesa obr. 14.




**Obr. 13.:** Prvky 3D pro dělení struktury A) čtyřstěn-tetrahedron B) Pětistěn C) šestistěn.




**Obr. 14.:** Isoparametrické 3D prvky A) čtyřstěn B) pětistěn C) šestistěn.

### 2.5.2 AC / DC modul

Jedná se o rozšířený modul určený pro modelování úloh s působením stejnosměrného nebo střídavého proudu v oblasti elektromagnetismu. Obsahuje aplikace pro obecný statický, kvazistatický elektromagnetismus v 2D a 3D geometrii včetně symetrických těles. Je velmi vhodný pro modelování nízkofrekvenčních magnetických systémů do kmitočtu 100MHz [52].

Při řešení je možné využít typy analýz:

**Statická analýza -** Ustálený typ analýzy po odeznění přechodových dějů, kde jsou použity pevně zvolené hodnoty parciálních diferenciálních rovnic (PDR), které se nemění.

**Přechodová (transientní) analýza -** Přechodový jev probíhá v elektrickém obvodu mezi dvěma ustálenými stavy. Jeho vznik je podmíněn změnou energie v akumulačních prvcích obvodu. Při řešení je tedy použit časově závislý zdroj napětí nebo proudu. Výsledkem zdroje může být například proudový nebo napěťový impulz. Při řešení jsou použity parciální diferenciální rovnice, které společně s okrajovými a počátečními podmínkami umožňuji přesně definovat řešenou úlohu.

**Časová – harmonická analýza -** Je typem analýzy, kde je buď zadána hodnota kmitočtu, na kterém má být zjištěna hodnota veličiny, nebo je definováno určité kmitočtové pásmo. Tento typ řešení ovšem neposkytuje přímo měřenou veličinu, ale její komplexní hodnotu, která je vyjádřena amplitudou a fází. Pro řešení těchto typů úloh se nejčastěji používá sinusový signál a první nebo druhá Maxwellova rovnice [59].

# 3. Cíle disertace

Rozšíření poznatků z oblasti nízkoteplotně vypalovaných substrátů může do značné míry přispět při konstrukci a návrhu různých typů zařízení s možnosti 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.

Aby bylo zajištěno splnění jednotlivých cílů, byla práce rozdělena do následujících částí:

1) Výroba pouzdra pro speciální polovodičové součástky, kde mohou být využity dobré vlastnosti pásku nízkoteplotně vypalované keramiky. Při konstrukci speciálních typů pouzder bude řešen odvod tepla z čipu, proudová zatížitelnost kontaktu a různé způsoby propojení. Pro testování vlastnosti pouzdra bude vytvořen přípravek, který bude obsahovat vodní chlazení a řídící elektroniku pro testování vlastností vyrobených pouzder.

2) Vytváření elektrod v technologii LTCC bude dalším tématem práce, kde budou zjišťovány různé způsoby uspořádání elektrodových systému, vlastnosti, typy výboje a jejich využití pro konstrukci generátoru ozónu.

3) Nízkoteplotně vypalovanou keramiku lze také využít při konstrukci kapacitního tlakového senzor pracující na principu deskového kondenzátoru. Budou hledána řešení pro vytváření dutin ve struktuře. Provedením simulace dojde k stanovení velikosti průhybu keramického pásku. Z výsledku simulací bude vypočítána velikost kapacity senzoru. Získané výsledky z měření budou porovnány se simulacemi.

4) Planární obvodové prvky budou posledním tématem disertabilní částí práce. Při vytváření planárních cívek budou zjišťovány jednotlivé parametry s návazností na konstrukci planárního transformátor. Při jejich výrobě bude ověřena kvalita laminačního procesu a vytváření vodivého motivu. Získané výsledky budou ověřeny simulacemi v programu COMSOL multiphysics.

5) Pro laminaci bude vytvořen lis, který umožní dostatečné působení síly na laminační šablonu. Zahřátí šablony na požadovanou teplotu bude realizováno vyhřívací plotnou s možností regulace teploty. V případě sítotiskového stroje bude tiskový stůl doplněn o porézní kámen, který bude sloužit k uchycení pásku po celém povrchu.

6) Protože se jedná o relativně novou technologii, bude nutné nalézt vhodné optimální parametry jednotlivých dílčích technologických procesů. Jako například rychlost řezu a výkon laserového paprsku. Při vytváření vodivého motivu sítotiskem stanovit kvalitu a tloušťka natištěných vrstev. V případě vodivého propojení skrz pásek nízkoteplotní keramiky, prozkoumat optimální velikost otvoru, provést kontrolu měřením a optickou inspekcí. Značná pozornost bude také věnována i samotné laminaci z hlediska velikosti působícího tlaku, teploty a doby jejich působení. Pro hodnocení kvality bude nutné nalézt vhodné metody měření. Na závěr celého technologického procesu zjistit vhodný teplotní profil pro výpal vyrobených 3D struktur.

7) Testování způsobu vytváření vodivého motivu vakuovým napařování. Zkoumání možnosti výpalu LTCC v různých atmosférách za účelem změny elektrických vlastností.

8) Hodnocení kvality celé technologie a jednotlivých dílčích technologických procesu bude stanoveno měřením. Z tohoto důvodu bude sestaveno pracoviště pro měření částečných výbojů (ČV), které umožní analýzu a diagnostiku kvality výrobních procesů. Pracoviště také poslouží současně k testování generátor ozónu výbojem s dielektrickou bariérou.

9) Porovnání získaných výsledku z výroby planárních obvodových prvků bude provedeno simulací v programovém prostředí Comsol Multiphysics. Stanovení parametrů jednotlivých materiálů a nastavení okrajových podmínek v jednotlivých simulacích. Popis parazitních jevu, které se uplatňují v dílčích kmitočtových pásmech a jejich vlivu na přesnost simulace.

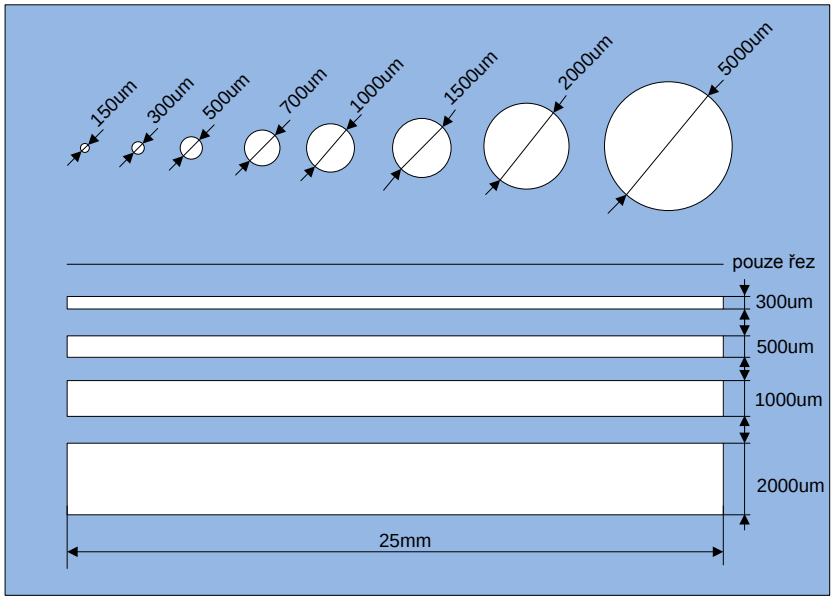
# 4. Technologie LTCC na Ústavu mikroelektroniky

V následující části budou popsány jednotlivé výrobní postupy, které byly testovány pro výrobu 3D struktury v technologii LTCC. Jelikož tato technologie je relativně nová, bylo nutné se s ní blíže seznámit a vytvořit některá zařízení, která usnadní práci s touto technologií. Byl vyzkoušen každý technologický krok výroby a vybrán vhodný způsob jak zhodnotit kvalitu daného řešení. Některé výrobní postupy se opírají o zahraniční vědecké články a periodika. Při práci byl používán pásek HeraLock 2000 od firmy Heraeus a pasty které jsou pro tento typ nízkoteplotní keramiky určeny. Tento typ materiálu byl používán z důvodu malé změny rozměru v ose x a y při výpalu (tzv. smrštivosti).

## *4.2 Obrábění pásku*

Řezání do nízkoteplotní keramiky je možné zařízením nízkého výkonu. V surovém stavu je pásek nízkoteplotní keramiky velmi měkký a tvárný. Při řezání a vytváření různých tvarů z nízkoteplotní keramiky byl použit trimovací laser ALS 300 od firmy AUREL. Jedná se o Nd:Yag laser s vlnovou délkou 1024nm a výkonem 30 W. Při řezání je požadavek, aby vyřezání jednotlivých tvarů v nízkoteplotní keramice netrvalo příliš dlouho, hrany byly co nejostřejší a substrát nebyl zbytečně opálený. Z důvodu značně rozličných požadavků bylo nutné nalézt optimum.

Doba řezu by měla být co nejkratší, toho lze dosáhnout rychlostí posuvu řezné hlavy, ale jsme limitování tím, že může dojít k nedostatečnému prořízntutí pásku a pak nepůjdou oddělit vyřezané části. S tím souvisí i výkon a tedy proud kavitou. Se zvýšením rychlosti tedy musí dojít i k nárůstu výkonu - proudu kavitou. To ovšem snižuje její životnost. Dále je nutné si uvědomit, že jiné nastavení musí být pro rovné a šikmé čáry nebo kružnice. Při šikmých čarách a kružnicích posuv vykonává složitější pohyb a je tedy nutné tomu přizpůsobit výkon a rychlost posuvu řezné hlavy.




**Obr. 15.:** Návrh testovacího motivu (kružnice a obdélníky) pro zjištění optimálních parametrů nastavení laseru AUREL ALS 300.

Požadavek na kvalitu řezu se hlavně odvíjí od aplikace vyráběné struktury a náročnosti technologického procesu výroby. V případě, že se bude jednat o řezy velmi malých rozměrů, bude kvalita řezu rozhodující. V této práci se jednalo hlavně o prořízntutí substrátu, vyšší rychlost řezu, ostrost hran a malé opálení substrátu hlavně u kruhových otvorů.

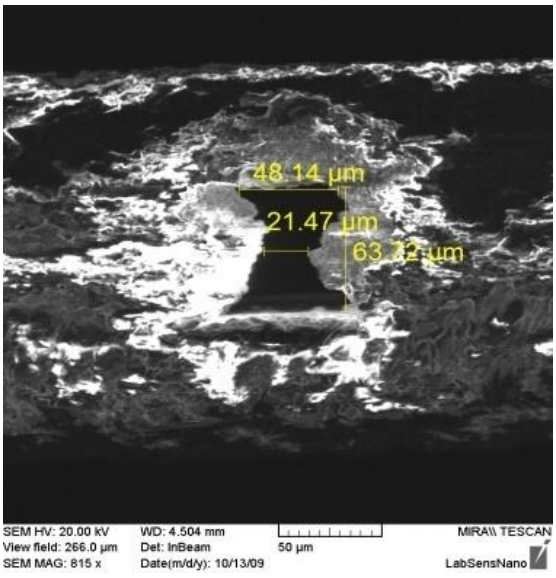
Pro testování kvality řezu byla vytvořena testovací struktura, která byla rozdělena na dvě části. První část obsahovala sérii rovinných řezů délky 3cm, druhá část byla složena z kružnic různého průměru. Na testovacích obrazcích byla vyzkoušena rychlost posuvu řezné hlavy a proud kavitou. Struktura s testovacími obrazci pro zjištění parametru optimálního nastavení laseru pro dosažení nejvyšší kvality řezu je uvedena na obr.15.

Hlavním kritériem pro hodnocení kvality bylo, aby byl substrát dostatečně prořízntutý a docházelo k samovolnému oddělení oříznuté části od zbytku struktury. Pokud by musel být mechanicky oddělen vyřezaný tvar, mohlo by dojít k roztržení substrátu nebo poškození hran. Dalším kritériem byla ostrost hran a jejich opálení. Při dostatečné rychlosti posuvné hlavy laseru, je největší část výkonu soustředěna do řezné stopy a okolní části nejsou příliš opáleny.

Při řezání byly zjištěny tyto optimální parametry:

- proud kavitou 16 A
- rychlost řezu: pro rovné čáry 3 mm/s
  pro kružnice 2.8 mm/s do průměru 2 mm
  pro kružnice 3 mm/s od průměru > 2 mm

Kromě kvality byla také zjištěna minimální velikost dutiny, kterou je možné vytvořit v nízkoteplotní keramice. Struktura se skládala z jednoho pásku nízkoteplotní keramiky, na kterém byl proveden řez laserovým paprskem. Prořízntutý pásek byl vložen mezi další dva, byla provedena laminace a následně výpal této struktury. Po výpalu byla struktura rozlomena a zkoumána velikost dutiny pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM).




**Obr. 16.:** Snímek znázorňující šířku stopy laseru jedním substrátem LTCC po laminaci a výpalu.(nejmenší velikost dutiny).

Snímek pořízený na mikroskopu je uveden na obr.16. Z výsledku je zřejmé, že výška mikrokanálku nebyla 100 μm, jak bylo předpokládáno vzhledem k tloušťce substrátu, ale pouze 63,4 μm. Zjištěna šířka řezné stopy byla uprostřed nejmenší, pouze 21,47 μm a rozšiřovala se do maximální velikosti 48,14 μm. Toto zúžení mohlo být způsobeno při laminaci, kde došlo k působení tlaku na prostor dutiny. Určitý podíl na tomto výsledku mohl mít i výkon laseru, který je na povrchu největší a s hloubkou vniku klesá.

Závěrem lze konstatovat, že šířka řezné stopy laseru AUREL ALS 300 do nízkoteplotní keramiky je 48 μm.

**Zhodnocení dosažených výsledků při řezání nízkoteplotní keramiky**

Dělení pásků nízkoteplotní keramiky nebo vyřezávání různých tvarů je závislé na použitém zařízení. Nejvhodnější řešením se zdá být, použití různých typů laserů, které umožňují vyřezání rozmanitých tvarů, nastavením optimálního výkonu a kvality hran v řezu. Na ústavu mikroelektroniky se pro řezání používal Nd:Yag laser ALS 300 od firmy AUREL, který je určen pro dostavování hodnot tlustovrstvých odporů a rýhování korundových keramických substrátů.

Pro používání laseru musely být stanoveny optimální parametry, které umožnily efektivní obrábění pásku nízkoteplotní keramiky. Pro stanovení parametrů byla vytvořena testovací struktura, na které byly zjišťovány tyto parametry:

a) ostrost hran v řezu – minimální opálení hran pásku v řezu

b) prořízntutí pásku – bez dodatečného oddělení pásků v řezu

c) rychlost řezu – snížení doby potřebné pro vyřezání struktury

d) závislost složitosti tvaru na kvalitě řezu

Při hledání parametrů s důrazem na výše zmiňované body bylo stanoveno:

- proud kavitou **16 A**

- rychlost řezu pro: **- 3 mm / s rovné řezy**

**- 2,8 mm / s** pro **kružnice do průměru 2 mm**

**- 3 mm / s** pro **kružnice nad průměr 2 mm**

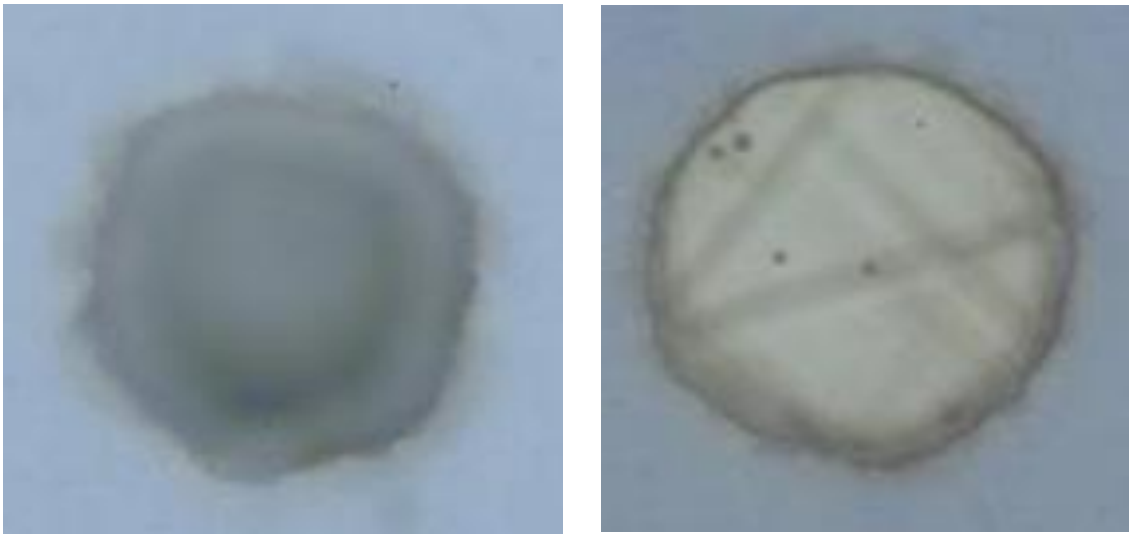
## *4.3 Výroba vodivého propojení*

Realizace vodivého propojení v nízkoteplotní keramice je prováděna pomocí šablonového tisku. V tomto případě nelze použít sítotisk, protože by mohlo dojít k nedostatečnému zaplnění otvoru vodivou pastou, a tím k ztrátě vodivého spojení. Velikost otvoru by měla být menší než samotná tloušťka pásku, aby nedošlo při výpalu vlivem smrštění k přerušení vodivého spojení. Zároveň by neměl být příliš velký, aby pasta vlivem viskozity zůstala v celém objemu díry a nevytekla ven nebo nevznikl tzv. kapilární jev [77].

**Postup při výrobě vodivého propojení**

Do nízkoteplotní keramiky je vyřezán otvor, který by měl mít hladké hrany a pravidelný tvar. Pokud by tyto kritéria nebyla splněna, mohlo by dojít k špatnému

vyplnění otvoru pastou v celém objemu a k špatnému propojení vrstev. Tento defekt by se mohl projevit zvýšeným odporem přechodu, případně ztrátou spojení po výpalu nebo snížením elektrické pevnosti vlivem přítomnosti vzduchové dutiny. Pro řezání otvoru je v dnešní době nejčastěji používán laser a zjištěné parametry pro optimální řezání bylo předmětem předchozí kapitoly. Ukázka vyřezaných otvorů laserem je na obr.17.



A B

**Obr. 17.:** Vyřezané otvory pro vodivé propojení A) nevhodný B) požadovaný tvar.

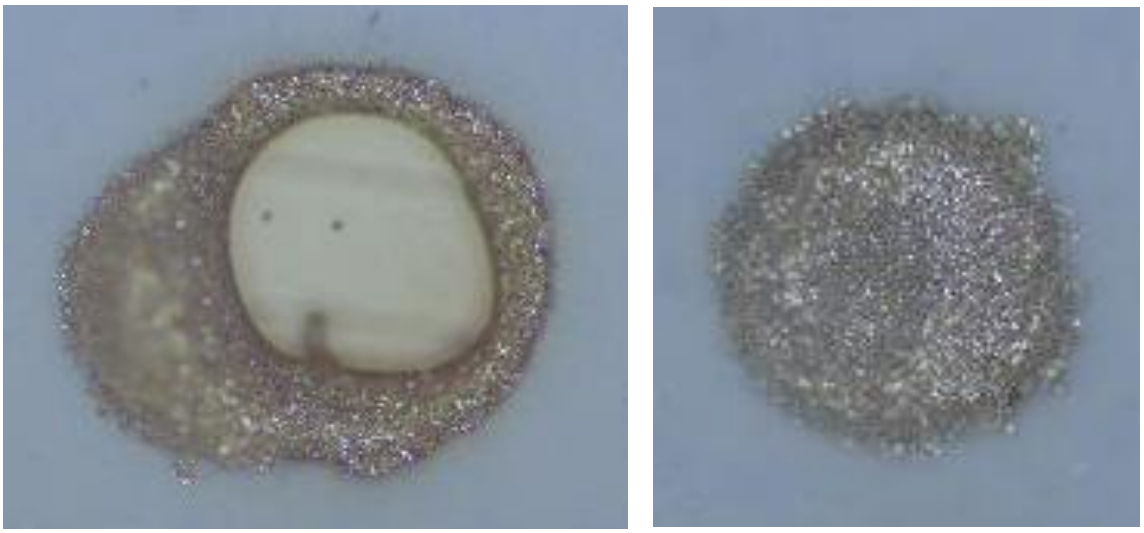
Po vyřezání otvoru následuje jeho plnění pastou, která je k tomuto účelu určena (TC0308). Plnění je prováděno šablonovým tiskem. Do vyřezaného otvoru v pásku, je přes otvor v šabloně, který by měl být minimálně o 10% větší, než velikost zaplňovaného otvoru, vtlačena pasta. Ze zkušeností víme, že rozměr může být i větší a z hlediska lepšího usazení šablony je to i vhodnější. Tloušťka kovové šablony by neměla být větší než 40 μm. U šablony s větší tloušťkou je naneseno větší množství pasty a dochází k tvarovým deformacím vlivem nadbytečnosti pasty. Pasta by měla ulpět v otvoru a neměly by se objevit žádné vzduchové bubliny v celém objemu.

Hlavním parametrem, který ovlivňuje kvalitu, je velikost otvoru. Pokud by byl otvor příliš velký, tak by při výpalu docházelo k smrštění pasty a k vzniku dutiny ve vodivém propojení skrz vrstvu. Tato dutina se většinou objeví skoro uprostřed otvoru nebo vznikne tzv. kapilární jev, kdy největší množství pasty je na hranách. Tento jev byl dán viskozitou pasty a jejím povrchovým napětím [78].

Při výrobě vodivého spojení z jedné strany pásku na druhý byly testovány velikosti otvoru v rozmezí 100 – 500 μm v průměru. Nejvhodnější se jevila být velikost otvoru 300 μm, která zaručovala dostatečnou kvalitu a reprodukovatelnost výroby a snadné usazení tiskové šablony. U otvorů menších rozměrů, je toto usazení problematičtější a náročnější. Současně zde bylo dosaženo velmi dobrých výsledků a to především u průměru 100 a 200 μm. Průměry nad 300 μm začaly vykazovat defekty už po natištění pasty.

Při sejmutí pásku ze stolu šablonového tisku zůstalo značné množství pasty vlivem povrchového napětí na stole a zbytek ulpěl pouze na hranách otvoru. V některých případech se objevil i tzv. kapilární jev, kdy došlo k vytvoření prohlubně v místě díry a velké množství pasty se přichytilo pouze na okraji. Po natištění dochází

k zasušení při teplotě 80 °C po dobu 10 minut. Ukázka vytvořených „vodivých propojení skrz pásek je uvedena na obr.18. [76].

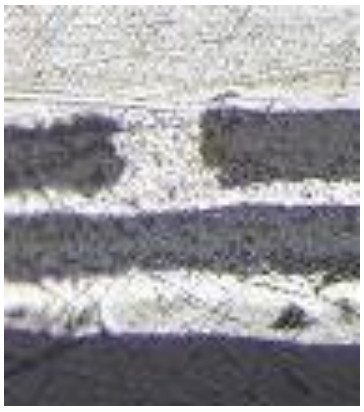


A B

**Obr. 18.:** Vodivé propojení v LTCC A) s defektem B) správně vyrobený.

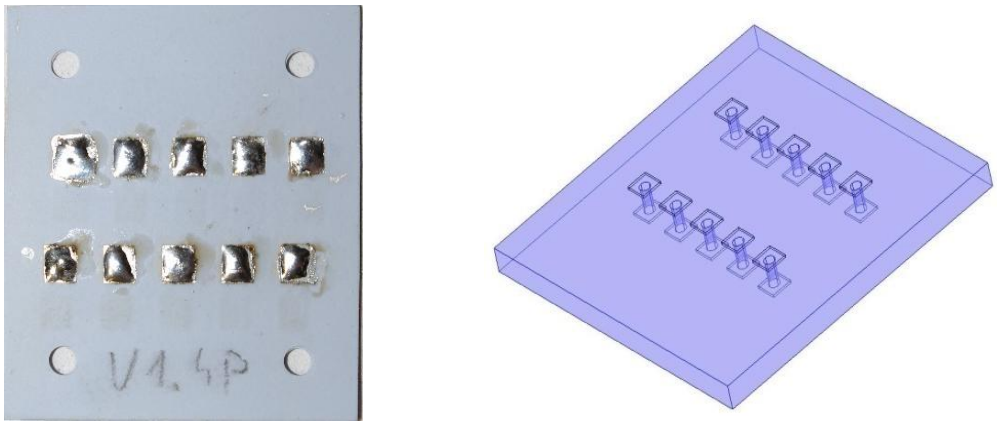
Protože při procesu laminace dochází k sesouhlasení jednotlivých vrstev, bývá většinou vrchní strana pásku v místě vodivého propojení opatřena vodivou ploškou. Tento způsob zajišťuje určitou toleranci při jejich sesazení. Zároveň ale není nutné vytvářet plošky z obou stran, vždy postačuje vrchní strana, při laminaci totiž vlivem působení tlaku dochází vtlačení spodní vrstvy do vrchní a tím dochází k spojení jednotlivých vrstev. Tento jev způsobí, jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, rozšíření průměru u povrchu pásku a dále k jeho zúžení uprostřed díry a opět k rozšíření u druhého okraje. Danou situaci ukazuje obr.18. Pokud by nedocházelo k vtlačení jednotlivých vrstev do sebe jak popisuje obr.4., tak by byl otvor v pásku pravidelného válcového tvaru. Po zasušení a laminaci jednotlivých vrstev byl proveden výbrus a optickou inspekcí zkontrolovány jednotlivé vodivé propojení skrz pásek v nízkoteplotní keramice. Příklad vodivé propojení o průměru 100 μm je ukázán na obr.19.

Kromě mechanického výbrusu a následné optické inspekce bylo provedeno měření vlastnosti vodivé propojení z hlediska elektrického odporu. Hodnota umožňuje stanovit, jestli je vodivé spojení kvalitní nebo se tam uplatňuje přechodový odpor, který by zhoršil elektrické vlastnosti realizovaného obvodu.



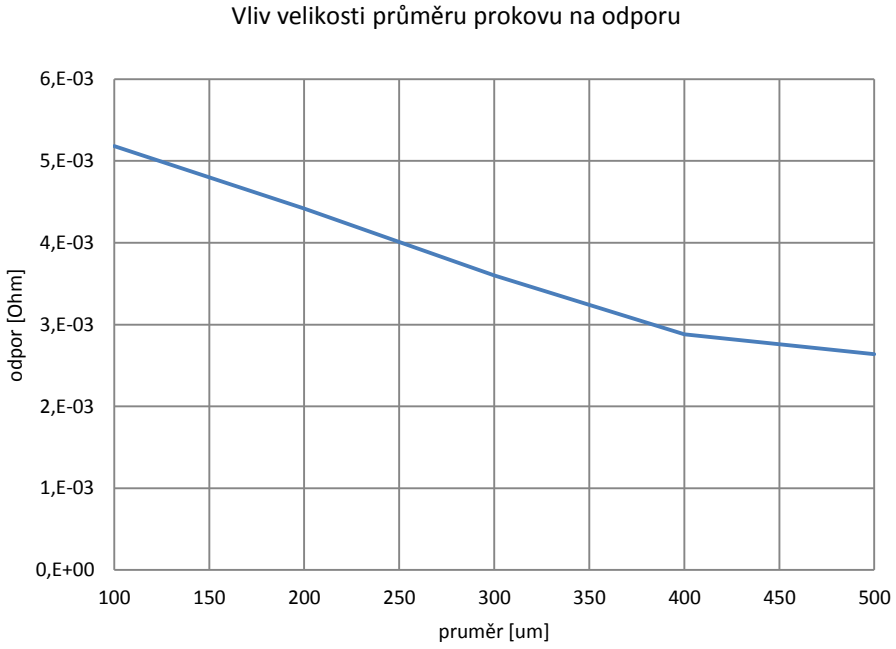
**Obr. 19.:** Výbrus vodivého propojení vyrobeného v technologii LTCC.

Pro testování odporu vodivého propojení skrz pásek v závislosti na velikosti otvoru byla vytvořena struktura, která je uvedena na obr.20. Skládala se ze dvou identických řad otvorů s průměrem 100, 200, 300, 400 a 500 μm. Tyto otvory byly vyplněny pastou TC0308, která je určena pro výrobu vodivé propojení. Na protilehlých stranách byly vytvořeny stříbrnou pájitelnou pastou TC0306 plošky, které sloužily pro připojení měřicího přístroje. Měření bylo provedeno RLC mostem Agilent E4980A.




**Obr. 20.:** Struktura pro stanovení kvality vodivého propojení s různými průměry otvorů.

Změřené hodnoty odporu pro jednotlivé velikosti vodivého propojení skrz pásek byly vyneseny do grafu, který je na obr.21. Z výsledku je zřejmé, že s rostoucím průměrem vodivého propojení klesala hodnota odporu.




**Obr. 21.:** Vliv odporu v závislosti na velikosti vodivého propojení skrz vrstvu.

## Zhodnocení dosažených výsledků při výrobě vodivého propojení

Vodivé propojení skrz pásek nízkoteplotně vypalované keramiky umožňují zvýšit hustotu integrace na jednotku plochy. Zároveň ale mohou být potenciálním zdrojem nejistoty z hlediska spolehlivosti vyrobené struktury, která se může projevovat

přechodovým odporem nebo dokonce ztrátou vodivého spojení. Při řešení vodivého spojení skrz jednu vrstvu byl velký důraz kladen na úplné zaplnění otvoru pastou. Bylo zjištěno, že při rychlosti řezu laseru 2,8 mm / s, při proudu kavitou 16 A byla optimální velikost vodivého propojení 300 μm. Při plnění otvoru pastou nedocházelo k žádnému defektu, otvor byl pastou zaplněn v celém objemu. Celkově u vodivého propojení velikosti 100 – 300 μm bylo dosaženo velmi dobrých výsledků, při zvyšujícím se průměru se začal projevovat nedostatek pasty v celém objemu díry v pásku, která se projevovalo výskytem pasty pouze na hranách nebo kapilárním jevem v prostoru díry. Tento výsledek je patrný z obr.18, kde na průměru díry 400 μm došlo k zlomu a menšímu poklesu vodivosti. Větší průměry by tedy nemusely být příliš spolehlivé.

## *4.3 Výroba vodivého motivu*

Vytváření vodivého motivu patří k základním požadavkům výroby 3D struktury. V dnešní době existuje nepřeberné možností způsobů jak vytvářet vodivý motiv na různé typy materiálu, ale bohužel některé nelze použít v technologii LTCC z důvodu špatných elektrických nebo mechanických vlastností. Při vytváření vodivého motivu byly odzkoušeny postupy pro výrobu v LTCC tlustovrstvou technologií, která je pro nízkoteplotní keramiku určena. Každý výrobce k danému typu substrátu nabízí pasty pro různé typy použití viz. **kapitola 4.1.**

Pro tlustovrstvou technologii jsou dva způsoby pro vytváření vodivého propojení, které mají své specifické vlastnosti. Mimo jiné byla použita i tenkovrstvá technologie – vakuové napařování.

Stručný popis způsobů výroby vodivého propojení TFT technologií:

- **Sítotisk** – tento způsob se využívá při vytváření motivu na povrchu pásku. Vytvořená vrstva má tloušťku danou převážně tloušťkou síta a pohybuje se v rozmezí 11 – 20 μm. Co se týká velikosti vytvořeného motivu, jsme zde limitování velikosti oka síta. Z tohoto důvodu nejsme schopni vytvořit čáru menší šířky než 100 μm. U technologie LTCC se uvádí počet ok na palec 325 μm.
- **Šablonový tisk** – tento způsob se využívá při vytváření Vodivého propojení skrz pásek. Jedná se o vodivý přechod z jedné strany substrátu na druhou. Tato metoda vytváření vodivého motivu umožňuje dostatečně vyplnit vyřezanou díru pastou. Uvádí se, že velikost díry v šabloně by měla být o 10 % větší než velikost vyplňované díry a to z toho důvodu, aby pasta ulpěla i na okrajích díry a vlivem viskozity zůstala v pásku i po odstranění šablony. Tloušťka natištěné vrstvy je dána tloušťkou šablony. V této práci byla používána tloušťka 40 μm – 100 μm.

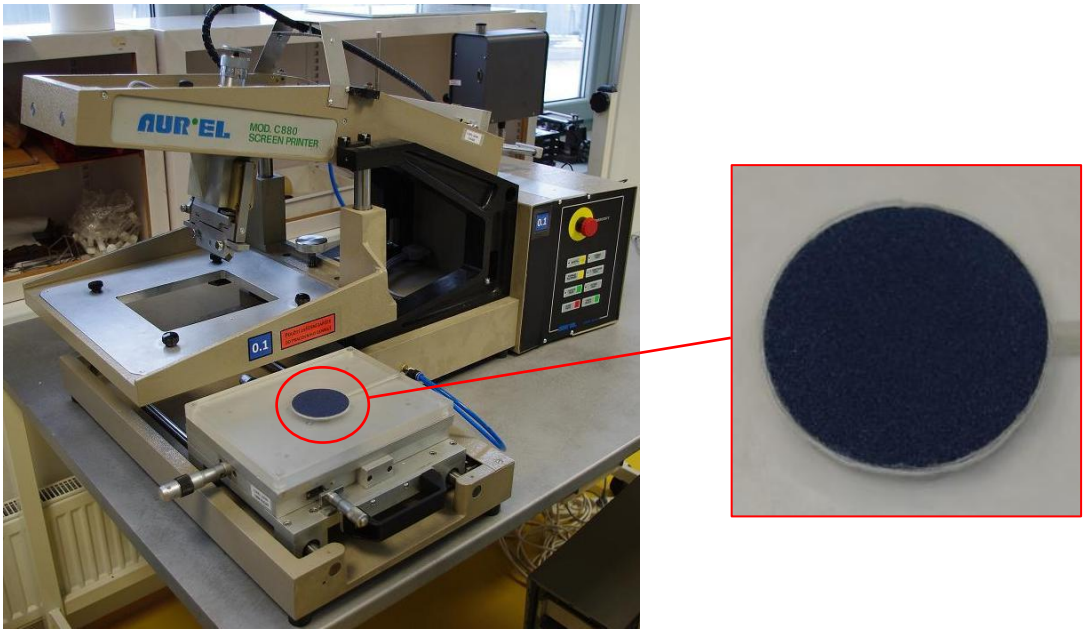
Šablonovým tiskem nelze vytvářet na nízkoteplotní keramice vodivý motiv, protože tloušťka vrstvy je příliš velká a dochází k špatné adhezi natištěné vrstvy na pásek. Šablonový tisk je pouze vhodný pro výrobu vodivého propojení skrz vrstvu. Na druhé straně je sítotisk vhodný pouze pro výrobu vodivého motivu na substrátu, protože lze zajistit definovanou tloušťku vrstvy. Ale nelze tuto metodu použít při vytváření vodivého propojení, protože při použití síta by nedošlo k dostatečnému zaplnění otvoru pastou a tedy k spolehlivému vodivému propojení.

## Sítotisková metoda - vytváření motivu na LTCC

Sítotisková metoda patří mezi osvědčené způsoby vytváření vodivého motivu na keramických substrátech. Avšak v technologii LTCC je určitý rozdíl oproti vytváření HIO na korundový substrát. Především ve vytváření vodivého motivu na ještě nevytvrzený substrát nízkoteplotní keramiky a následně dochází k vypálení past současně s keramickým substrátem. Této způsob snižuje dobu potřebnou pro výrobu struktury. U klasické tlustovrstvé technologie by nejdřív muselo dojít k vytvrzení keramiky, následně k nanášení vodivého motivu a poté k jeho výpalu.

Nevýhodou ovšem je, že nevytvrzený pásek LTCC je velmi flexibilní, a proto bylo nutné upravit stůl sítotiskového stroje Aurel model C 880. Sítotiskový stůl vyrobený z plexiskla měl uprostřed pouze jeden otvor o velikosti 4 mm, který zajišťoval uchycení keramické destičky vytvrzeného korundu ($Al_2O_3$) pomocí vakua. Pokud by byl položen pásek nízkoteplotní keramiky na tento stůl, došlo by k přichycení substrátu jen v místě otvoru a při tisku by došlo k přilepení okrajů substrátu nízkoteplotní keramiky a tím k ztrátě odskoku síta a rozmazání tištěného motivu. V místě otvoru by vlivem vakua došlo k průhybu pásku vlivem jeho měkkosti a při tisku k jeho roztržení.

Tento problém řeší použití porézního kamene. Do sítotiskového stolu byl vyfrézován otvor, do kterého byl usazen porézní kámen průměru 70 mm a tloušťce 6 mm od německé firmy HumBoldt. Aby bylo dosaženo odsávání vzduchu z celého povrchu, byla pod porézním kamenem vyfrézována drážka pro lepší odvod vzduchu. Pokud by vzduch nebyl odváděn z celého povrchu rovnoměrně, došlo by při tisku k přilepení dílčí části pásku a síta. Následně k rozmazání natištěného motivu nebo vytvoření špatné výšky natištěné pasty v celém motivu. Dalším požadavkem bylo, aby povrch kamene byl zarovnán s povrchem sítotiskového stolu. Jakákoliv nerovnost by se opět projevila ve výsledné kvalitě tištěných vzorků nebo zkrácení životnosti síta, které by mohla způsobit jeho roztržení. Upravený sítotiskový stůl s porézním kamenem je uveden na obr.22.




**Obr. 22.:** Úprava sítotiskového stolu pro technologii LTCC (vpravo detail porézního kamene)

Vytvořený sítotiskový stůl v automatu Aurel model C880, byl testován při vytváření vodivých vrstev na nízkoteplotní keramice. Při tisku byly použity pasty,

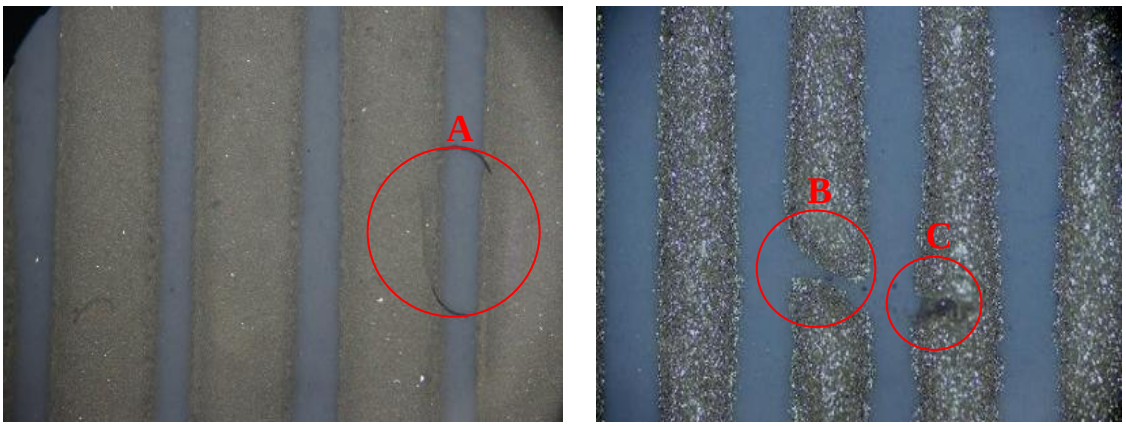
které jsou doporučeny výrobcem. Nanášení vrstev bylo provedeno jednorázově, to znamená, že motiv byl vytvořen jedním tahem stěrky. Pro tisk byl navržen motiv, který bude používán v další části práce. Cívka s šířkou vodivé stopy a mezery 250 μm s celkovým počtem 10 závitů. Konce cívky jsou opatřeny ploškami čtvercového tvaru o velikosti 2 x 2 mm.

Pro testování byly použity tři pasty, které jsou nejčastěji používány. Pasta TC0306 stříbrná vnější pájitelná, TC0307 stříbrná vnitřní nepájitelná a zlatá TC8101 určena pro kontaktování mikrodrátky (wirebonding). Hodnocení kvality natištěných vrstev bylo provedeno optickou inspekcí na mikroskopu a byla současně zjištěna i tloušťka natištěných vrstev. Zjištěné hodnoty tlouštek jsou uvedeny v tab.5. Tloušťku u vodivých past po zasušení vytvořeného motivu výrobce u některých typů z neznámých důvodů neuvádí. Při práci byly tyto hodnoty zjištěny a budou určitým přínosem této práce.

**Tab. 5.:** Tloušťky natištěných vrstev pro vybrané typy past.

| označení pasty | tloušťka pasty změřená v μm | | tloušťka pasty deklarovaná výrobcem v μm | | popis a použití pasty |
|---|---|---|---|---|---|
| | zasušená | vypálená | zasušená | vypálená | |
| TC 0307 | 25 | 15 | 20-25 | 10-15 | Ag na vnitřní vrstvy |
| TC 0306 | 33 | 20 | neuvádí se | 15-21 | Ag pajitelná |
| TC 8101 | 21 | 12 | neuvádí se | 8-12 | Au na wirebonding |

Kromě určení tloušťky jednotlivých vrstev byla zjišťována i kvalita natištěného motivu. Po výpalu občas docházelo k přerušení vodivého motivu – vinutí planární cívky. Optickou kontrolou bylo zjištěno, že se místy vyskytovaly mikrotrhliny způsobující ztrátu vodivého spojení. Tento defekt ovšem nebyl způsoben tiskem, protože jeho výskyt v motivu nebyl pravidelný, ale náhodný. Vlivem nepravidelného výskytu byly defekty přisuzovány výskytem nečistot v tiskovém procesu. Tato skutečnost byla potvrzena optickou inspekcí a výsledky jsou zobrazeny na obr.23.




**Obr. 23.:** Vytvořený motiv vinutí planární cívky A) s nečistotou v podobě vlákna v motivu B) a C) vypálený motiv s defektem, který může vlákno způsobit.

Z obrázku je zřejmé, že vlákna byla vtištěna do vodivého motivu a po zasušení (80 °C po dobu 80 minut) došlo k jejich odpaření, které způsobilo popraskání vodivého motivu a ztrátě elektrického spojení v některých lepších případech pouze k zúžení vodivé cesty. Aby byl problém odstraněn, byla provedena analýza pracovního postupu.

Po každém úkonu byla provedena optická kontrola natištěné vrstvy, a tím bylo zjištěno, že nečistoty se dostávají do pasty z utěrky při čištění síta. Získaný poznatek byl velmi překvapivý, protože výrobce daný typ utěrek propagoval jako bezvláknové. Při použití jiného typu byl tento problém odstraněn.

Tento typ defektu je při výrobě 3D struktury velmi nežádoucí, ale umožňuje prokázat perspektivu této technologie. A to tak, že pokud je po každém technologickém kroku provedena patřičná kontrola, lze vadné pásky z procesu nahradit, a tím zvýšit celkovou výtěžnost výroby. Na obr. 24 je ukázka natištěné vrstvy, která je homogenní ve všech částech bez defektu.



**Obr. 24.:** Ukázka natištěné stříbrné pasty vlevo před výpalem a vpravo po výpalu.

## Výroba vodivého motivu technologie tenkých vrstev

Další z možných způsobů vytváření vodivého motivu je technologie tenkých vrstev, která je charakterizována především malou tloušťkou vytvořené vrstvy, ale velmi dobrými elektrickými vlastnostmi. Vodivé motivy jsou realizovány za použití ušlechtilých kovů, které mají velmi dobré elektrické vlastnosti a nízký bod tání. Technologie tenkých vrstev byla vyzkoušena na nízkoteplotní keramice HeraLock 2000.

Vodivá tenká vrstvy na syrové nízkoteplotní keramice byla vytvořena vakuovým napařováním. Jako vodivý materiál bylo použito zlato a stříbro. Po napaření vrstev o tloušťce 100 um byly následně substráty vloženy do pece, kde byl proveden výpal podle definovaného teplotního profilu. Po výpalu bylo zjištěno, že tenké vrstvy kovů se při vysoké teplotě odpařily a substrát vypadal, jako by na něm žádná vrstva vytvořena nebyla. Stejných výsledku bylo dosaženo i v případě, že napařené vrstvy byly překryty páskem nízkoteplotní keramiky, spojeny v procesu laminace a vypáleny [74],[75].

Tento výsledek může být způsobený tím, že substrát HeraLock 2000 obsahuje méně skelné báze a z tohoto důvodu je povrch substrátu příliš hrubý. Napařená vrstva potom nevytvoří homogenní plochu o stejné tloušťce a při vysoké teplotě dochází k spálení tenké vrstvy. Lepších výsledku by tedy mohlo být dosaženo tím, že by byla provedena úprava povrchu nízkoteplotní keramiky.

**Zhodnocení dosažených výsledků při vytváření vodivého motivu**

Vytváření vodivého motivu sítotiskem na nízkoteplotní keramiku patří mezi základní způsoby, které je nutné zvládnou pro vytvoření jakékoliv 3D struktury. Kritériem pro hodnocení může být optická inspekce a měření tloušťky vytvořené vrstvy. Pro kvalitní nanášení vodivého motivu bylo nutné upravit stůl sítotiskového automatu AUREL doplněním o porézní kámen.

Na upraveném stolu byly natištěny vodivé vrstvy a jako testovací struktura byla použita **čtvercová planární cívka s 10 závity.** Šířka mezery a vodivého spoje byla stanovena **250 μm.** Cívka byla označena jako $C_1$.

Při testování byly použity tři různé typy past:

- TC0306 – stříbrná vnější pájitelná
- TC0307 – stříbrná vnitřní nepájitelná
- TC8101 – zlatá pro kontaktování mikrodrátky

U třech výše uvedených past bylo provedeno:

- zjištění hodnot tloušťky natištěných vrstev, které se pohybovaly v tolerančních mezích a jsou deklarovány výrobcem
- dodatečné zjištění parametrů, které výrobce neuvádí
- zjištění nečistot v podobě vláken, jež se vyskytovaly ve vodivém motivu a způsobily zúžení a někdy dokonce docházelo ke ztrátě vodivého spojení. Kromě vláken v tisku nebyly zjištěny jiné defekty. Tisk vodivého motivu bylo možné považovat za velmi kvalitní.

Z výsledku je zřejmé, že změřené tloušťky jednotlivých past odpovídaly intervalu, který deklaruje výrobce. Hodnoty natištěných vrstev se pohybovaly kolem horní meze jak po zasušení, tak i po výpalu. Největší smrštivost vykazovala pasta TC0306, která je určena pro pájení. Defekty v podobě vláken ukázaly na nutnost zvýšit čistotu při vytváření vodivého motivu a při čistění síta.

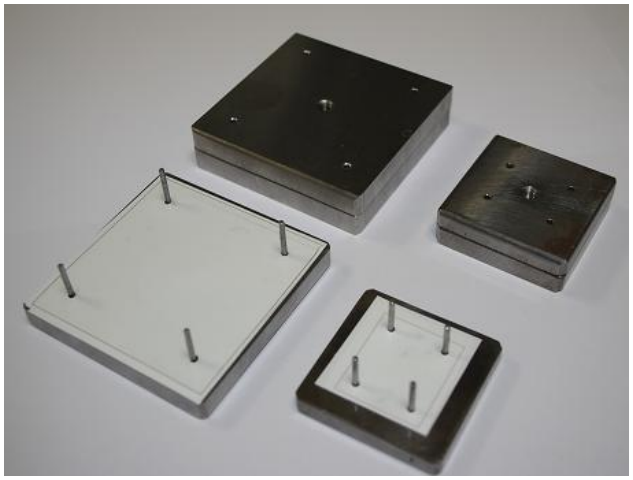
## 4.4 Laminace

Ze získaných poznatků je zřejmé, že výsledná kvalita 3D struktury závisí pouze na kvalitě laminačního procesu. Po laminaci následuje pouze výpal, který nemá vliv na výslednou kvalitu struktury v případě, že je použit vhodný vypalovací profil.

Laminace je prováděna v laminační šabloně, která udává výsledný tvar struktury, zajišťuje sesouhlasení jednotlivých pásku pomocí středících trnů a také homogenní spojení po celém povrchu jednotlivých pásků. Laminační šablona je složena z železných kvádrů, které jsou na sebe položeny. Spodní deska obsahuje 4 středící trny o průměru 2 mm. Pomocí nich jsou jednotlivé desky na sebe přesně usazeny a zabraňují vzájemnému posuvu desek mezi sebou v horizontálním směru. Také současně slouží k sesouhlasení pásků nízkoteplotní keramiky. Požadovaná struktura je vložena mezi dvě desky, aby nedošlo k přilepení keramiky, je mezi styčnou plochu keramického pásku a plotnu vložena fólie.

Ukázka laminačních šablon, které byly vyrobeny a při práci používány je uvedeno na obr.25. Výkres pro výrobu šablony je součástí přílohy. Pro laminaci nízkoteplotní keramiky, samotná šablona nestačí. Z tohoto důvodu byl sestaven lis

umožňující přesnou regulaci tlaku a teploty, protože k spojení pásků dochází při jejich současném působení, jak bylo uvedeno v teoretické části. Vzhledem k tomu, že tlak na šablonu působí ze dvou směrů, jedná se tedy o anaxiální lis.



**Obr. 25.:** Šablony pro laminaci LTCC (vpravo 80 x 80mm, vlevo52 x 52).

## Lis pro laminaci LTCC

Pro laminaci nízkoteplotní keramiky byl zakoupen kavitační lis H - 62 od firmy Trystom, který umožňuje dosáhnout síly 120 kN. Tato hodnota by měla být dostačující pro laminaci vzorků o velikosti 50 x 50 mm nebo i větší rozměrů jakéhokoliv typu pásků nízkoteplotních keramik do cca 20 vrstev. Kromě tlaku je pro laminaci také velmi důležitá teplota, na kterou je laminační šablona při jeho působení vyhřívána.




**Obr. 26.:** Vyrobený anaxiální lis pro technologii LTCC.

Pro vyhřívání byl zvolen způsob, kdy byla šablona položena na vyhřívací plotnu, která byla připevněna ke kavitačnímu lisu. Vyhřívání jednotlivých šablon by bylo neperspektivní, protože by každá šablona musela být doplněna o regulátor teploty a vyhřívací elementy. To by znamenalo zvětšení geometrických rozměrů šablon, a s tím související špatná manipulace při práci. Celkově menší variabilita celého systému. Lis pro laminaci nízkoteplotní keramiky je uveden na obr.26.

Vyhřívací plotna lisu je vyrobena z železného kvádru obdélníkového tvaru, do kterého byly vyvrtány otvory, tak aby bylo možné dvěma topnými patronami rovnoměrně vyhřát plotnu v celém objemu. Pro snímání teploty byl v rohu vyvrtán otvor, kde bylo umístěno polovodičové teplotní čidlo. Maximální teplota, které jsou schopny topné patrony dosáhnout je 255 °C při napětí 230 V. Nastavení požadované teploty je realizováno pomocí teplotního čidla a digitálního regulátoru teploty od firmy Smart, který umožňuje regulaci v rozsahu 25 °C – 99 °C. Teplota na plotně je měřena pomocí polovodičového senzoru teploty, který je vložen ve vyvrtaném otvoru v plotně a je připojen k regulátoru. Při regulaci dochází k střídavému zapínaní a vypínaní patron, protože při kontinuálním provozu by došlo k jejich zničení.

Po sestavení anaxiálního lisu bylo provedeno měření. Doba k dosažení nastavené teploty 70 °C bylo dosaženo za cca 10 minut při počáteční teplotě 22 °C. Rozdíl teploty na regulátoru a na plotně se lišil o 3 °C. Tato odchylka se zmenšovala při prodlužující se době provozu až na 2 °C. Při regulaci docházelo ke kolísání teploty maximálně o 4 °C vlivem relaxační doby regulátoru, která je nutná, aby nedošlo k zničení regulátoru a topných patron. Fluktuace teploty se snížila na 2 °C s delší dobou provozu.

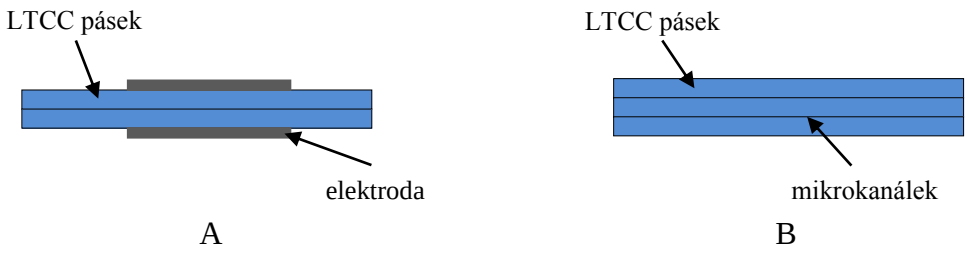
## Testování kvality laminace nízkoteplotní keramiky

Kvalita vyrobené 3D struktury v nízkoteplotní keramice je závislá především na kvalitě laminačního procesu. Pro zjištění kvality laminace bylo provedeno testování. V některých případech lze špatnou laminaci zjistit ještě před výpalem pouhým prohlednutím struktury. Může se jednat například o různé tvarové deformace nebo rozlaminování pásků nízkoteplotní keramiky. Defekty uvnitř struktury lze odhalit pouze měřením nebo se mohou projevit až po výpalu, kde dochází k odpaření pojivových složek a k zmenšení rozměrů struktury.

Při hledání optimálních parametrů laminace bylo nutné měnit hodnoty všech tří veličin (tlak, teplota, čas), protože ovlivňují výslednou kvalitu 3D struktury a také navrhnout vhodnou testovací strukturu.

Navržené testovací struktury:

- dvě vrstvy nízkoteplotní keramiky s elektrodovým systémem
- struktura s mikrokanálkem




**Obr. 27.:** Testovací struktura pro zjištěni kvality laminace A) dvě vrstvy s elektrodami B) mikrokanálek.

První testovací struktura se skládala ze dvou pásků nízkoteplotní keramiky, které byly při procesu laminace spojeny a na protilehlých plochách byly vytvořeny pomocí sítotisku vodivé obdélníkové plochy. Tyto natištěné plochy tvoří elektrody určené pro měření.

Měření bylo realizováno na principu deskového kondenzátoru, kde dielektrikem jsou spojené pásky. Hodnota permitivity tedy byla zjištěna výpočtem z měření kapacity. Předpokládalo se, že pokud by laminace byla velmi kvalitní, pak by výsledná permitivita měla být rovna permitivitě LTCC pásku. U nekvalitně zlaminované struktury je výsledná permitivita rovna permitivitě substrátu a vzduchových mezer. Aby byl zajištěn dostatečný kontakt s povrchem keramické struktury, byly na styčných plochách vytvořeny elektrody čtvrcového tvaru stříbrnou pájitelnou pastou TC0306 o rozměrech 10 x 10 mm.

Druhá struktura je složena ze tří pásků nízkoteplotní keramiky. V prostředním pásku byl vyřezán otvor obdélníkového tvaru o šířce 0,5 mm o délce 20 mm a zbývající dva pásky tento otvor překryly a vytvořily uvnitř dutinu – mikrokanálek. Velikost mikrokanálku byla zvolena tak, aby nedocházelo k nežádoucím deformacím v podobě propadení pásku v místě mikrokanálku.

Velikost obou struktur byla zvolena 35 x 30 mm, protože tento rozměr bude ve většině práce využit k vytváření různých 3D struktur. Návrh testovacích struktur pro hodnocení kvality laminace je uvedena na obr.27. Typ laminace použitá pro testování byla základní – teplotní jednorázová. Po výpalu struktur bylo provedeno měření.

Pro obě navržené struktury byly nastavovány následující parametry laminačního procesu:

- změna teploty v rozsahu 60 – 80 °C po 5 °C
- změna tlaku v rozsahu 5 – 30 kN po 5 kN
- změna doby laminačního procesu v intervalech 5 – 20 minut po 5 minutách.

**Teplota** laminačního procesu ovlivňuje měkkost a tvárnost pásku nízkoteplotní keramiky. Z tohoto důvodu byla stanovena spodní hranice 60 °C a horní hranice 80 °C. Výrobce v katalogových listech uvádí teplotu laminace 70 °C, ovšem už neuvádí, jaké funkční vrstvy nebo mechanické prvky struktura obsahuje, což je z hlediska laminace velmi důležité.

**Tlak** je druhým parametrem, který ovlivňuje kvalitu laminace. V tomto případě se jednalo o experiment, protože pro nízkoteplotní keramiku HeraLock 2000 je určena izostatická laminace a v laboratoři byl vytvořen z hlediska jednodušší konstrukce anaxiální lis. Výrobce uvádí tlak 1500 psí v systému s izostatickým působením sil, který pro keramiku o rozměrech 35 x 30 mm odpovídá síle 12 kN. Minimální hodnota síly byla zvolena 5 kN a maximální 30 kN.

**Doba** laminačního procesu je zatížena oběma předchozími parametry. Teoreticky lze předpokládat, že při zvýšení teploty a tlaku může být snížena doba potřebná pro laminaci a naopak. Z tohoto důvodu byl zvolen časový interval v rozsahu 5 – 20 minut. Vytvořené vzorky s různými parametry laminačního procesu bylo nutné otestovat na kvalitu laminačního procesu, aby bylo možné stanovit optimální parametry. Pro testování byly hledány různé metody pro hodnocení. Aby bylo možné stanovit optimální parametry laminace bylo nutné nalézt vhodné způsoby hodnocení kvality laminačního procesu pro dvě navržené testovací struktury.

Metody měření pro hodnocení kvality laminace:

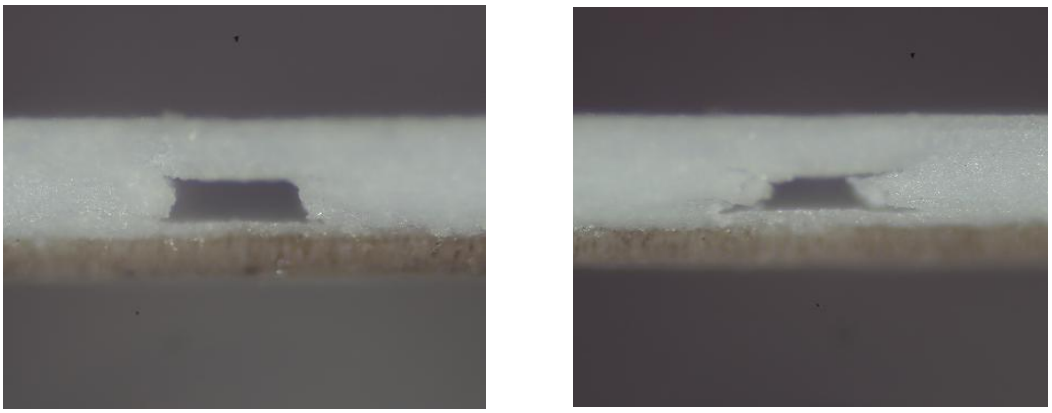
- měření kapacity
- částečné výboje (ČV)
- optická metoda

**Měření kapacity** bylo vyzkoušeno na struktuře dvou pásku s vytvořenými elektrodami na povrchu. Měřením bylo zjištěno, že touto metodou je možné odhalit pouze defekty větších rozměrů například nespojení větší plochy dvou pásku nízkoteplotní keramiky. Menší dutiny nelze detekovat. Dále je problém s přesným umístěním elektrodového systému, aby elektrody byly umístěny přesně nad sebou, což podstatnou měrou ovlivňuje výslednou hodnotu měřené kapacity. Z výsledků bylo zřejmé, že velikost dutin byla tak malá, že změna kapacity byla téměř zanedbatelná.

**Částečné výboje** byly testovány na stejné struktuře jak při měření kapacity. I v tomto případě nebylo možné hodnotit kvalitu laminace. Velikost dutin při horší kvalitě laminace nebyla dostatečně velká, aby mohlo být provedeno objektivní hodnocení kvality.

V případě měření kapacity i částečných výbojů byl pouze rozeznán nárůst kapacity a také pozdější výskyt částečných výbojů u struktur, které byly laminovány při teplotách 65 °C a 70 °C. Z těchto výsledku lze usoudit, že obě metody nejsou příliš vhodné pro hodnocení kvality laminačního procesu.

**Optická metoda** umožňuje odhalit defekty, které by byly jen těžko měřitelné. Tímto případem je i hodnocení kvality laminace nízkoteplotní keramiky. Pro testování kvality byla použita druhá struktura s mikrokanálkem. Po vypálení byla struktura narýhována laserem napříč mikrokanálkem a rozlomena.



**Obr. 28.:** Kvalita laminace zjišťovaná na mikrokanálcích.(vlevo kvalitní spojení, vpravo rozlaminování jednotlivých pásků v místě kanálku.)

Pod mikroskopem byla následně pozorována kvalita spojení jednotlivých vrstev pro jednotlivé parametry laminace. V případě vysokých teplot a vysokého tlaku při krátké době byla struktura deformovaná. Oba pásky keramiky byly vtlačeny do mikrokanálku, na povrchu byly v tomto místě pozorovány prohlubně a prostřední pásek byl mírně vtlačen do kanálku. Velikost byla mnohem menší, ale jednotlivé pásky byly velmi dobře spojeny. Velmi malá hodnota tlaku a teploty způsobila defekty v podobě nedostatečného spojení jednotlivých pásků nízkoteplotní keramiky v místě přechodu mikrokanálek / vrstva. Optimálních výsledků bylo dosaženo při laminační

teplotě 65 °C, tlaku 15 kN, po dobu působení 10 minut. Ukázka různých kvalit laminací je uvedeno na obr.28.

**Zhodnocení dosažených výsledků v laminačním procesu**

Kvalita výsledné struktury je závislá na kvalitě laminačního procesu. Z tohoto důvodu byla značná část práce věnována výrobě laminačních šablon a sestavení laminačního lisu. Šablony byly vyrobeny v rozměrech **52 x 25** mm a **82 x 82** mm. Tyto rozměry umožňují velkou variabilitu velikostí vyrobených struktur. Pro laminaci byl pořízen zubařský kavitační lis umožňující nastavení síly v rozsahu **5 – 120 kN**. Pro vyhřívání šablony byl lis opatřen vyhřívací plotnou s regulátorem, který zajišťuje regulaci teploty v rozsahu **22 °C – 99 °C**. Tento rozsah by měl být dostačující pro laminaci pásků nízkoteplotní keramiky. Sestavený lis zajišťuje působení sil ze dvou směrů, jedná se tedy o **anaxiální** lis.

Vyrobený lis umožňuje dosáhnout velmi dobrých výsledku a zvyšuje kvalitu a úroveň práce s technologií LTCC. V laboratoři je v provozu déle než rok a byl hojně využíván studenty při řešení bakalářských a diplomových prací.

V další části byly navrženy dvě struktury pro zjištění kvality laminace a nastavení jednotlivých parametrů lisu. První struktura byla složena ze 2 vrstev a na protilehlých plochách byly natištěny stříbrnou pastou vodivé čtvercové plošky z důvodu lepšího kontaktu měřících elektrod. Druhá struktura obsahoval 3 vrstvy s mikrokanálkem. Obě zmiňované struktury byly vyrobeny v několika vzorcích při změně jednotlivých parametrů laminačního procesu. Struktura s vodivými ploškami byla testována pomocí měření kapacity a částečných výbojů. Tyto dvě metody bohužel neposkytly dobré výsledky, které by dostatečně vypovídaly o kvalitě laminačního procesu. Naopak struktura s mikrokanálkem a její následná optická inspekce nabídla uspokojivé výsledky. Z výsledku bylo zřejmé, že nejvyšší kvality laminace bylo dosaženo při teplotě 65 °C, tlaku 15 kN po dobu působení na laminační šablonu 10 minut.

Získané hodnoty parametrů lze využít pro standardní typy struktur, které obsahují například pouze vodivé motivy nebo dutiny malých rozměrů do 0,5 mm. V případě složitějších struktur bude nutné tyto parametry různým způsobem obměňovat nebo použit jiné typy laminací jako například studenou nebo vícestupňovou.

## *4.5 Výpal*

Keramika nízkých teplot bývá vypalována ve vzduchové atmosféře. Pro každý typ nízkoteplotní keramiky je definován patřičný teplotní profil, při kterém dochází k jejímu vytvrzení a keramika tím získává své specifické vlastnosti. Na každou část teplotního profilu jsou kladeny určité požadavky, které by měly být dodrženy:

1. Část náběhu – dochází zde k odpařování pojivové složky. V této části by teplota měla růst pozvolna, aby nedocházelo k různým tvarovým deformacím.
2. Část prudkého nárůstu – v této části dochází k prudkému nárůstu teploty. Ten by neměl být příliš ostrý, aby nedošlo k překročení maximální teploty.
3. Část vytvrzení – v této části dochází k formování vlastností nízkoteplotní keramiky. Dále by zde měla být dodržena maximální teplota přetavení a doba, po kterou má být struktura této teplotě vystavena. U běžných nízkoteplotních keramik tato doba bývá 10 – 30 minut.

4. Část chlazení – zde dochází pouze k chladnutí struktury, které by mělo být pozvolné, aby nedošlo k teplotnímu šoku, a tím popraskání keramiky. Při chladnutí už keramika neutváří svoje vlastnosti.

Teplotní profil pro výpal nízkoteplotní keramiky se může lišit od doporučeného výrobcem, je to především dáno použitým typem pece (vsázková nebo průběžná), jejich možnosti nastavení strmosti náběhu a tepelného ovlivňování sousedních zón. Nejdůležitější část teplotního profilu je náběh, nárůst a doba přetavení. Tyto části teplotního profilu by se měly co nejvíce přiblížit doporučení výrobcem. Pro chlazení platí jen jedno pravidlo, aby nebylo příliš rychlé a nedošlo tím k popraskání struktury vlivem prudké změny teploty. Při testování výpalu v různých atmosférách, byl použit jeden pásek nízkoteplotní keramiky a struktura s planární cívkou. Motiv cívky o 10 závitech (viz .kap.4.3.) byl vytvořen na jednom pásku a byl překryt druhým.

**Výpal ve vzduchové atmosféře**

Technologie LTCC je určena pro výpal ve vzduchové atmosféře. Při výpalu bylo nutné nalézt správný teplotní profil, aby výsledná struktura neměla žádné tvarové defekty a kvalitu výsledné struktury určovala pouze kvalita laminace. Profil definovaný výrobcem v katalogových listech je uveden v teoretické části práce v kap.2.1. Skutečný teplotní profil změřený v laboratoři při výpalu nízkoteplotní keramiky HeraLock 2000 je uveden na obr.30. Z grafu je zřejmé, že jednotlivé teplotní profily se mírně lišily.

V teplotních profilech bylo možné pozorovat mírné překmitnutí teploty (až na 870 °C), které ovšem není kritické a nezpůsobuje žádné tvarové deformace. Dále je zřejmé, že nárůst teploty není tak strmý, jak doporučuje výrobce a chlazení je pomalejší. Pokud by nárůst teploty byl příliš prudký, při výpalu struktury by docházelo k vytváření tvarových defektů struktury. V tomto případě k tomuto defektu nedocházelo což lze usoudit, že nárůst teploty nebyl tak výrazný. Doba chlazení byla delší, protože při výpalu je používána vsázková pec LAC, u které chlazení není příliš rychlé. Tato vlastnost je nepříjemná pouze tím, že prodlužuje dobu potřebnou pro výrobu 3D struktury [75].

**Výpal ve vakuu**

Kromě klasické vzduchové atmosféry byl testován i výpal ve vakuu. Pro tento typ výpalu byla použita speciální pec, která vytvoří v prostoru pece hrubé vakuum o hodnotě 10 Pa. Jelikož se ve vakuu velmi špatně přenáší teplo, bylo nutné nalézt vhodný teplotní profil, který zajistí vytvrzení keramické struktury a nebude způsobovat deformace. Vyhřívání je realizováno odporovým ohřevem, který je cyklicky zapínán a vypínán, aby nedošlo k poškození topných elementů. Teplota je kontrolována čidlem, umístěném v peci. Tento způsob regulace ovšem způsobuje velké kolísaní teplot, až o 10 °C a bylo tedy nutné s tím počítat při zjišťování optimálního teplotního profilu. Také bylo zjištěno, že nastavená teplota příliš neodpovídala skutečnosti.

Pro vakuum byl tedy nastaven tento teplotní profil:

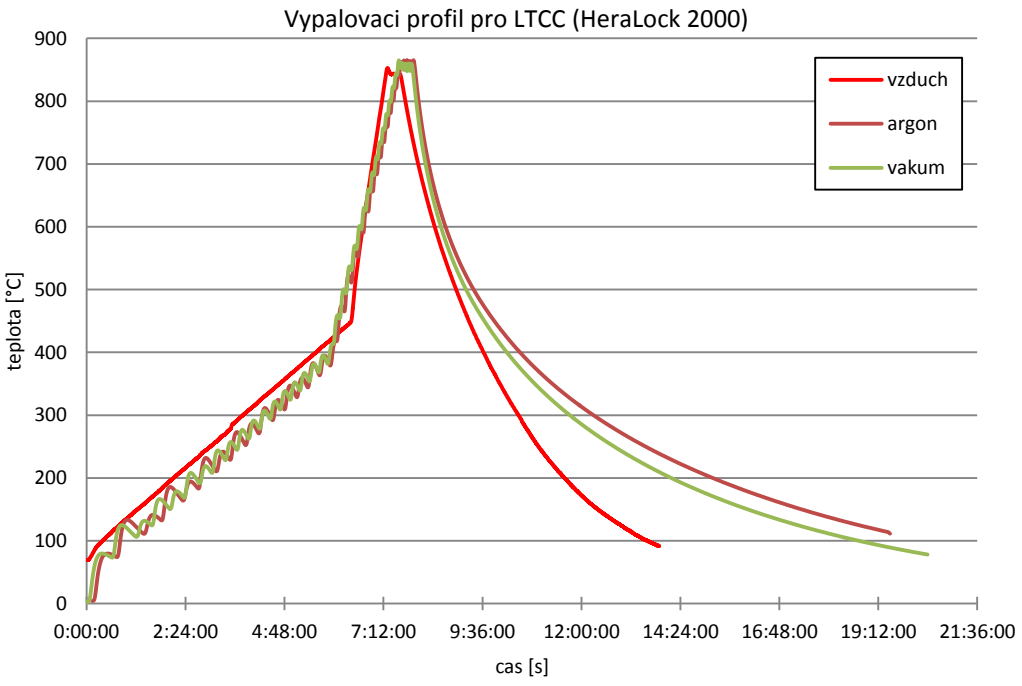
1) náběh na teplotu 100 °C při 3 °C / min
2) náběh na teplotu 450 °C při 10 °C / min
3) náběh na teplotu 855 °C při 8 °C / min
4) doba ustálení na teplotě 855 °C byla 30 minut
5) konec teplotního profilu – samovolné chlazení

## Výpal v inertní atmosféře

Inertní atmosféra se používá při výrobě tam, kde je nutné zajistit určitou čistotu nebo zabránit nežádoucí oxidaci materiálu. V odborných publikacích nikde nebyl uveden výpal LTCC keramiky v inertní atmosféře. Tento způsob může nabídnout nové aplikační možnosti nebo naopak ukázat, že pro technologii LTCC není výpal v inertní atmosféře vhodný. Z těchto důvodu byl vyzkoušen výpal s použitím argonové a dusíkaté atmosféry. Prostor pece byl vždy vyplněn jedním z plynů podle postupu, který je uvedený v kap.2.2.1. Pro výpal byl použit stejný teplotní profil jako v případě vakua. Z měření bylo zjištěno, že u obou inertních plynů byl teplotní profil podobný profilu pro vakuum. Po výpalu se vyskytly tvarové defekty v podobě malých bublin ve struktuře s planární cívkou. Defekty mohly být způsobeny kolísáním teploty nastaveného profilu a nerovnoměrném smrštění substrátu, vlivem odpařování pojivových složek. Dále byla zjištěna i změna barvy nízkoteplotní keramiky ze světle modré na tmavě šedou viz. obr.29.



**Obr. 29.:** Nízkoteplotní keramika vypálena ve vzduchu (vlevo) a v inertní atmosféře (vpravo).



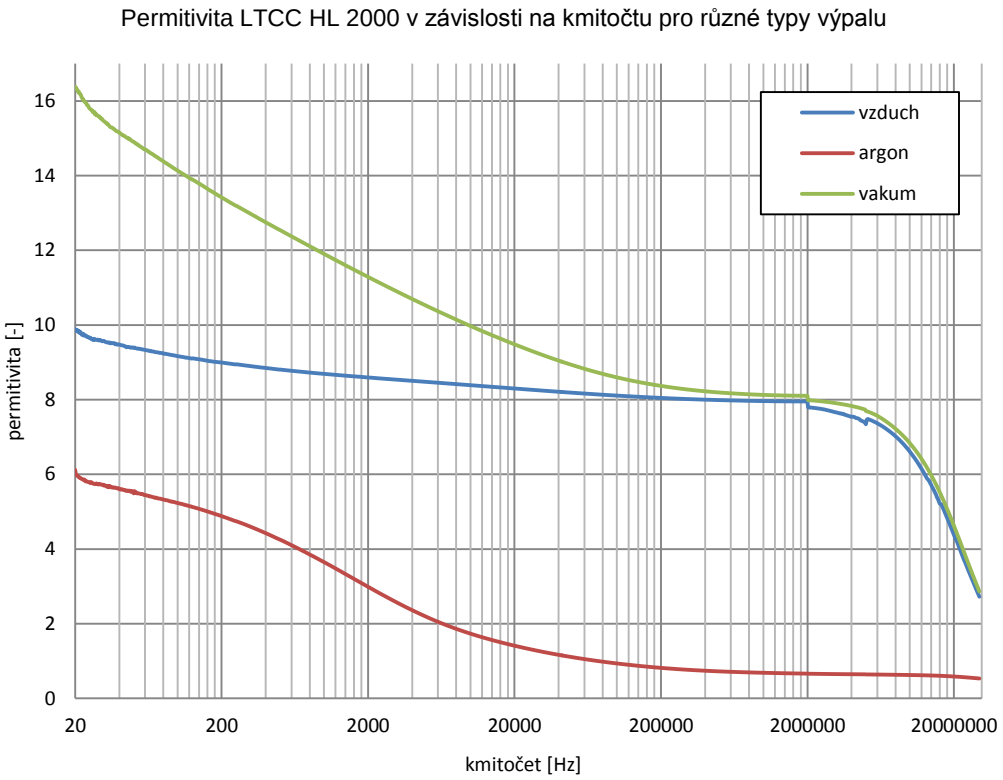

**Obr. 30.:** Změřené teplotní profily pro výpal LTCC při různých typech atmosfér.

Tato změna z hlediska optického nemá příliš velký význam, protože samotný LTCC pásek není transparentní. Změna barvy ovšem může znamenat změnu struktury a vlastností nízkoteplotní keramiky.

Teplotní profily pro tři různé atmosféry (vzduch, argon, vakuum) byly vyneseny z důvodu porovnání do společného grafu, který je uveden na obr.30. Pro vzduchovou atmosféru byl průběh teplotního profilu bez kolísání teploty a celkově strmější. Vakuum a inertní atmosféry vykazovaly v části, kde dochází k odpaření pojivových složek, velké kolísání teploty, které se snižovalo při vzrůstající teplotě až k maximální hodnotě. Kolísání bylo způsobeno cyklickým zapínáním odporového ohřevu a špatným přestupem tepla. V podstatě tento jev nelze odstranit bez zásahu do zařízení. Samovolné chlazení bylo také delší. Celkově tyto profily byly pomalejší, což by nemělo mít vliv na výslednou strukturu. V případě inertních plynů nebyl zjištěn žádný rozdíl mezi použitím argonu nebo dusíku.

### Permitivita pásku HL 2000 při výpalu v různých atmosférách

Kromě subjektivního hodnocení kvality výpalu, jako je vzhled vypáleného vzorku byla změřena i permitivita pásku. Hodnota permitivity byla zjišťována v kmitočtovém rozsahu 20 Hz – 30 MHz. Z grafu na obr. 31 je patrné, že největší permitivity dosahoval substrát vypálený ve vakuu, pak vypálený ve vzduchové atmosféře a nejmenší hodnoty v inertní argonové atmosféře.




**Obr. 31.:** Permitivita v závislosti na kmitočtu pro výpal v třech různých atmosférách (vzduch, vakuum, argon).

Výpal v různých atmosférách přináší určité úskalí výrobního procesu a z výsledku je patrné, že příliš čistá atmosféra nemusí být v této technologii přínosem.

Pokud by tedy byla hodnocena kvalita výpalu z hlediska vysoké permitivity, bylo nejvhodnější použít vakuum nebo vzduchovou atmosféru a naposled argon.

Barevná změna keramiky by nepřinesla žádný problém, protože samotná keramika není průhledná, ale už tato změna vypovídá o tom, že může dojít k změně vlastností keramického substrátu, která se může například projevit v permitivitě substrátu.

**Analýza substrátu rentgenovou fluorescenční spektroskopií**

Rentgenová fluorescenční spektroskopie (RFS) je metoda, která provádí měření intenzity fluorescenčního záření emitovaného prvku s atomovým číslem 11 a 92 excitovanými primárním rentgenovým zářením. Intenzita fluorescence emitovaná daným prvkem závisí na koncentraci daného prvku v analyzovaném materiálu, a také na absorpci dopadajícího a fluorescenčního záření matricí vzorku.[66]

Pro analýzu složení vypálených nízkoteplotních keramik ve třech různých atmosférách byl použit ruční analyzátor Olympus Innov-X delta.

Ruční analyzátor umožňuje:

- velmi přesnou, rychlou, nedestruktivní chemickou analýzu
- zobrazení i stopového množství zastoupených chemických prvků
- pozitivní identifikace různých typů materiálů

Analyzátorem byly měřeny vzorky substrátů, vypalovaných ve třech různých atmosférách. Z výsledků bylo zjištěno, že při výpalu ve vakuu došlo jakoby k zhutnění základního materiálu (Al), snížením množství křemíku (Si) a vyskytoval se i větší obsah titanu (Ti). V případě argonu byla situace opačná. U substrátu vypáleného ve vzduchové atmosféře bylo dosaženo horších hodnot než v případě vakua, ale lepších než u argonu. Získané výsledky také korespondovaly s výslednými hodnotami permitivity zjištěnými v předchozím odstavci. Seznam jednotlivých prvků s procentuálním zastoupením v měřeném vzorku je uveden v Tab.6.

**Tab. 6.:** Analýza složení LTCC substrátu po výpalu v různých atmosférách.

| Prvky | Zastoupení jednotlivých prvků v materiálu při výpalu v různých atmosférách [%] | | |
|---|---|---|---|
| | Vakuum | Vzduch | Argon |
| Al | 52,47 | 49,79 | 49,40 |
| Si | 35,88 | 40,38 | 40,76 |
| Ti | 9,27 | 7,23 | 7,25 |
| V | 1,71 | 1,86 | 1,83 |
| Mn | 0,10 | 0,12 | 0,14 |
| Co | 0,263 | 0,286 | 0,280 |
| Zn | 0,285 | 0,301 | 0,302 |
| Bi | 0,022 | 0,025 | 0,021 |
| Pb | není | 0,013 | 0,014 |

## Zhodnocení dosažených výsledků výpalu LTCC

Výpal je proces, při kterém dochází k odpaření pojivových složek, vytvrzení pásků, které tím získají výsledné elektrické a mechanické vlastnosti keramického substrátu. Samotný neovlivňuje kvalitu výsledné 3D struktury, ale může prokázat kvalitu dílčích procesů v podobě defektů, které se mohou objevit. Tato skutečnost je ale podmíněna použitím vhodného teplotního profilu, kde jsou na každou část kladeny určité nároky.

Teplotní profil doporučovaný výrobcem, je určen pro vzduchovou atmosféru. Profil se může měnit podle použité pece a složitosti struktury. Při práci byl zjištěn a mírně upraven profil pro výpal pásku HeraLock 2000. Výpal ve vzduchové atmosféře je brán jako referenční. Nevyskytují se žádné defekty a lze dosáhnout vysoké kvality a reprodukovatelnosti výroby.

Kromě vzduchové atmosféry byl také vyzkoušen výpal ve vakuu a inertní atmosféře (dusík, argon). Pro hodnocení kvality byly profily testovány pomocí 2 vzorků, kterými byl jeden pásek LTCC a struktura s planární cívkou. Na vypálených páscích byla zjišťována hodnota relativní permitivity. Pro výpal ve vakuu byla hodnota 12 ve vzduchu 6 a v inertních atmosférách 4. U výpalu ve vakuu a inertních atmosférách se vyskytly malé deformace v podobě bublin ve struktuře s planární cívkou. Tyto defekty mohly být způsobeny kolísáním teplot v prostoru pece vlivem regulace a špatného přenosu tepla, který je pro vakuum a inertní atmosféry typický. Další změnu tentokrát v barvě nízkoteplotní keramiky bylo možné pozorovat pouze u inertních atmosfér. Ve vakuu a vzduchu je barva LTCC světle modrá zatímco po výpalu v inertní atmosféře byla barva pásku tmavě šedá.

Aby bylo lépe pochopeno, k jakým změnám došlo ve složení substrátu při výpalu a k změně permitivity, byla provedena analýza složení pomocí rentgenového fluorescenčního analyzátoru. Z výsledku uvedených v tabulce bylo zřejmé, že došlo ke změně procentuálního zastoupení jednotlivých chemických prvků. Největší rozdíly byly mezi vakuem a argonem, což bylo zřejmé i z hodnot permitivit obou vzorků. Vybrané parametry nejpoužívanějších nosných substrátů jsou pro porovnání uvedeny v tab.7. Z výsledku je zřejmé, že se výpalem v různých atmosférách je možné pohybovat od permitivity substrátu FR 4 až po korundovou keramiku.

**Tab. 7.:** Vybrané materiály (substráty) a jejich vlastnosti.

| Materiál | Relativní permitivita při f=100MHz | Tangenta ztrátového činitele f=100MHz | Tepelná vodivost [W/m/K] | Průrazné napětí $E_p$ [MV/cm] |
|---|---|---|---|---|
| Korundová keramika (96% $Al_2O_3$) | 9,6 – 10 | 0,55 | 10 – 35 | 8 |
| Beryliová keramika 99% BeO | 6 – 6,6 | 0,04 | 150 – 250 | 14 |
| LTCC HL2000 | 1,5 – 8 | 0.0026 | 2 – 4 | 0,4 |
| Kuprextit FR4 | 4,2 | 0.05 | 0,6 | 0,4 |

Nastavením parametrů technologických procesu lze tedy ovlivňovat:

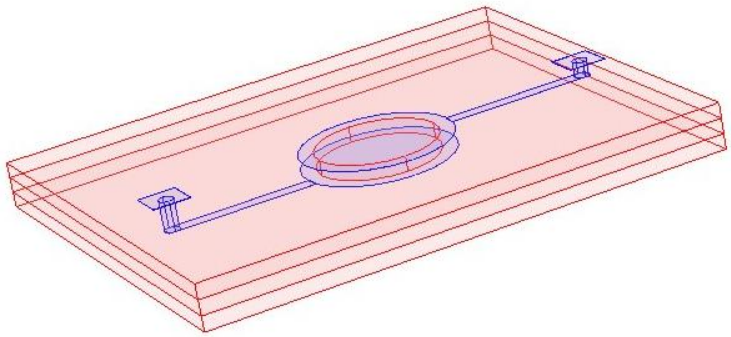
- permitivitu nízkoteplotní keramiky
- elektrickou pevnost
- barvu substrátu
- přítomnost některých pojivových složek v substrátu

# 5. 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.

## *5.1 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. Na prvním a třetím substrátu jsou vytvořeny elektrody deskového kondenzátoru. V druhé vrstvě je vyřezán otvor (kruh o průměru 10 mm), který slouží jako dutina mezi oběma vrstvami a tedy dielektrikum kondenzátoru. Působením tlaku na substrát v místě dutiny dochází k průhybu, a tím k změně vzdálenosti elektrod a současně změně kapacity. Citlivost tlakového senzoru je dána velikostí dutiny, pružností nízkoteplotní keramiky, umístěním a tvaru elektrod. Návrh uspořádání struktury tlakového senzoru je uveden na obr.32. [78].



**Obr. 32.:** 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

Umístění elektrod závisí na aplikaci senzoru. Elektrody s vnitřním uspořádáním jsou vhodné v prostředí, kde se mohou vyskytovat agresivní látky, které by mohly poškodit elektrody. V tomto případě při velkém průhybu substrátu může dojít k spojení elektrod, a tedy k vzniku zkratu. Nevýhodou je, že kontakty od elektrod musí být vyvedeny na povrch struktury – složitější návrh. Pokud jsou elektrody umístěny na povrchu, může vlivem tlaku dojít k spojení jednotlivých pásků v dutině

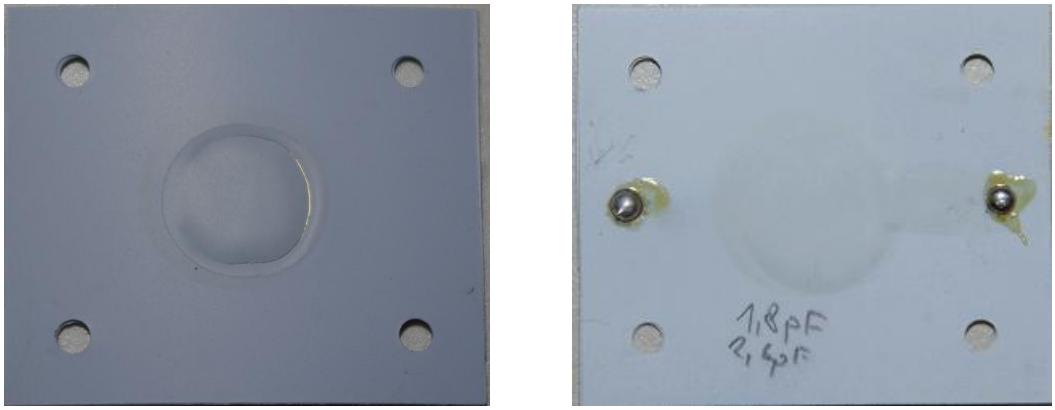
a nedochází, tím ke zkratování elektrod. Při tomto umístění elektrod je možné provést jejich jednoduché kontaktování. Tento způsob ovšem neumožňuje dlouhodobější provoz elektrodového systému v agresivním prostředí.

Způsob vytváření elektrod:

- technologií tlustých vrstev
- technologií tenkých vrstev

**Tlustovrstvá** technologie nabízí jednoduchý a osvědčený způsob, jak vytvářet různé elektrodové systémy. Vytvořené vodivé vrstvy nepodléhají při běžných pracovních podmínkách oxidaci tak rychle, ale v agresivnějším prostředí může docházet k rychlejší degradaci vedoucí k poškození vrstvy. V případě vytvoření elektrod na pásku nízkoteplotní keramiky je zřejmé, že pružnost pásku bude ovlivněna vytvořenou vodivou vrstvou. Pružnost se zmenší a při zatížení může dojít dřív k prasknutí pásku. Technologii TFT lze vytvářet elektrodové systémy ve vnitřním nebo vnějším uspořádání.

**Tenkovrstvé** technologie nabízí možnost vytvoření elektrod pouze na povrchu substrátu. Jak bylo popsáno v kap. 4.3, při výpalu nízkoteplotní keramiky totiž dochází ke spálení tenké vrstvy. Z tohoto důvodu může být vytvořena pouze na vytvrzeném keramickém substrátu, tzn. na povrchu. Při vytvoření elektrod tímto způsobem nedochází ke změně pružnosti keramického substrátu. Nevýhodou ovšem je, že vytvořená tenká vrstva velmi rychle oxiduje už při působení vzduchu. Vytvoření elektrod tímto způsobem by muselo být podmíněno vytvořením krycí vrstvy, která by chránila elektrody před vnějšími vlivy.

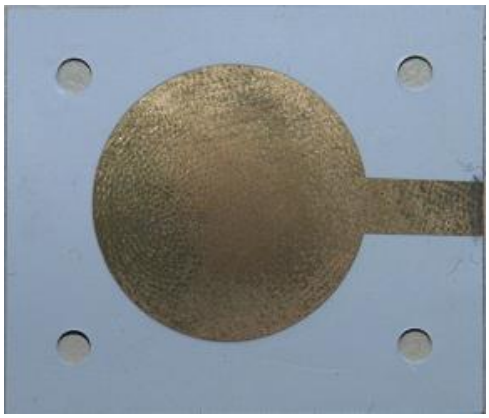



A B

**Obr. 33.:** Tlakový senzor A) s defektem v podobě praskliny B) s odstraněním defektu.

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. Získané výsledky při výrobě jsou uvedeny na obr.33.

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.

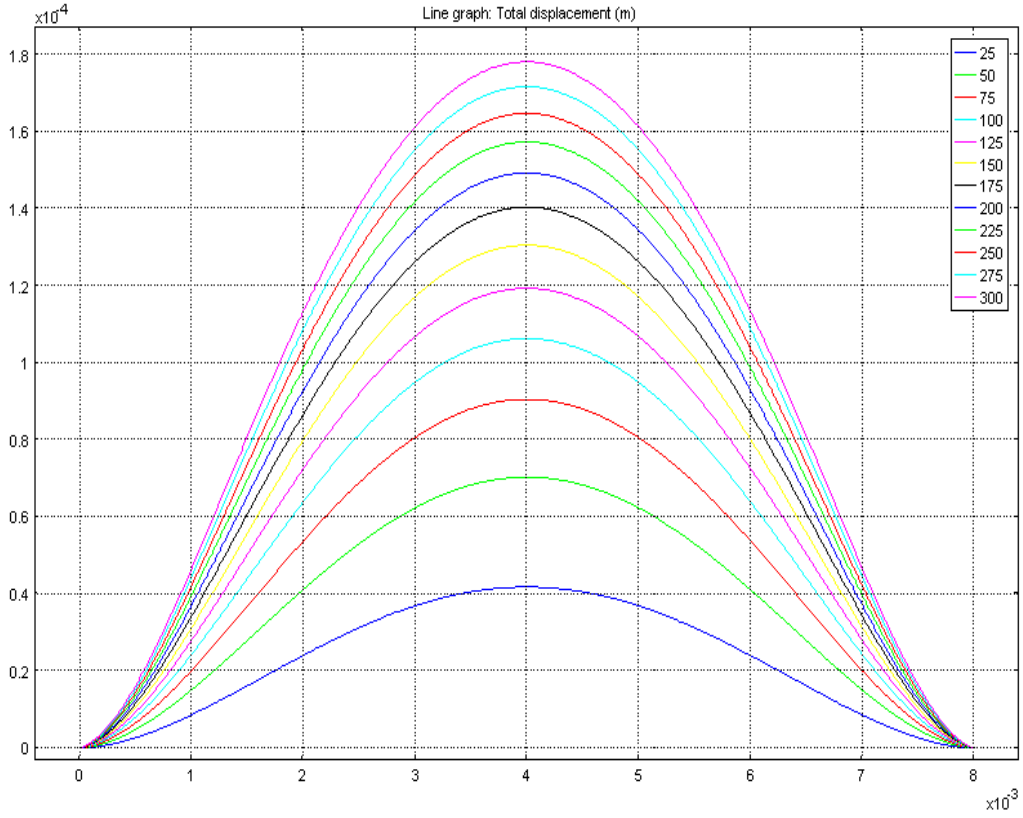


**Obr. 34.:** Tlakový senzor s vytvořenými zlatými elektrodami vakuovým napařováním.

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.34. Testování senzoru bylo realizováno jeho umístěním do exikátoru a měřeno pomocí vodního sloupce.

### 5.1.1 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.




**Obr. 35.:** Graf velikosti průhybu substrátu u tlakového senzoru v místě dutiny.

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.35.

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.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \tag{1.7}$$

kde $\varepsilon_0$ permitivita vakua
$\varepsilon_r$ udává relativní permitivitu dielektrika
*S* je plocha elektrod
*d* jejich vzdálenost

Protože elektrody jsou umístěny na povrchu substrátu, bylo nutné do výpočtu zahrnout i hodnotu dielektrika samotného substrátu nízkoteplotní keramiky. Výsledná rovnice lze vyjádřit:

$$C = \varepsilon_0 S \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \tag{1.8}$$

kde $\varepsilon_1$ udává permitivitu jednoho dielektrického materiálu
$\varepsilon_2$ udává permitivitu druhého dielektrického materiálu
$d_1$ tloušťku jednoho dielektrika
$d_2$ tloušťku druhého dielektrika
*S* udává plochu elektrod

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 $d_{průhyb}$ udává velikost průhybu v nejnižším bodě pásku nízkoteplotní keramiky. Velikost dutiny byla 200 μm. Tato hodnota udává vzdálenost pásku bez zatížení. Při zatížení, je výsledná vzdálenost dána rozdílem prostoru dutiny a průhybu keramického pásku. Výpočet kapacity tlakového senzoru, pro jednotlivé hodnoty průhybu je uveden v tab.8.

**Tab. 8.:** Závislost změn kapacity na průhybu substrátu.

| tlak [kPa] | 100 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{průhyb}$ [μm] | 0 | 45 | 77 | 98 | 114 | 127 | 149 | 159 | 167 | 175 |
| $D_{přep}$ [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 |

### 5.1.2 Měření senzoru tlaku

Pro porovnání výsledků simulací bylo provedeno měření na vytvořených vzorcích. U tlakového senzoru s elektrodovým systémem vyrobeným tlustovrstvé 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.

**Zhodnocení výsledků při konstrukci a měření tlakového senzoru**

Jedno z dalších aplikačních možností nízkoteplotně vypalované keramiky je konstrukce různých tlakových senzorů pracující převážně na principu deformace substrátu a změny kapacity. Byl proveden návrh senzoru v technologii LTCC s různým uspořádáním elektrodového systému. Kromě jejich uspořádání byl řešen i způsob jejich výroby, který je rozhodující z hlediska pružnosti pásku nízkoteplotní keramiky. Bylo zjištěno, že při použití technologie TFT dochází k snížení pružnosti pásku a mohou se vyskytnout různé defekty v podobě prasklin, které je nutné odstranit upravením laminačních parametrů. Při měření bylo zjištěno, že senzor tlaku s elektrodovým systém vyrobeným v TFT je vhodnější pro vyšší tlaky.

Lepších výsledků bylo dosaženo vytvořením elektrod napařením tenké vrstvy zlata v místě dutiny. Měření senzoru s elektrodovým systémem vyrobeným vakuovým napařováním bylo provedeno pomocí ekzikátoru a vodního sloupce. Kapacita senzoru bez zatížení byla zjištěna 15 pF a při maximálním tlaku 200 kPa došlo k nárůstu až na 17 pF. Získané výsledky z měření byly porovnány se simulací. Hodnoty se mírně lišily. Hodnota kapacity senzoru bez zatížení byla 12,2 pF a při tlaku došlo ke zvýšení na 13,7 pF.

Tlakový senzor vyrobený v technologii LTCC, v tomto uspořádání je možné použít pro měření malých tlaků do hodnoty 200 kPa.

## 5.2 Pouzdro pro čip modulátoru terahertzových vln

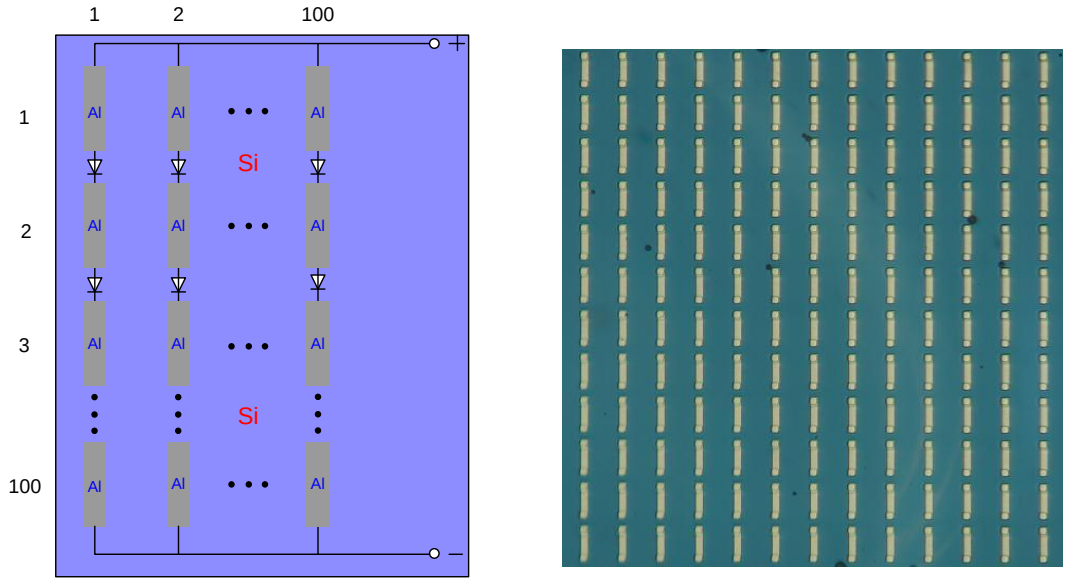
Terahertzové vlny se nacházejí ve spektru mezi mikrovlnným a infračerveným zářením. Frekvenční pásmo elektromagnetického vlnění je 0,3 – 10 THz, což odpovídá vlnovým délkám 1 mm až 30 μm.

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. 36. [91], [42], [43].

Čip terahertzové mřížky bylo nutné zapouzdřit, 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.




**Obr. 36.:** Struktura modulátoru pro THz vlny na obrázku A, aktivní část čipu – fotografie pořízena na reálném vzorku obrázek B.

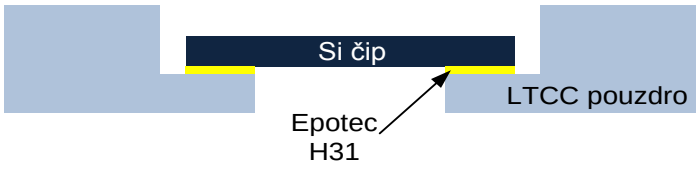
Technologie LTCC byla zvolena z následujících důvodů:

1) V nízkoteplotní keramice je možné vytvářet jak dutiny, tak vodivé vrstvy.
2) dobrý odvod tepla, možnost vytvoření přístupu optického signálu z obou stran čipu a zároveň jeho pevné, tepelně vodivé spojení s pouzdrem.
3) Využití komerčně vyráběných keramických pouzder není možné, protože byl požadován optický přístup na spodní i horní stranu čipu, což je v podstatě nestandardní požadavek pro pouzdra čipů [89].

Pouzdro modulátoru terahertzové mřížky se skládalo z těchto částí:

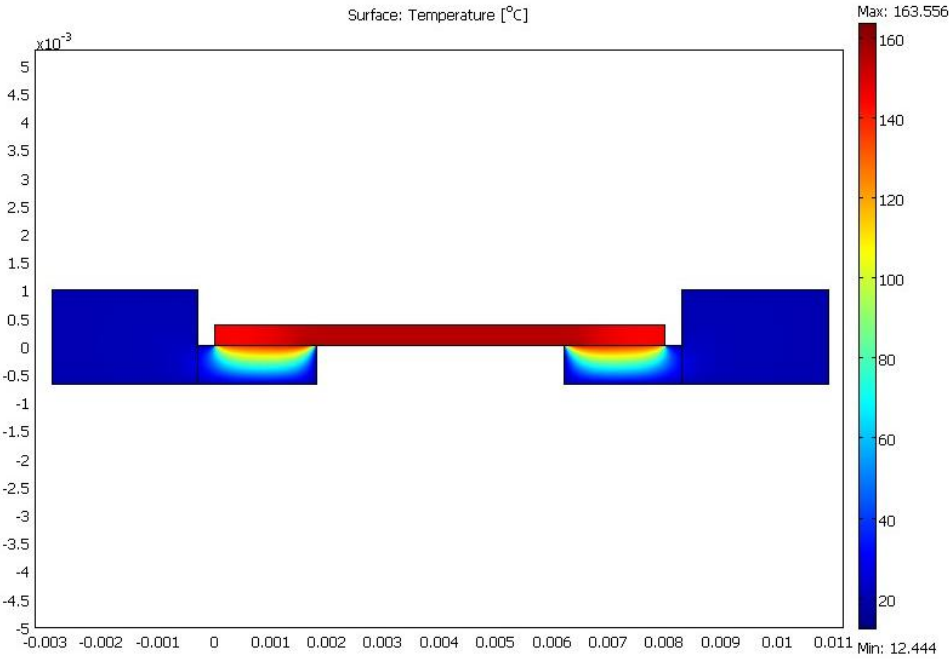
- **Lůžko pro uložení čipu**

Lůžko pro čip z důvodu mechanické pevnosti bylo složeno ze dvou pásků 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.




**Obr. 37.:** Upevnění čipu modulátoru THz vln k pouzdru teplotně vodivým tmelem Epotec H31

Připevnění čipu velikosti 8 x7 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.37.




**Obr. 38.:** 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, které jsou uvedeny v tab.9. 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 pouzdrem klesla jen na hodnotu 143 °C viz. obr.38.

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

**Tab. 9.:** Parametry materiálů pro simulaci odvodu tepla z čipu pro THz modulátor.

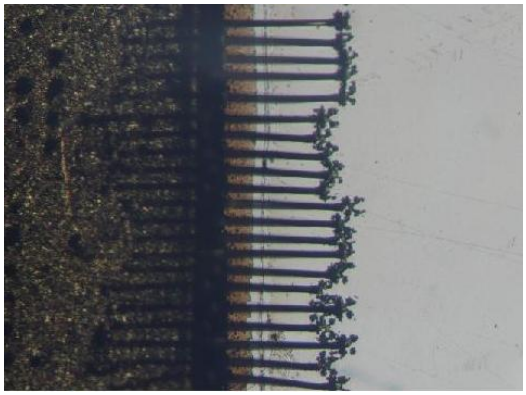
| materiál | tepelná vodivost [W / mK] | hustota [kg / $m^3$] | tepelná kapacita [J / kgK] |
|---|---|---|---|
| HeraLock 2000 | 3,3 | 2900 | 800 |
| Si čip | 130 | 2329 | 700 |
| Epotec H31 | 1,1 | 1900 | 860 |

- **Kontakty pro připojení mikrodrátků**

Připojení čipu k vývodům pouzdra bývá většinou realizováno pomocí mikrodrátků nebo mikropásku. Volba závisí na výkonovém zatížení čipu. [46] 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 míkrodrátky.

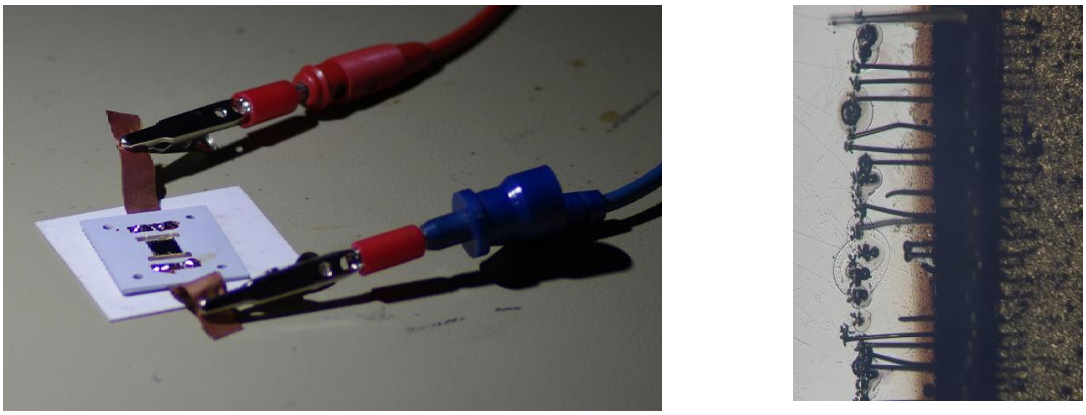
Délka mikrodrátku propojující čip a pouzdro by měla být co nejkratší, aby bylo možné dosáhnout co největší proudové zatížitelnosti. Z tohoto důvodu, byla vodivá

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 přívodních měděných pásků. Ochrana vrstvy tímto způsobem umožní dostatečný odvod tepla a ochranu vrstvy před tepelným průrazem. Nakontaktování čipu mikrodrátky je uvedeno na obr.39.



**Obr. 39.:** Nakontaktování čipu mikrodrátky.

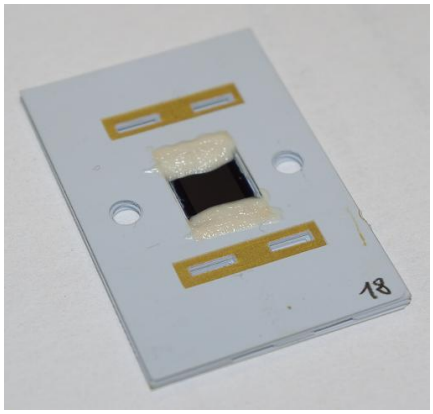
Celkový proud strukturou je daný požadovanou proudovou hustotou, plochou jedné diody a počtem sloupců. Při stávajících rozměrech struktury a počtu sloupců 150 vychází z modelových výpočtů proudu celkový proud $I_C$ = 15 mA. Při požadavku na vyšší koncentraci nosičů v sepnutém kanálu (odpovídající proudové hustotě až 10 kA cm$^2$) může být tento proud zvýšen až k hodnotám kolem 150 mA [19]. Pro zajištění velkého proudu je však potřebné výrazně zvýšit řídící 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.



**Obr. 40.:** Testování proudové zatížitelnosti mikrodrátků (vlevo), pohled na zničené mikrodrátky při překročení jejich proudové zatížitelnosti (vpravo).

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. Ukázka měření připojeného čipu a přepálené mikrodrátky jsou na obr.40.

Proudová zatížitelnost mikrodrátku je mnohem vyšší, než bylo zjištěno. Z měření je tedy zřejmé, že došlo k tepelnému průrazu, který je patrný z obrázku, kde se na konci drátků vytvořily malé kuličky vlivem jejich roztavení. 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.

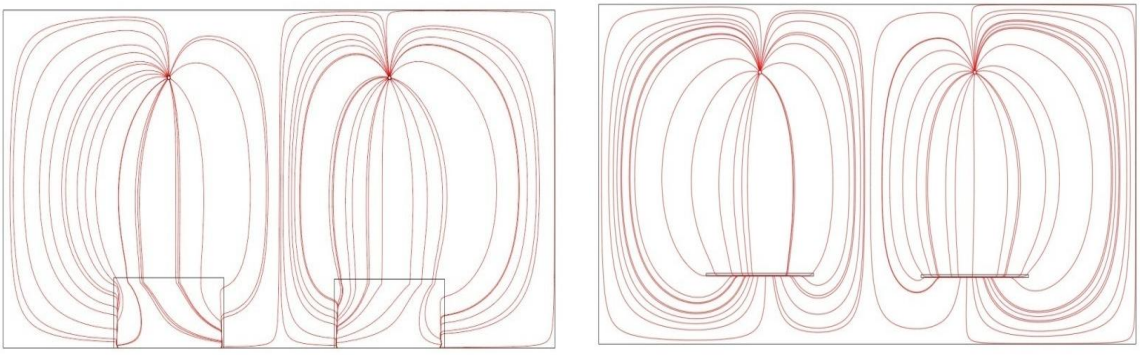


**Obr. 41.:** Pouzdro vyrobené v technologii LTCC s ochranou mikrodrátku tmelem Epotec H31.

Chráněné kontakty byly následně testovány a bylo dosaženo uspokojivých výsledků, a to krátkodobým kontinuálním proudovým zatížením 10 A. Pouzdro vyrobené v technologii LTCC s ochranou mikrodrátku před mechanickým a tepelným poškozením je uvedeno na obr.41.

- **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.

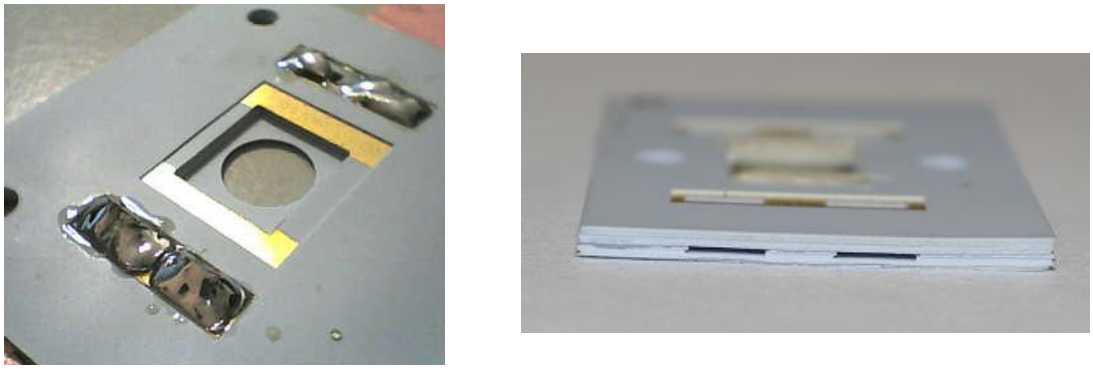


A B

**Obr. 42.:** 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. Dalším problémem by mohlo být připojení pod páskem, kde by muselo dojít k velkému prohřátí plošky. Pájka je velmi agresivní k tomuto druhu past, a pokud by došlo k jejímu značnému zahřívání po delší dobu, pájka by vrstvu zlata absorbovala do sebe.

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



A B

**Obr. 43.:** Kontakt v keramickém pouzdru: A) připájení měděného pásku na vrstvě, B) mikrokanálky ve struktuře pro vedení měděného pásku.

Rozložení proudové hustoty v místě kontaktu bylo simulováno v programu Comsol Multiphysics. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obr.42.

Vedení měděného pásku ke kontaktům pouzdra muselo být realizováno pomocí mikrokanálků vytvořených ve struktuře pouzdra. Tento způsob umožňuje využít spodní stranu pouzdra pro připevnění k chladiči a tím nedochází k zmenšení efektivní plochy pro chlazení. Připájené měděné pásky a mikrokanálky určené k jejich vedení ke kontaktu je uvedeno na obr.43. [77], [76].

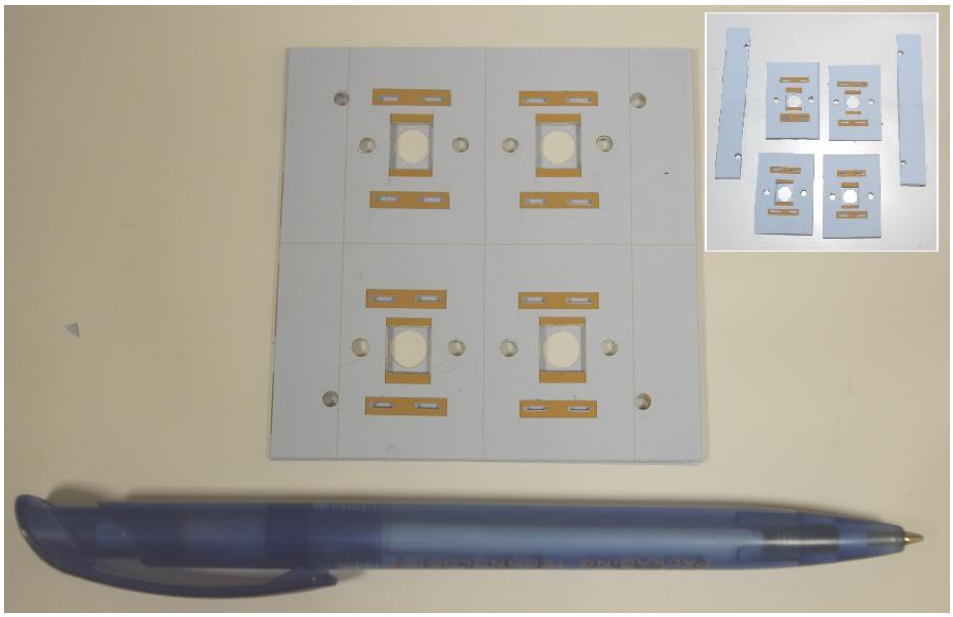
- **Plocha pro upevnění chladiče**

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. 44.:** 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 měřením. Na obr.44 je uvedeno keramické pouzdro s vloženým čipem a měděnými pásky pro připojení do elektrického obvodu přípravku.



**Obr. 45.:** Způsob výroby více struktur, v rámci jednoho celku, při použití šablony větších rozměrů.

Testování prototypů zařízení se většinou neobejde bez většího množství vyrobených vzorků. I tuto situaci lze elegantně řešit s využitím technologie LTCC a to použitím šablony většího rozměru. Výsledná struktura obsahuje větší množství opakujících se motivů, které jsou na závěr procesu děleny rozlomením nebo rozřezáním. Ukázka způsobu výroby více struktur v rámci jednoho celku, při použití šablony o rozměrech 82 x 82 mm je na obr.45.

## Zhodnocení dosažených výsledků při konstrukci pouzdra modulátoru

Pouzdra pro modulátor terahertzových vln bylo vytvořeno v technologii LTCC, která nabízí možnost vytváření různých tvarů zařízením nízkého výkonu. Při konstrukci pouzdra byl řešen přístup optického signálu k horní i spodní straně čipu a jeho přilepení pomocí tepelně vodivého tmelu Epotec H31. Dále bylo řešeno propojení čipu a keramického pouzdra pomocí mikrodrátků. Pro dostatečnou proudovou zatížitelnost bylo stanoveno, že bude nutné nakontaktovat 50 mikrodrátků na jeden kontakt.

Celkový proud struktury by za běžný provozních podmínek neměl překročit $I_C$ = 150 mA. V případě, kdy doje k překročení teploty nad 150 °C se mřížka chová jako zkrat a maximální proud je dán proudovým omezením zdroje. Pak strukturou může krátkodobě protékat proud 10 A, který ovšem nepoškodí strukturu terahertzové mřížky. Při větším proudovém zatížení modulátoru dochází k přílišnému ohřátí mikrodrátků, a tím k tepelnému průrazu. Z tohoto důvodu byly mikrodrátky zality do tmelu EPOTEC, který zajistí odvod tepla a současně chrání propojení před mechanickým poškozením.

Dále bylo řešeno vytvoření kontaktu pro snadnou výměnu keramického pouzdra. Bylo navrženo připojení pomocí měděných pásků a do obvodu budou upevněny pomocí šroubu M3. Pro připojení pásku k pouzdru byly navrženy dva způsoby. Přiložením pásku na vodivou vrstvu nebo jeho průchodem skrz pásek nízkoteplotní keramiky a připájením na vodivou vrstvu. Aby bylo zajištěno optimální rozložení proudové

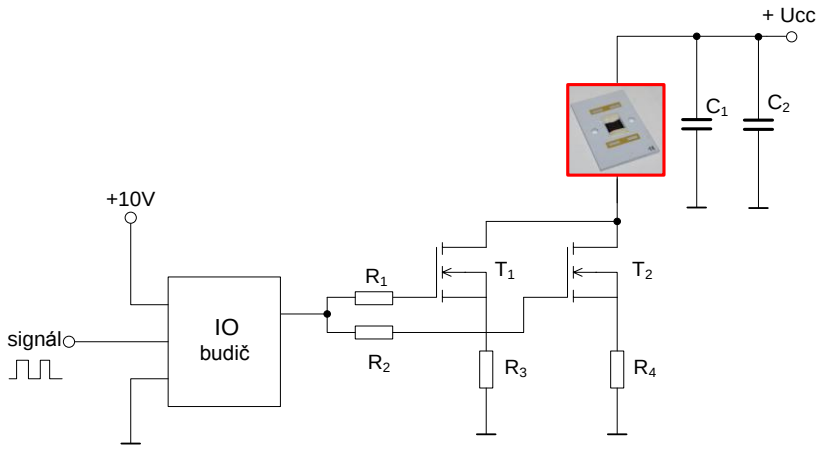
hustoty, byla provedena simulace v programu Comsol. Z výsledků bylo zřejmé, že k rovnoměrnému rozložení dochází u kontaktu, který prochází skrz vrstvu. Vedení měděných pásků pro připojení kontaktu skrz vrstvu muselo být provedeno v mikrokanálcích, aby nedošlo k zmenšení plochy pro připevnění chladiče z druhé strany pouzdra a tedy k snížení efektivní plochy určené pro chlazení.

Při konstrukce pouzdra modulátoru byly využity získané zkušenosti a poznatky, které byly popsány v kapitole optimalizace výrobního procesu. V této práci byl uveden pouze prototyp pouzdra, konečná verze bude známa až po sérii měření, kdy budou upřesněny požadavky na pouzdro.

### 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 přiváděný 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.46.



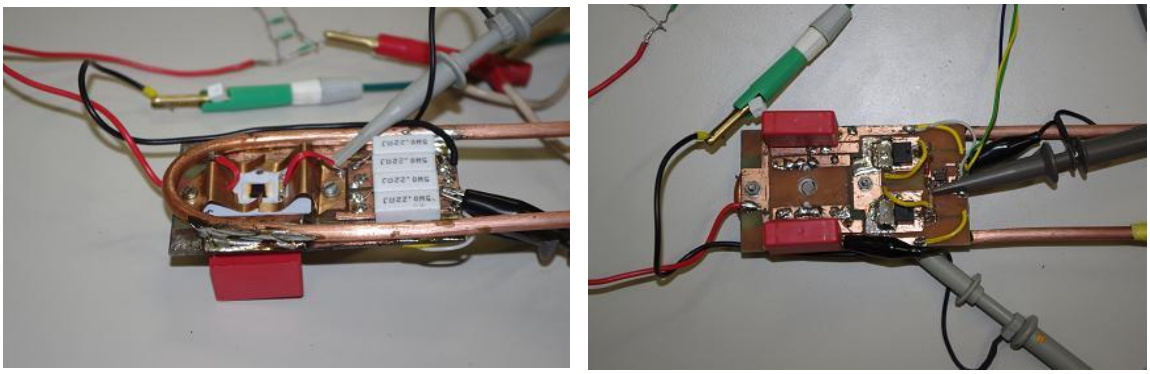

**Obr. 46.:** Zapojení elektronické části modulátoru terahertzové mřížky.

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.

Měřící 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 řídící elektroniku modulátoru. Měřící přípravek pro měření na modulátoru je uveden na obr.47. V současném uspořádání, je možné uchladit 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.38.

Pro proud Ic = 15 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.



A B

**Obr. 47.:** Vytvořený přípravek pro testování modulátoru terahertzové mřížky A) strana s přidělaným pouzdrem, B)s řídícím obvodem a spínacími tranzistory.

Příklad okamžitých proudů v závislosti na řídicím napětí pro délku pulzu 5 μs je v tabulce Tab. 10. Při kmitočtu 10 kHz byla doba periody 100 μs a činitel plnění použitý pro stanovení středního ztrátového výkonu je 5 %.

**Tab. 10.:** Závislost celkového proudu $I_c$ , středního ztrátového výkonu $P_S$ a teploty čipu T při použití vodního chlazení na řídicím / napájecím napětí Ucc; $t_p$ = 5μs, f = 10 kHz, činitel plnění pro výpočet středního výkonu je 5%.

| Ucc [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 [°C] | 31 | 50 | 69 | 86 | 95 | 114 |

Závislost oteplení čipu na šířce budících pulzů byla měřena pro Ucc = 300 V a opakovacím kmitočtu f = 10 kHz. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab.11.

**Tab. 11.:** Závislost teploty čipu T [°C] na šířce budicích pulzů pro f = 10 kHz : Ucc = 300 V, $I_C$ = 320 mA, $P_M$ = 96 W

| $t_{pulz}$ [μs] | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pdstř [%] | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $P_S$ [W] | 2,88 | 3,84 | 4,8 | 5,76 | 6,73 | **7,68** |
| T [°C] | 70 | 90 | 114 | 123 | 132 | **>150** |

Výsledky získané z měření ukázaly, že při prodloužení impulzu na 8 μs 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.

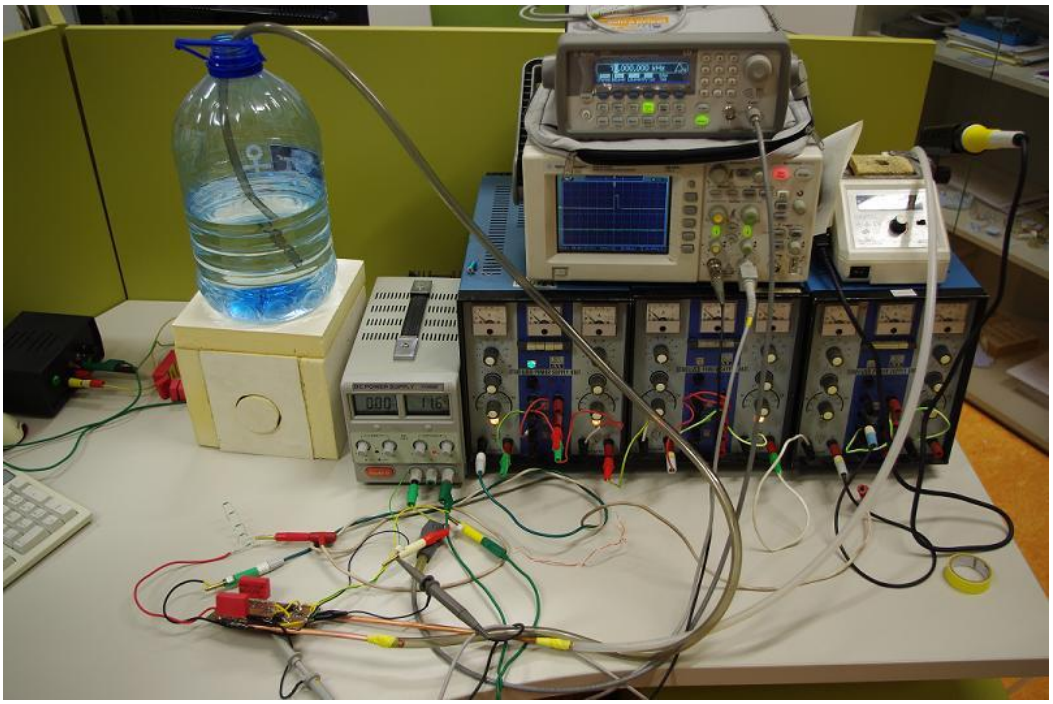
**Tab. 12.:** Závislost teploty čipu T [°C] na době sepnutí $t_{pulz}$ a změně opakovacího kmitočtu v rozsahu v rozsahu 20 kHz až 65 kHz : Ucc = 300 V, $I_S$ = 320 mA, $P_M$ = 96 W

| | délka pulzu $t_{pulz}$ = 3 µs ; $P_M$ = 96 W | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| f [kHz] | 20 | 25 | 30 | | |
| t [µs] | 50 | 40 | 33 | | |
| Pdstř [%] | 6 | 7,5 | 9,1 | | |
| $P_S$ [W] | 5,7 | 7,2 | 8,7 | | |
| T [°C] | 130 | 133 | 147 | | |
| | délka pulzu $t_{pulz}$ = 2 µs ; $P_M$ = 96 W | | | | |
| f [kHz] | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| t [µs] | 33,3 | 28,6 | 25 | 22,2 | 20 |
| Pdstř [%] | 6,1 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10 |
| $P_S$ [W] | 5,7 | 6,7 | 7,6 | 8,6 | **9,6** |
| T [°C] | 100 | 125 | 140 | 145 | **>150** |
| | délka pulzu $t_{pulz}$ = 1.5 µs ; $P_M$ = 96 W | | | | |
| f [kHz] | 40 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| t [µs] | 25 | 20 | 18,8 | 16,6 | 15,4 |
| Pdstř [%] | 6,0 | 7,5 | 8,2 | 9,0 | 9,7 |
| $P_S$ [W] | 6,72 | 7,2 | 7,84 | 8,64 | **9,28** |
| T [°C] | 91 | 111 | 136 | 130 | **>150** |

**Tab. 13.:** Závislost teploty čipu na opakovacím kmitočtu pulsů při $t_{pulzu}$ = 400 ns: $P_M$ = 96 W, 30 W a 12,6 W; pro zachování srovnatelného středního výkonu při narůstání četnosti pulzů, byl pulzní výkon postupně snižován.

| | Napětí Ucc = 210 V ; $P_M$ = 59 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 Ucc = 150 V ; $P_M$ = 30 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 Ucc = 90 V ; $P_M$ = 12,6 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. Obrázek celého pracoviště pro měření vlastností modulátoru pro terahertzové vlny je uvedeno na obr.48.



**Obr. 48.:** Pracoviště pro testování modulátoru terahertzové mřížky.

## Zhodnocení výsledků měření na modulátoru terahertzových vln

Účinnost chlazení modulátoru terahertzových vln byla testováno v závislosti na šířce budícího pulzu, opakovacího kmitočtu a velikosti napájecího napětí. Základním požadavkem pro všechna měření bylo, že teplota čipu nesměla překročit teplotu 150 °C. Bylo zjištěno, že je možné spolehlivě uchladit ztrátový výkon kolem 5 W, je to dáno především velmi malou plochou, určenou pro chlazení. Simulace v programu Comsol poskytla výsledky pro ověření šíření tepla z čipu modulátoru do keramického pouzdra. Teplota čipu byla nastavena 150 °C a v místě kontaktu s pouzdrem hodnota klesla na 143 °C. Simulace ukázala, že nebude možné uchladit příliš velké výkony, tento výsledek potvrdilo následné měření na reálném vzorku.

V prvním měření byla zjišťována závislost oteplení čipu na napájecím napětí při opakovacím kmitočtu f = 10 kHz a délce pulzu $t_{pulz}$ = 5 µs. Střední hodnota výkonu byla vypočítána 4,8 W při teplotě 114 °C. Dále byla měřena závislost délky pulzu na oteplení čipu při napájení Ucc = 300 V a opakovacím kmitočtu f = 10 kHz. Při prodloužení pulzu na dobu 8 µs došlo k přílišnému ohřátí čipu a modulátor musel být okamžitě vypnut, aby nedošlo k jeho zničení. Další série měření odhalila, že při dostatečně krátkém pulzu je možné zvýšit kmitočet budícího signálu a stejného efektu lze také dosáhnout snížením napájecího napětí. Z tohoto důvodu bylo provedeno poslední měření s nastavenou šířkou $t_{pulzu}$ = 400 ns a změnou hodnoty napájecího napětí a kmitočtu opakovacího pulzu.

Ze získaných výsledku je zřejmé, že zkrácením budícího pulzu teplotní ztráty čipu mírně klesají. To odpovídá modelu, kdy je zapotřebí strukturou protlačit dostatečný náboj, pro uvedení matice diod do stavu sepnuto. Protože při velmi krátkých pulzech

dochází převážně k nabíjení parazitních kapacit, jsou ztráty v obvodu výrazně nižší než při kvazistatickém režimu, do kterého se struktura dostává při déletrvajícím sepnutí.

## 5.3 Elektrodový systém pro výboj s dielektrickou barierou

Výroba ozónu ze vzduchu je nepochybně nejčastější použití výboje s dielektrickou bariérou.

Aplikace výbojů s dielektrickou bariérou v dalších oblastech:

1) Excimerové výboje pro generování spektrálně definovaného záření – používá se pro generaci laserového záření pod označením excimerové lasery. Umožňuje vytvářet nanosekundové pulzy o výkonu 50 – 200W s možností fokusace na stopu až 0,01 μm.
2) Ošetření povrchu čištěním – odstraňuje nečistoty založené na uhlovodících a silikonech.
3) Změna smáčivosti u textilních vláken – lze měnit smáčivost od hydrofilní až po hydrofobní stav. Kvalita je zjišťována měřením kontaktního úhlu na rozhraní kapalina pevná látka.
4) Ošetření povrchu před aplikací nátěru a lepidel – aktivování povrchu dochází k značnému zvýšení adheze. Na takto upravené povrchy se nanášejí lepidla, inkousty, povlaky a barvy, které vykazují mnohem lepší výsledky než použitím tradičních předúprav povrchů.

### 5.3.1 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 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.

### 5.3.2 Vlivy a děje působící na výslednou produkci ozónu

Kromě generování ozónu v ozonizátoru vždy také dochází k jeho dekompozici. Vysokou koncentraci lze tedy dosáhnout pouze potlačením mechanizmů, které k tomuto procesu vedou. Energie dodávaná do výboje a velikost průtoku plynu mají zásadní vliv na produkci ozónu a jeho koncentraci. Při zmenšování průtoku plynu se snižuje účinnost generace a roste dosažitelná koncentrace.

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím generaci ozónu je výkonová ztráta. Při zvýšené teplotě, totiž dochází k rozkladu ozónu a snižování účinnosti. Pro dosažení maximálního výkonu je nutné, provádět chlazení a pro každý systém je nutné nalézt teplotu, nad kterou účinnost generace prudce klesá.

### 5.3.3 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
- použitém pracovním plynu
- typem dielektrického materiálu

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

**Tvar** elektrod je velmi rozhodující pro množství generovaného ozónu. Nejvhodnějším řešení se zdá být použití interdigitálních elektrod. V tomto případě velmi dobře dochází k uzavírání elektrického pole mezi jednotlivými prsty a tím ke generaci ozónu v souvislé ploše.

**Počet** elektrod, který bývá většinou značný a jejich malá vzdálenost zvyšuje kapacitu elektrodového systému. Z tohoto důvodu je energie v jednotlivých mikrovýbojích poměrně malá. Proto je výhodnější využívat rezonančních kmitů, kde je dosaženo potřebného výkonu, při buzení v kmitočtové oblasti 4 – 15 kHz.

**Materiál** elektrod má rozhodující vliv na účinnost generace ozónu. Pro elektrodový systém je nutné použit materiál, který je odolný proti oxidaci, protože ozón je velmi silné oxidační činidlo. V některých případech se nabízí i možnost použití různých povrchových úprav.

### 5.3.4 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.

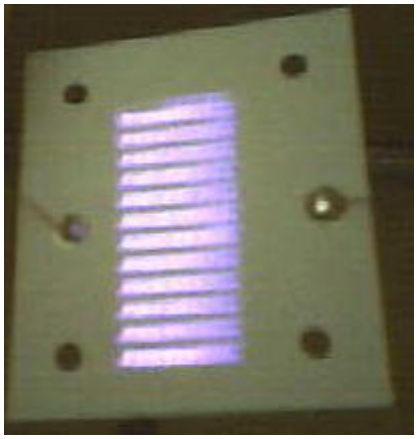
Tímto způsobem může být vyroben elektrodový systému, který je uzavřený mezi dvěma keramickými substráty. Dielektrikem v tomto případě bude elektrický substrát a elektrody umístěny uvnitř struktury budou tímto substrátem chráněny před silnými oxidačními účinky ozónu. Další výhodou je velmi dobrá tepelná 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.49. 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.

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.



**Obr. 49.:** Generace ozónu v technologii LTCC.

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.

### 5.3.5 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 naneseny 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 tlustovrsvou 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 umístěnu 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 – vyznačující se nízkou teplotou výpalu (525 °C) a také nízkou hodnotou průrazného napětí. Tloušťka vrstvy se v katalogových listech neuvádí. Pasta byla použita od firmy **ESL** s označením **4771 - P2**.

b) Multivrstvová dielektrická – dielektrická pasta vyznačující se vysokou teplotou výpalu (850 °C). Tloušťka dvou vrstev se uvádí, že je větší než 38 μm a elektrická pevnost při 25 μm je udávána 650 Vss. Při práci byla použita pasta, opět od firmy **ESL** s označením **4905 - CandCH**.

Při testování byly interdigitální elektrody vždy pokryty jednou a následně dvěma ochrannými vrstvami. V případě ochranné skelné pasty nebylo dosaženo dobrých výsledků ani vytvořením dvou vrstev. Dříve došlo k průrazu než ke generaci ozónu. Mnohem lepších výsledků bylo dosaženo s multivrstvovou dielektrickou pastou viz. obr.50.



**Obr. 50.:** Generace ozónu na substrátu $Al_2O_3$ s ochranou elektrod křemičitou izolační vrstvou.

Zápalné napětí pro povrchový výboj bylo zjištěno 2,7 kV. Výboj hořel po celém povrchu, ale tvořily se místy kanálky s větší intenzitou, které zvyšovaly účinnost generátoru. Tím, že se jedná o keramický substrát, dochází při zapálení výboje k dobrému odvodu tepla. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že generace bude dlouhodobější beze změny elektrických parametrů. Technologie výroby není příliš složitá, nevýhodou ovšem zůstává, velká hodnota zápalného napětí a skutečnost, že povrchová úprava nezajistí dlouhodobější provoz.

### 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. Nejnižší 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.

**Zhodnocení výsledků vyrobeného generátoru ozónu**

Generátor ozónu vyrobený v technologii LTCC nabízí velmi efektivní způsob řešení. Při výrobě ozónu lze využít velmi dobrých vlastností hermeticky uzavřené 3D keramické struktury, jako je například mechanická, elektrická a chemická odolnost. Tyto vlastnosti se pozitivně projevují při životnosti elektrod určených pro generaci ozónu. Další výhodou je, že výboj hoří po obou stranách a dochází tím k nárůstu množství vygenerovaného ozónu. Zápalné napětí bylo zjištěno 1,5 kV.

Komerčně vyráběné elektrody nejsou většinou ničím chráněny nebo pouze ochrannou dielektrickou vrstvou, které jak bylo zjištěno, pouze prodlouží životnost generátoru. Výboj většinou hoří pouze z jedné strany a výsledné množství vygenerovaného ozónu je tedy poloviční. Zápalné napětí je určené tloušťkou keramického substrátu.

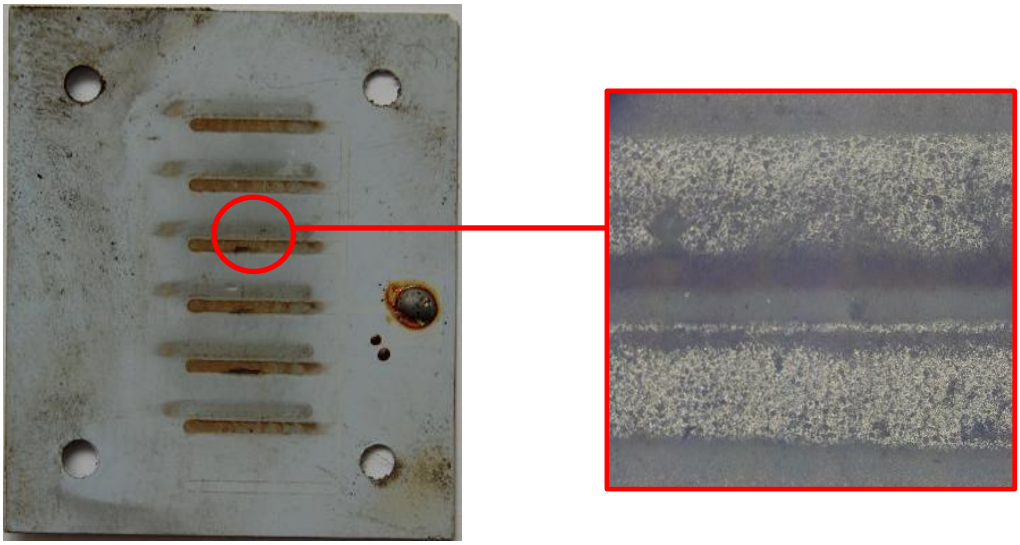
Na keramickém substrátu o tloušťce 0,215 mm byly vytvořeny na protilehlých stranách elektrody v interdigitálním uspořádaní, podle komerčně vyráběných systémů. Zápalné napětí bylo zjištěno 1,2 kV, tato hodnota závisela na tloušťce použité korundové keramiky. Nevýhodou tohoto systému bylo, že výboj hořel v oblasti elektrod a tedy docházelo k jejich silné oxidaci. Z tohoto důvodu byla životnost těchto elektrod omezena.

Další systém byl vyroben s použitím dvou typů tlustovrstvých past od firmy ESL. Na korundové keramice stejné tloušťky, jako v předchozím případě, byl na jedné straně vytvořen systém elektrod. Tyto elektrody byly přetištěny ochrannou vrstvou. V prvním případě byla použita posklívací ochranná vrstva s označením **4771 - P2.** U této pasty ovšem nebylo dosaženo dobrých výsledků. Naopak velmi dobrých výsledků bylo dosaženo s multivrstvovou dielektrickou pastou s označením **4905 - CandCH**. U této pasy byla zjištěna hodnota zápalného napětí 2,7 kV. Kvalita generace byla velmi dobrá, Ochrana elektrod dielektrickou vrstvou pouze prodlouží životnost elektrod, ale prodloužení nebude příliš výrazné. Vytvořené elektrodové systémy byly testovány z hlediska délky provozu. Souhrn jednotlivých parametrů je uveden v Tab.14.

**Tab. 14.:** Porovnání výsledků technologie LTCC s křemičitou izolační vrstvou.

| vzorek | zapálení výboje Zv [kV] | životnost | kvalita generace |
|---|---|---|---|
| Dielektrikem $Al_2O_3$ substrát | 1,2 | středně dlouhá | pouze kolem elektrod |
| $Al_2O_3$ s ochrannou skelnou vrstvou | 1,6 | žádná | bez generace |
| $Al_2O_3$ 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 |

Nejlepších 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. Délka provozu generátoru se projevila změnou barvy v místě elektrod a mezi nimi. Tato změna je zobrazena na obr.51A.



A B

**Obr. 51.:** Generátor ozónu vyrobený v LTCC po 6 měsíčním provozu A) celý elektrodový systém B) detailní část s opotřebeným povrchem.

**Tab. 15.:** Analýza složení generátoru vyrobeného v LTCC před a po 6-ti měsíční generaci ozónu.

| Prvky | Zastoupení jednotlivých prvků v materiálu v generátoru ozonu [%] | |
|---|---|---|
| | před generací | po 6-ti měsíčním provozu |
| Al | 52,47 | ND |
| Si | 35,88 | ND |
| Ti | 9,27 | 5,49 |
| V | 1,71 | 1,38 |
| Mn | 0,10 | 0,16 |
| Co | 0,263 | 0,21 |
| Zn | 0,285 | ND |
| Bi | 0,022 | 0,018 |
| Pb | 0,023 | 0,021 |
| Ag | 4,28 | 4,23 |
| LE | ND | 87,20 |

Povrch substrátu v místě elektrodového systému byl zkoumán pomocí mikroskopu viz obr.51B. Obrázek naznačuje, že vlivem působení agresivního ozónu došlo k difuzi stříbrné vrstvy na povrch, nebo k rozšíření pórů nízkoteplotně vypalované keramiky. Aby bylo možné lépe pochopit, k čemu došlo na povrchu substrátu, byl vzorek měřen pomocí rentgenového fluorescenčního spektrometru před použitím a po 6-ti měsíčním provozu porovnán a provedena analýza jednotlivých prvku. Výsledek je zobrazen v tab. 15. Z výsledků uvedených v tabulce je zřejmé, že některé materiály zůstaly beze změny procentuálního zastoupení. Po generaci byl velmi málo detekován hliník, křemík a zinek, ale vyskytly se lehké složky v zastoupení 87,2 %. Může se jednat a sloučeniny oxidu a jiných materiálů, které přístroj vlivem malého množství prvku umístěných v knihovně není schopen rozpoznat.

Ze získaných výsledku je zřejmé, že dochází k opotřebení generátoru ozónu, ale provedené analýzy neposkytly dostatečné výsledky, aby bylo možné stanovit celkovou dobu provozu generátoru. Z tohoto důvodu by bylo vhodnější provést dlouhodobější testování nejlépe až do doby než dojde k zničení elektrodového systému.

## 5.4 Planární obvodové prvky

V dnešní době roste poptávka po zařízeních malých rozměrů, ale velkých výkonů. V těchto zařízení 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 výsledku 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 závitech s šířkou vodiče a mezery 250 μm na konci opatřeny čtvercovou ploškou o velikosti 5 mm. Navržené motivy byly testovány v kapitole 4.3. Ukázka planárních cívek je uveden na obr.52.



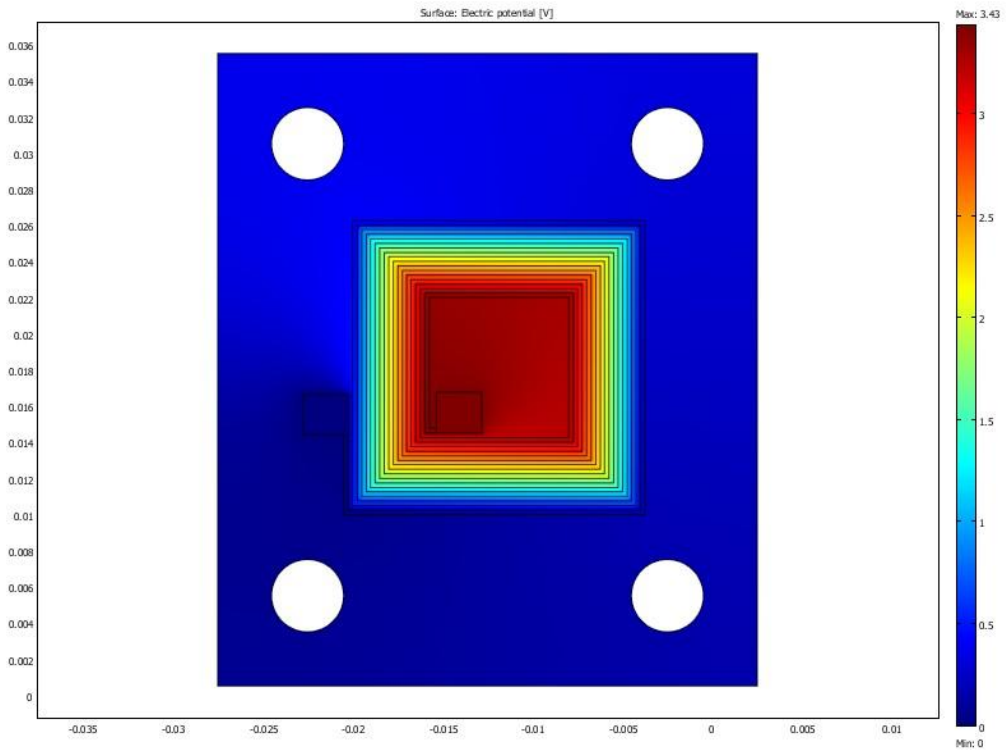
**Obr. 52.:** Planární cívky vyrobené v technologii LTCC vlevo C1 a vpravo C2.

### 5.4.1 Planární cívka 2D – statická analýza

Pro výpočet indukčnosti planární cívky byl použit AC/DC modul a statický typ analýzy, který řeší planární cívku po ustálení přechodového jevu a bez změny kmitočtu budícího portu. Model planární cívky byl nakreslen v programu AutoCad, z kterého byl importován do programu Comsol Multiphysic. Po importu musel být upraven rozměr a relativní tolerance celé geometrie. Následně byly zadány parametry pro simulaci.

Nastavení parametrů pro simulaci planární cívky:

1) Tloušťky jednotlivých materiálů – jedná se o 2D analýzu, ale do výpočtu jsou zahrnuty i parametry třetího rozměru (osy z). Tloušťka substrátu nízkoteplotní keramiky byla 100 μm a nanesené vodivé stříbrné pasty 15 μm. Tyto parametry byly zjištěny po výpalu a odpovídají teoretickým hodnotám uváděných výrobcem.
2) Elektrické vlastnosti materiálů – jako například elektrickou vodivost pro stříbrnou pastu ($\sigma = 61{,}6 \times 10^6$ S / m) a permitivitu pro substrát LTCC HeraLock 2000 ($\varepsilon = 7$).
3) Okrajové podmínky – vymezující vlastnosti jednotlivých materiálu na hranách v případě substrátu byly, nastaveny jako elektrický izolant. Jeden kontakt cívky jako zem, druhý kontakt cívky jako port s nastavenou pevnou proudovou hustotou 1 A a jednotlivé závity cívky jako spojitost (continuity).
4) Rozdělení struktury metodou konečných prvků – na 7369 elementů, protože se jednalo o statickou analýzu, která z hlediska výpočtu není příliš náročná na hardware počítače, bylo možné strukturu rozdělit velmi jemně, a tím získat přesné výsledky.




**Obr. 53.:** Rozložení elektrického potenciálu v planární cívce $C_1$.

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],[15]

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 $C_1$. Spojením cívek $C_1$, $C_2$ lze vytvořit strukturu o velkém množství závitů v několika vrstvách. Spojení jednotlivých vinutí cívek je řešeno vodivým propojení skrz pásek.

Simulace i výpočty byly provedeny i pro tuto druhou cívku. Získané výsledky jsou uvedeny v tab.16. Spojením několika cívek $C_1$, $C_2$ u kterých je známá hodnotu indukčnosti, bude možné následně stanovit výslednou hodnotu indukčnosti celé struktury.

**Tab. 16.:** 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 |

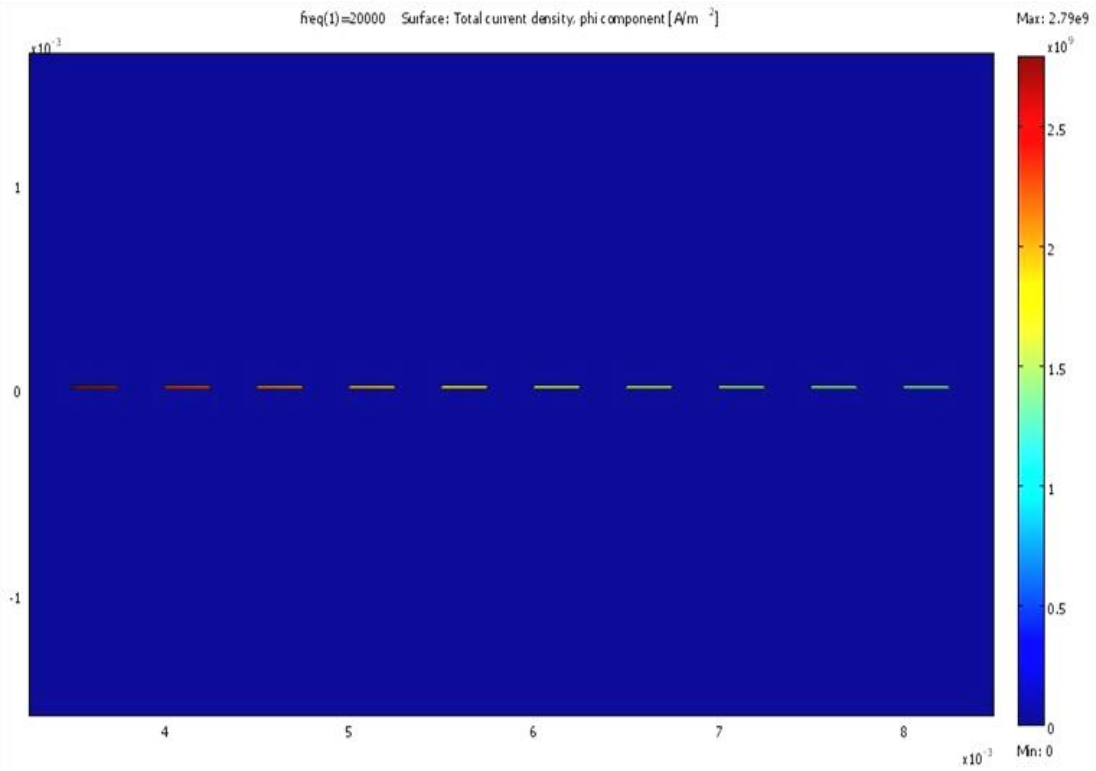
Zjištění hodnoty planární cívky třemi uvedenými způsoby poskytují rychlý a relativně přesný způsob řešení. Simulace indukčnosti pomocí statické analýzy v 2D zobrazení umožňuje výpočet, v kterém se neuplatňují žádné parazitní jevy. Z tohoto důvodu stačí pouze vhodné nastavení okrajových podmínek.

### 5.4.3 Planární cívka v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz

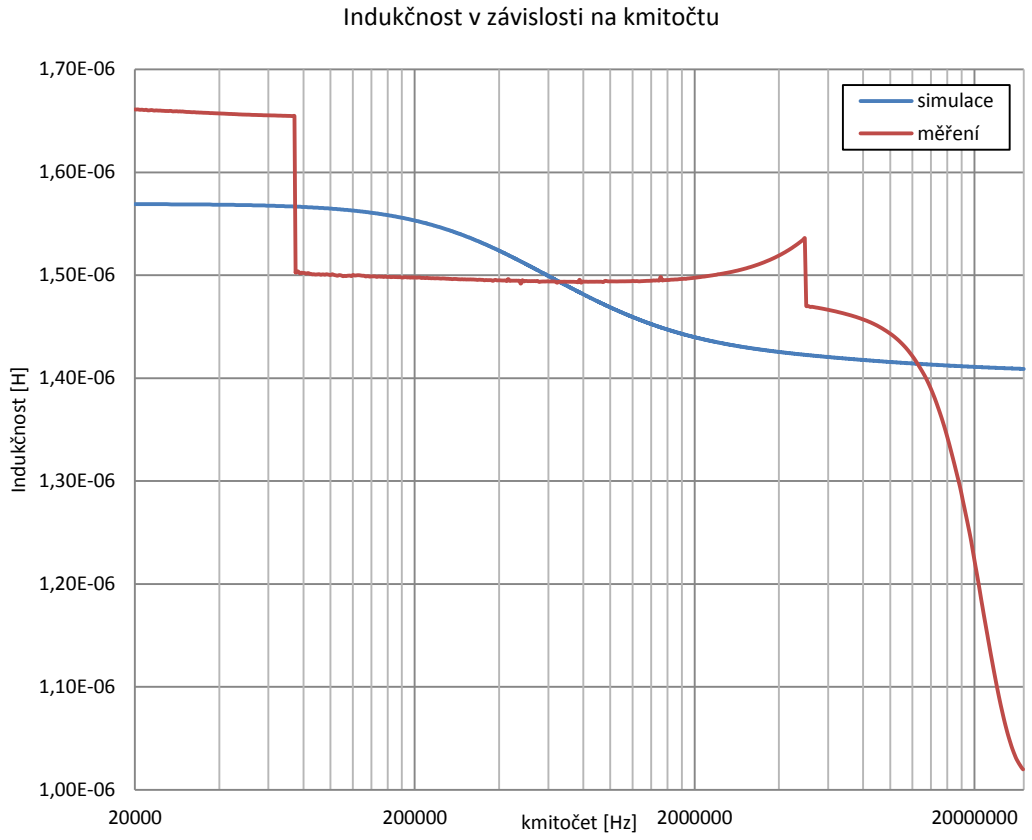
V předcházející kapitole byl řešen statický výpočet planární cívky $C_1$, který umožňuje určit indukčnost při tzv. stejnosměrné analýze. Tento způsob ovšem příliš nevypovídá o vlastnostech cívky, které se mohou měnit se změnou kmitočtu. Tyto změny se vyskytují jen v určitých kmitočtových pásmech, kde vnáší chybu do výsledku. Typickým příkladem je simulace planární cívky v kmitočtovém rozsahu 20 kHz – 30 MHz.

Řešením by mělo být použití časově harmonické analýzy, kde je výsledná indukčnost počítána z rozložení proudové hustoty v jednotlivých závitech planární cívky. Rozložení proudové hustoty v závitech cívky je uvedeno na obr.54. Jedná se o pravou polovinu cívky $C_1$. Model byl vytvořen v 2D axiální symetrii, která neklade velké nároky na výpočet, a tedy je možné hledat řešení v širším intervalu hodnot.

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 vytvořená 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.55. Skoková změna hodnot indukčnosti při měření byla způsobena změnou rozsahu u RLC mostů.




**Obr. 54.:** Rozložení proudové hustoty jedné poloviny planární cívky simulované v axiální symetrii na kmitočtu 20 kHz.




**Obr. 55.:** Porovnání naměřených a simulovaných hodnot planární cívky $C_1$.

### Zhodnocení dosažených výsledků simulace v časově harmonické analýze

Planární cívka $C_1$ o 10 závitech byla simulována v kmitočtovém pásmu 20 kHz - 30 MHz. Z důvodu velké šířky kmitočtového pásma byla planární cívka simulována 2D axiální symetrii. Výsledná hodnota indukčnosti byla zjištěna časově harmonickou analýzou výpočtem z rozložení proudové hustoty ve vinutí cívky. Tento způsob analýzy zahrnuje v řešení i parazitní jevy, které se mohou objevit ve výše zmiňovaném kmitočtovém pásmu. Pro ověření výsledků ze simulací bylo provedeno měření na reálném vzorku.

Získané hodnoty ze simulací a z měření byly vyneseny do grafu pro jejich vzájemné porovnání. V případě měření se vyskytovala skoková změna hodnot, která byla způsobena změnou rozsahu RLC mostu. Hodnota indukčnosti zjištěná měřením na reálné cívce dosahovala hodnoty 1,65 μH a s rostoucím kmitočtem klesala až na hodnotu 1,02 μH. Simulováním cívky byla zjištěna hodnota 1,57 μH a byla snížena na hodnotu 1,41 μH. Získané hodnoty se příliš nelišily až do kmitočtu 14 MHz, kde při měření strmě klesala hodnota indukčnosti. Závěrem lze říci, že simulace poskytuje relativně přesné výsledky až do kmitočtu 14 MHz, kde se začíná objevovat velká odchylka měřené hodnoty od simulované.

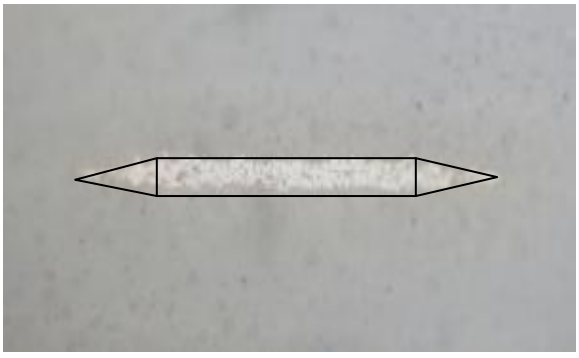
## 5.4.2 Skin a proximity efekt v planárních cívkách

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 prokmity 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.56.



**Obr. 56.:** Jeden závit planární cívky vyrobené v technologii LTCC v řezu (zjištěno výbrusem).

Podle tohoto obrázku byl sestaven model pro simulaci parazitních jevů. Model se skládal z obdélníku doplněného o rovnoramenné trojúhelníky se základnami umístěnými na kratších stranách. Délka obdélníku byla 250 μm a výška každého trojúhelníku 10 μm, což byla hodnota prodloužení šířky závitu na jedné straně. Tloušťka zůstala beze změny 15 μm.

Hloubka vniku pro tři kovy (Cu, Au, Ag) byla vypočítána pro 5 hodnot kmitočtu podle vzorce (1.5). Pro porovnání byla provedena simulace v programovém prostředí Comsol Multiphysic v modulu AC Power Elektromagnetics. Tento model používá při řešení následující rovnic:

$$j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_r \; A + \nabla \times \; \mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times A \; - \sigma v \times \; \nabla \times A \; = \; \frac{\sigma\Delta V}{L} + J_z^e \; \; e_z, \qquad (1.9)$$

kde ω je úhlový kmitočet
$\varepsilon_0$, $\varepsilon_r$ permitivita relativní
$\mu_0$, $\mu_r$ permeabilita relativní
A vektor magnetického potencionálu
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.17. Výsledky simulací a výpočtů se lišily v řádu desetin mikrometrů.

**Tab. 17.:** Vybrané kmitočty a velikost hloubky vniku pro 1 závit planární cívky.

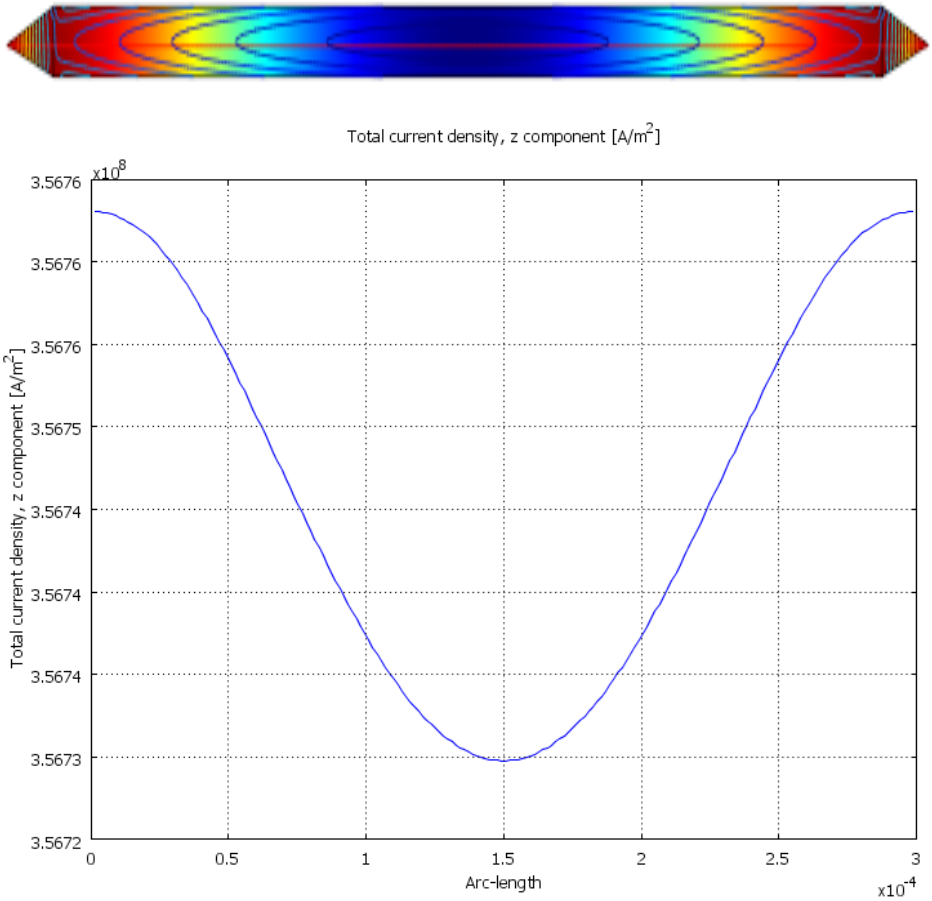
| kmitočet [MHz] | 0,020 | 0,2 | 2 | 20 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\delta_{vypočítaná}$ [μm] pro Ag | 453,1 | 143,2 | 45,3 | 14,3 | 11,7 |
| $\delta_{simulovaná}$ [μm] pro Ag | 453,4 | 143,5 | 45,3 | 14,3 | 11,7 |
| $\delta_{vypočítaná}$ [μm] pro Cu | 466,8 | 147,7 | 46,7 | 14,8 | 12,1 |
| $\delta_{simulovaná}$ [μm] pro Cu | 466,3 | 147,4 | 46,6 | 14,7 | 12,0 |
| $\delta_{vypočítaná}$ [μm] pro Au | 526,3 | 166,4 | 52,6 | 16,6 | 13,6 |
| $\delta_{simulovaná}$ [μm] 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 (1.8).

$$J_s = -\frac{I_{cel}}{O}, \tag{2.0}$$

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

Z výsledku je patrné, že největší proudová hustota ve vodivém pásku je na krajích a klesá směrem ke středu. Pro lepší představu byl výsledek vynesen do grafu. Rozložení proudové hustoty v jednom závitu planární cívky je uvedeno na obr.57.




**Obr. 57.:** Ukázka rozložení proudové hustoty v jednom závitu planární cívky (stříbro, 20kHz) pro skin efekt.

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:

$$R = \frac{P}{I^2}, \tag{2.1}$$

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

$$P = \quad QdA \tag{2.2}$$

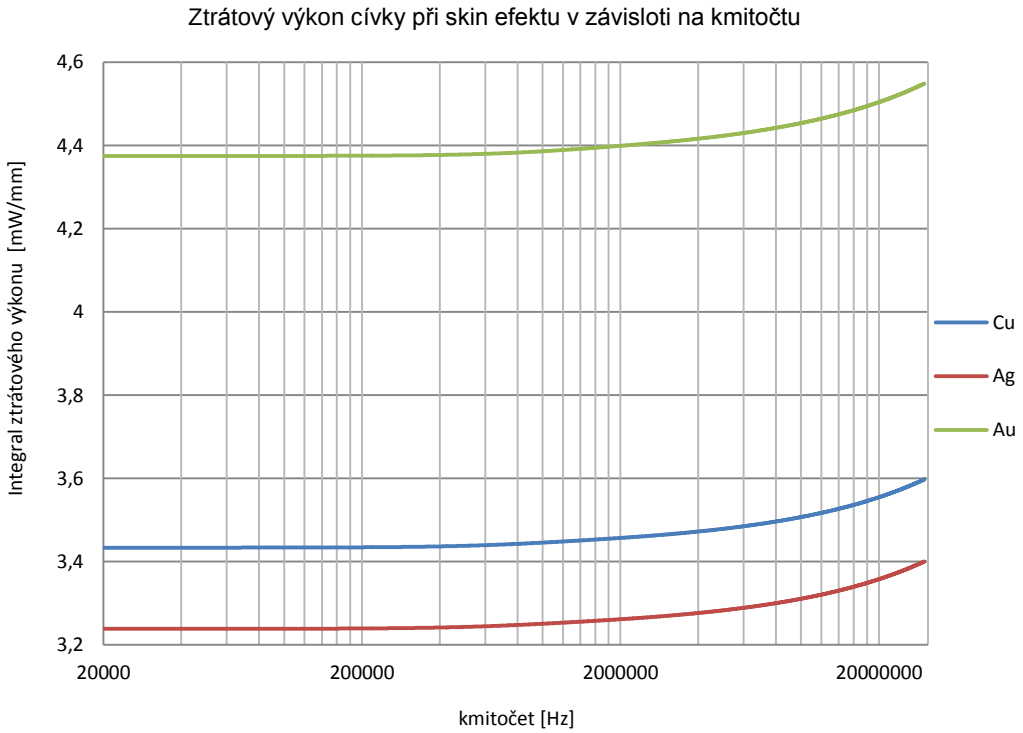
$$I = \int J_z dA, \tag{2.3}$$

kde $J_z$ je z-tová složka hustoty proudu, $dA$ je změna magnetického potenciálu a Q je tepelný odporový poměr, který je vyjádřen rovnicí:

$$Q = \sigma \, E^2 \tag{2.4}$$

a $E$ je intenzita elektrického pole, σ označuje vodivost materiálu.

Pro výpočet ztrátového výkonu je mnohem vhodnější použití vzorce (2.3), protože celkový proud je součástí okrajových podmínek. Výsledek výpočtu ztrátového výkonu je na obr.58. 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.



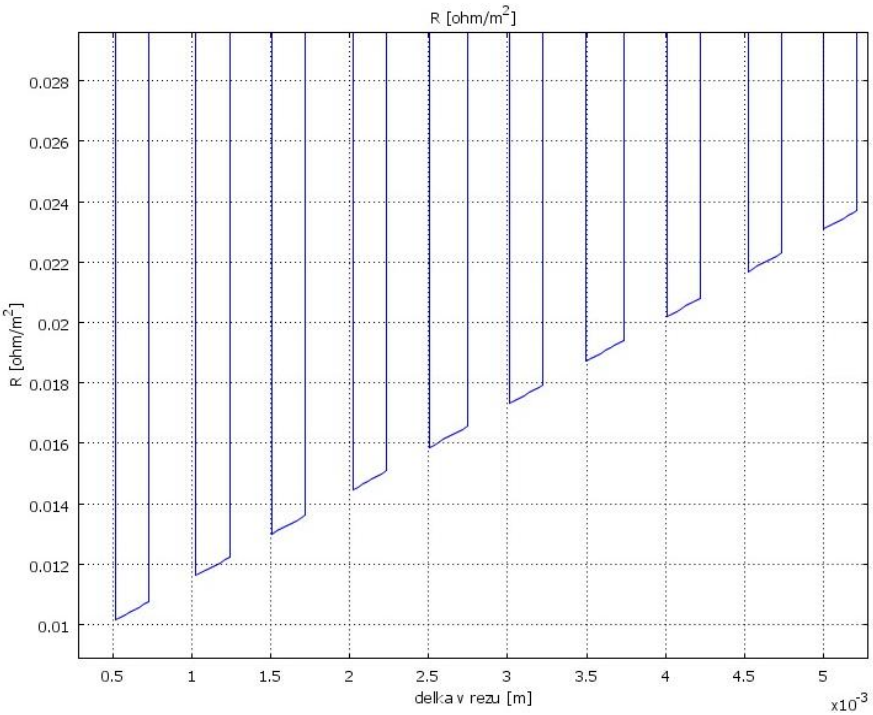

**Obr. 58.:** Ztrátový výkon planární cívky při skin efektu pro tři různé materiály (Au, Ag, Cu).

## Simulace proximity efektu v planární cívce vyrobené v technologii LTCC

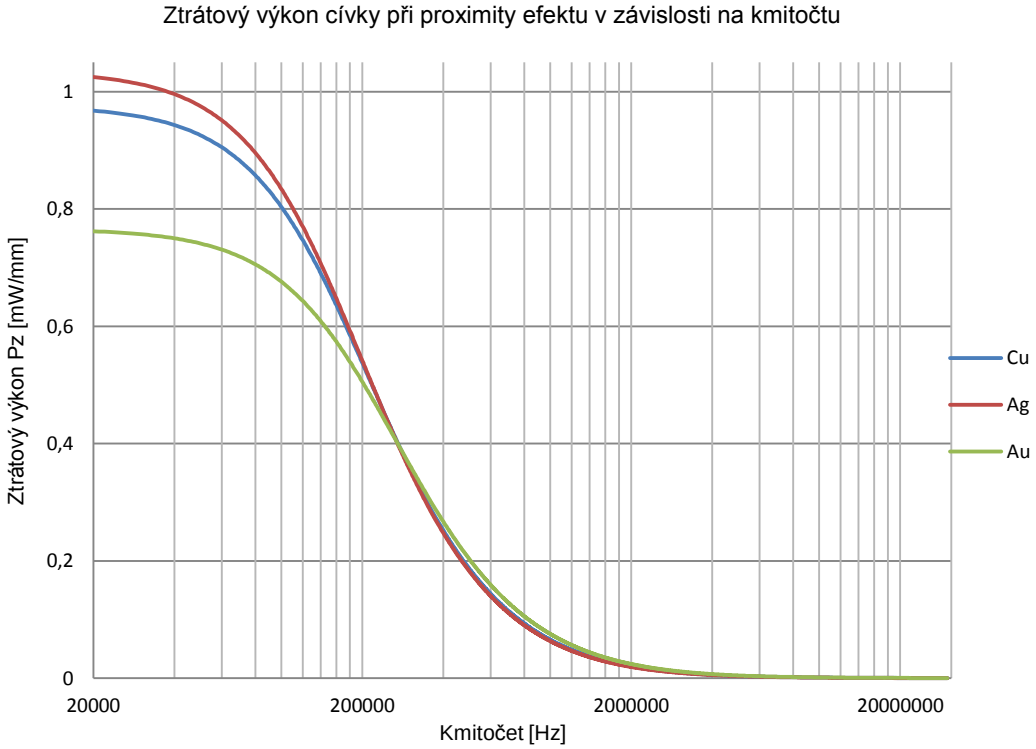
Simulace proximity efektu planární cívky byla provedena, jako rotačně symetrická, tzn. že byla simulována pouze pravá půlka cívky $C_1$. V simulaci bylo zjištěno rozložení proudové hustoty, pomocí které byl vypočítán odpor na čtverec v jednotlivých závitech, který je uveden na obr.59.

Z grafu je zřejmé, že nejmenší hodnota odporu je u závitu 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.60. Z obrázku je zřejmé, že největší ztrátový výkon vlivem prokmity 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.




**Obr. 59.:** Rozložení odporu v jednotlivých závitech cívce vlivem proximity jevu (stříbro, 20 kHz, 10 závitů).




**Obr. 60.:** Ztrátový výkon planární cívky při proximity efektu.

**Zhodnocení dosažených výsledků simulace skin a proximity efektu**

Pro zjištěný 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
- vypočet 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.

### 5.4.4 Planární cívka vyrobená v technologii LTCC

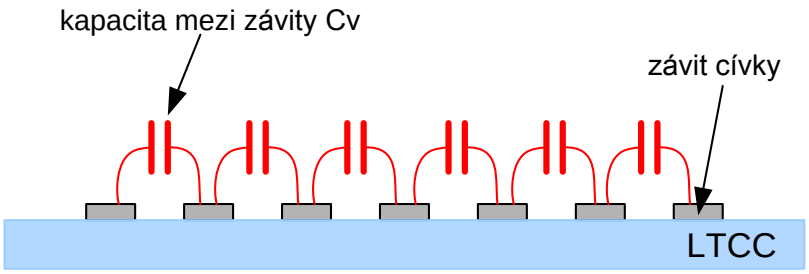
Při konstrukci planárního cívky tlustovrstvou technologií jsme rozměrově limitování velikostí oka síta a viskozitou pasty. Pokud je motiv příliš jemný dochází v takovém případě k mezi závitovým zkratům při tisku nebo laminace, kdy dojde k malému rozšíření vodivého spoje a tedy k změně geometrických rozměru. Rozšíření je způsobeno tlakem, kdy dochází k tzv. vlisovaní natištěného motivu do pásku. 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 následujícího vzorce je vypočítána hodnota vlastní kapacity vinutí:

$$C_v = \frac{f_{r_2}^2 C_2 - f_{r_1}^2 C_1}{f_{r_1}^2 - f_{r_2}^2}, \tag{2.5}$$

kde $f_{r1,2}$ jsou zjištěné hodnoty rezonančních kmitočtů a $C_{1,2}$ známé hodnoty kapacit.




**Obr. 61.:** Popis výskytu vlastní kapacity vinutí u planární cívky vyrobené v technologii LTCC

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 propojení 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. Výsledná kapacita byla zjištěna podle vzorce (2.5).

**Tab. 18.:** Závislost kapacity vinutí planární cívky na počtu závitu

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

**Zhodnocení vlastní kapacity vinutí planární cívky**

Na vzorcích planárních cívek vyrobených v technologii LTCC byla zjišťována vlastní kapacita vinutí. Z výsledku je zřejmé, že nárůst kapacity s každou vrstvou a tedy 10 závity je téměř lineární. Vlastní kapacita cívky s 40 závity byla zjištěna 58 pF.

### 5.5.1 Planární transformátor

Při výrobě tohoto typu transformátoru se využívají planární cívky, 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 cívku 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 závitech primární a sekundární cívky vyrobeného v LTCC je na obr.62.



**Obr. 62.:** 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 cívky ($C_1$, $C_2$). 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.

### 5.5.2 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 závity cívky jsou jako desky deskového kondenzátoru, kde dielektrikem je keramický substrát. Měření a simulace byla provedena na planárním transformátoru o 20 závitech na primární a sekundární cívce. Simulace kapacity byla provedena v programu Comcol Multiphysics v modulu AC / DC – elektrostatika.

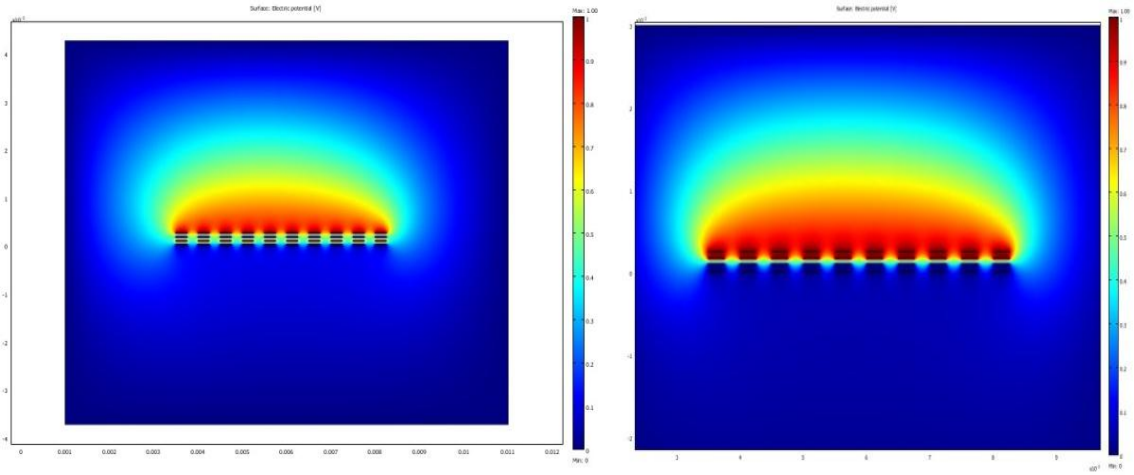
**Tab. 19.:** Kapacita mezi primární a sekundární cívkou

| 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.19. Z výsledků je zřejmé, že u prokládaného vinutí je kapacita mezi vinutím primární a sekundární cívky o dvojnásobek větší, než u separovaného vinutí. Tento výsledek bylo možné logicky předpokládat, protože se zdvojnásobila plocha elektrod. Rozdíl hodnot získaných ze simulace a měření bylo způsobeno nepřesností sesouhlasení jednotlivých pásku – vodivého motivu.

Rozložení elektrického potenciálu, ze kterého byla vypočítána kapacita mezi vinutími planárního transformátoru je uvedeno na obr.63.

Kapacita mezi primární a sekundární cívkou byla zjišťována simulací a měřením na vytvořených vzorcích. Byly testovány struktury s prokládaným a separovaným vinutím. Hodnota kapacity pro prokládané vinutí byla zjištěna měřením 336,17 pF pro separované vinutí 82,89 pF.



**Obr. 63.:** Obrázek rozložení elektrického potenciálu pro a) prokládané b) separované 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.62, z kterého je zřejmé, že jednotlivé závity nejsou umístěny přímo nad sebou, ale jsou mírně posunuty.

### 5.5.3 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, vysokonapěťového transformátoru, zdroje stejnosměrného napětí a testovací komůrky, v které je umístěn vzorek pro měření. Uspořádání pracoviště je zřejmé z obr.64.

Testovací vzorky planárních transformátorů se skládal z 20 závitů primární a sekundární cívky, kde šířka vodiče a mezery byla 250 μm. Jednalo se o stejné vzorky, u kterých byla zjišťována kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím viz. předchozí kapitola.

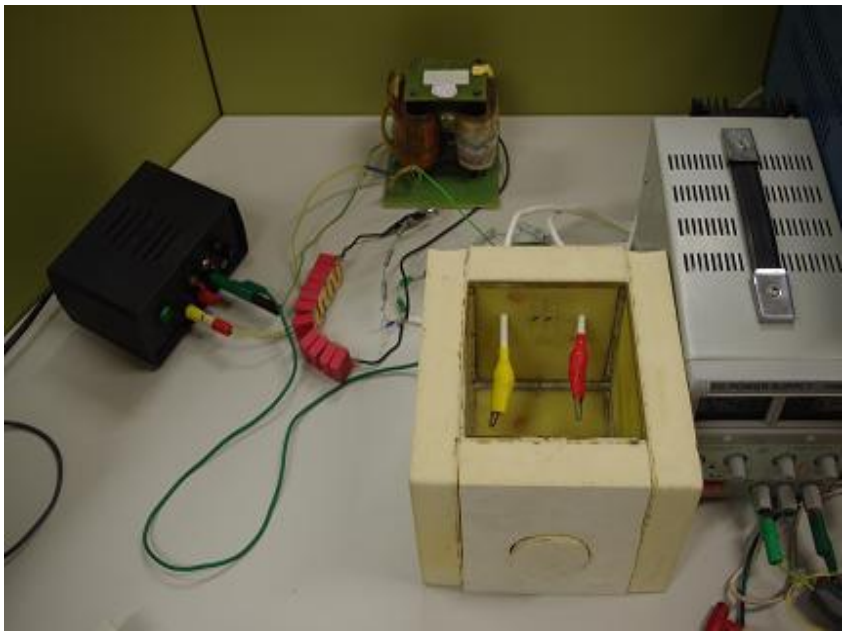
Umístění jednotlivých vinutí ve struktuře planárního transformátoru:

- prokládané vinutí
- separované vinutí

U obou vytvořených struktur bylo předpokládáno, že nejslabším místem pro vznik elektrického průrazu bude v okolí vodivého propojení skrz pásek. Protože pásek nízkoteplotní keramiky je v tomto místě narušen a nemusí zde dojít k spojení pásků nízkoteplotní keramiky. V takovém případě by došlo k vzniku elektrického výboje, který by se šířil od vodivého propojení skrz pásek k nejbližšímu závitu planární cívky.

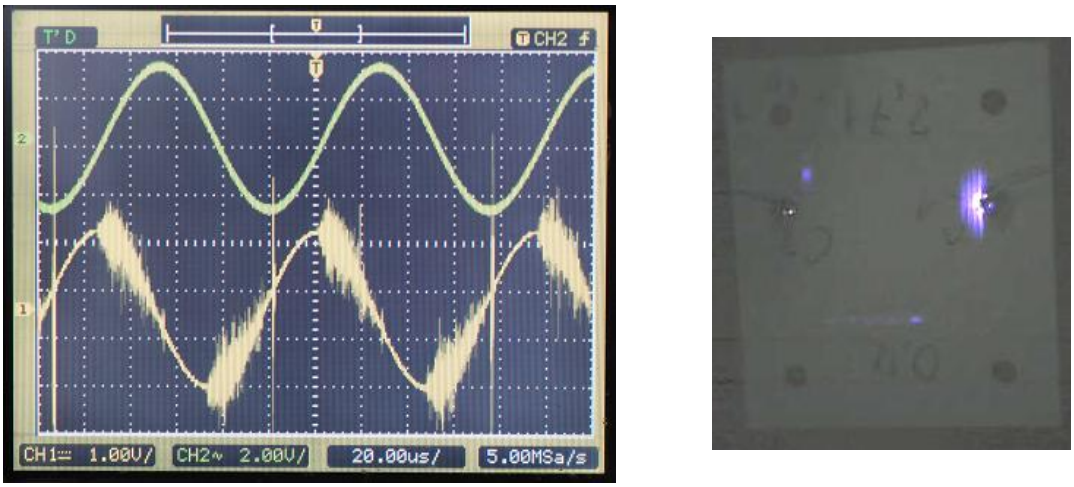
Z měření ovšem bylo zjištěno, že k degradaci dielektrika dochází, jak mezi vodivým propojením skrz pásek a nejbližším závitem cívky, tak i mezi

jednotlivými závity. Výskyt částečných výbojů na planárním transformátoru byl pozorován na osciloskopu při napětí 1 kV a jejich průběh je zobrazen na obr.65.



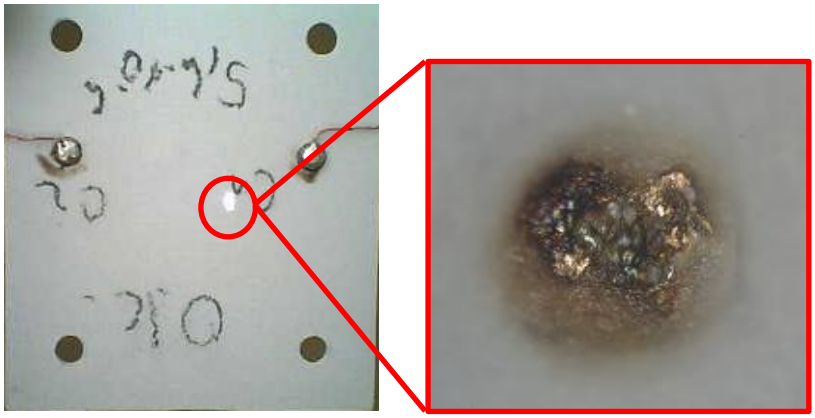
**Obr. 64.:** Pracoviště pro měření částečný výbojů.

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.




**Obr. 65.:** Měření částečných výbojů na osciloskopu (vlevo), zobrazení výboje na planárním transformátoru (vpravo).

Jelikož se jedná o keramickou strukturu, z tohoto důvodu není možné, poškozené místo v izolaci opravit. Ukázka vzniku elektrického průrazu je na obr.66, kde jsou i zobrazeny kousky roztečeného kovu.



**Obr. 66.:** Ukázka vzniku elektrického průrazu v planárním transformátoru (vlevo) a optická inspekce povrchu v místě elektrického průrazu (vpravo).

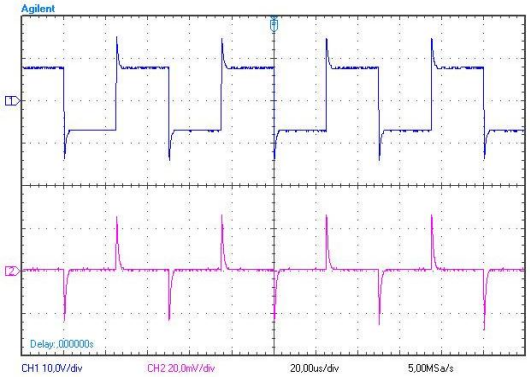
### 5.5.4 Přenos napětí na planárním transformátoru

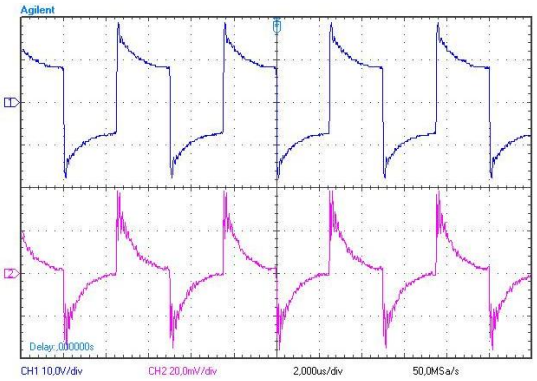
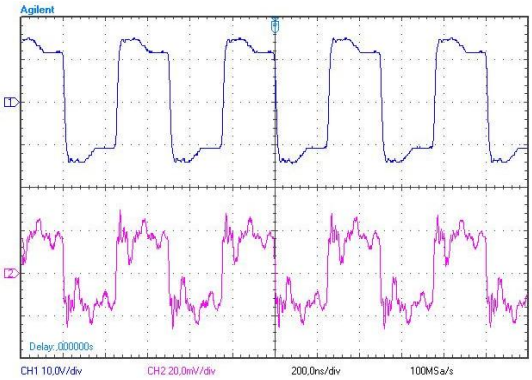
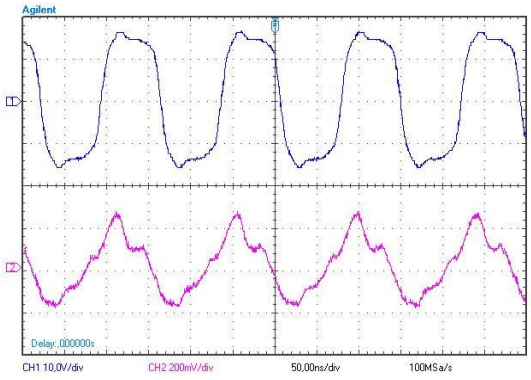
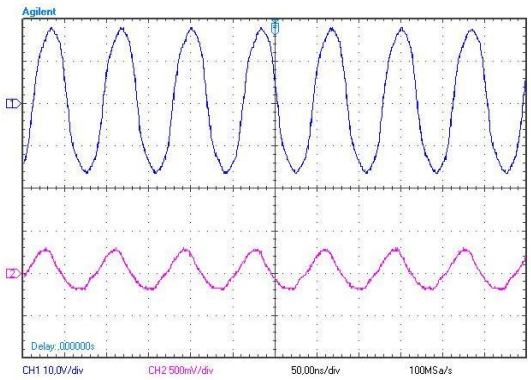
Pro zjištění rozsahu pracovních kmitočtu planárního vzduchového transformátoru byl měřen průběh napětí na primárním a sekundárním vinutí planárního transformátoru. Na sekundární straně vinutí byla připojena zátěž o definovaném odporu Rz = 1Ω. Měření bylo provedeno pomocí obdélníkového signálu s amplitudou 1 V v kmitočtovém rozsahu 20 kHz – 20 MHz. Výsledné průběhy jsou uvedeny v tab.20.

Tabulka znázorňuje, že magnetizační proud cívky roste 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 prázdno 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.

**Tab. 20.:** Závislost napětí a proudu planárního transformátoru.

| f [kHz] | Průběh na osciloskopu. |
|---|---|
| | $U_{vstupní}$ $U_{výstupní}$ |
| 20 KHz |  |

| f [kHz] | Průběh na osciloskopu. $U_{vstupní}$ $U_{výstupní}$ |
|---|---|
| 200KHz |   |
| 1 MHz |   |
| 7 MHz |   |
| 12 MHz |   |

**Zhodnocení dosažených výsledku při měření na planárním transformátoru:**

Vytvoření planárního transformátoru ukazuje další možnosti aplikace technologie LTCC, v tomto případě vytváření vodivého motivu uvnitř struktury. Planární transformátor byl vyroben o 20 závitech planární a sekundární cívky. Pro vytvoření motivu cívek $C_1$ a $C_2$ byla použita pasta TC0307. Vlivem velmi malé tloušťky keramického substrátu (100 μm) není nutné vytvářet žádné magnetické obvody. Mezi primární a sekundární cívkou bude téměř těsná vazba.

Transformátor byl vyroben ve dvou verzích odlišující se umístěním jednotlivých vinutí (prokládané / separované). Pro měření elektrické pevnosti pomocí částečných výbojů bylo sestaveno pracoviště, na kterém bylo proměřeno několik vzorků obou vyrobených systémů.

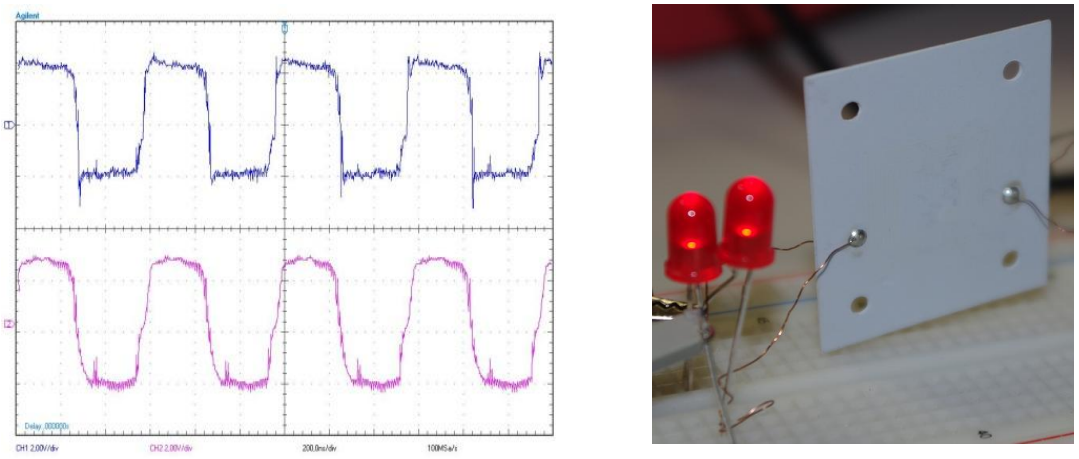
Bylo zjištěno, že průraz se neobjevil v místě vodivého propojení skrz vrstvu, jak bylo předpokládáno, ale jednalo se o zkrat mezi závity. Toto chování se projevovalo u všech vzorků. Zápalné napětí částečných výbojů přitom bylo přibližně 1 kV. Na závěr celé části byl hledán kmitočtový rozsah, ve kterém lze planární transformátor bezpečně provozovat. Byly zobrazeny průběhy napětí na primární a sekundární cívce. Z výsledných grafů je zřejmé, že je nutné proudově posílit zdroj napájení generátoru, aby bylo dosaženo pravoúhlých obdélníkových impulzů.

### 5.5.5 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.

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.67A.



A B

**Obr. 67.:** Měření na planárním transformátoru A) průběh signálu na primární a sekundární cívce, B) zatížený planární transformátor pomocí dvojce LED diod.

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.67B.

## Zhodnocení získaných výsledků proudového posílení zdroje

Při připojení signálu bez proudového posílení dochází vlivem velkého odběru proudu k zatížení zdroje signálu a k jeho zkreslení. Problém bývá většinou řešen návrhem obvodu pro posílení magnetizačního proudu, který zajistí dostatečnou velikost magnetizačního proudu a strmost hran budícího obdélníkového signálu.

Z tohoto důvodu byl navržen a sestaven obvod pro proudové posílení zdroje, u kterého bylo možné dosáhnout proud až 140 mA. Pro vyzkoušení přenosu proudu bylo sekundární vinutí připojeno k LED. Intenzita světla vyzářeného led diodami byla největší při kmitočtu 1,27 MHz. Lze tedy předpokládat, že transformátor má při tomto kmitočtu největší výkon a nejmenší ztráty.

# 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, které odpovídají cílům dizertační práce uvedeným v kapitole 5. 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 budícího pulzu a na jejich opakovacím kmitočtu. Bližší popis viz. kapitola 5.2. 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 systém 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. Podrobnější popis viz. kapitola 5.3. 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 výsledku 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. Bližší popis viz. kapitola 5.1.

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 vinutí. 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. Bližší popis viz. kapitola 5.4.

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 pásků.

# 7 Seznam obrázků

Obr. 1.: Struktura LTCC (vlevo před výpalem, vpravo po výpalu). ..... 4
**Obr. 2.:** Vývojový diagram výroby struktury v technologii LTCC. ..... 5
**Obr. 3.:** Popis využití jednotlivých past ve struktuře vyrobené v technologií LTCC. ..... 7
**Obr. 4.:** Princip spojení dvou pásků nízkoteplotní keramiky. ..... 7
**Obr. 5.:** Teplotní profil pro výpal LTCC - HeraLock 2000 od firmy Heraeus. ..... 9
**Obr. 6.:** Multivrstvová obvodová struktura v technologii LTCC. [12] ..... 10
**Obr. 7.:** Popis parametrů cívky pro výpočet indukčnosti. ..... 12
**Obr. 8.:** Průtok proudu vlivem a) skin efektu b) vlivem proximity efektu. ..... 14
**Obr. 10.:** Elektrodové uspořádání pro modelování částečných výbojů v izolantech.[18] ..... 16
**Obr. 11.:** Rozmístěný jednotlivých kapacit uvnitř dielektrika vlevo a náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje vpravo (Gemantův model).[18] ..... 16
**Obr. 9.:** Rozložení elektrod pro výboj s dielektrickou bariérou a) objemový výboj, b) povrchový výboj, c) koplanární uspořádání elektrod. ..... 18
**Obr. 12.:** Prvky 2D pro dělení struktury A) trojúhelník B) čtyřúhelník C) parametrický prvek. ..... 21
**Obr. 13.:** Prvky 3D pro dělení struktury A) čtyřstěn-tetrahedron B) Pětistěn C) šestistěn. ..... 21
**Obr. 14.:** Isoparametrické 3D prvky A) čtyřstěn B) pětistěn C) šestistěn. ..... 21
**Obr. 15.:** Návrh testovacího motivu (kružnice a obdélníky) pro zjištění optimálních parametrů nastavení laseru AUREL ALS 300. ..... 26
**Obr. 16.:** Snímek znázorňující šířku stopy laseru jedním substrátem LTCC po laminaci a výpalu.(nejmenší velikost dutiny). ..... 27
**Obr. 17.:** Vyřezané otvory pro vodivé propojení A) nevhodný B) požadovaný tvar. ..... 29
**Obr. 18.:** Vodivé propojení v LTCC A) s defektem B) správně vyrobený. ..... 30
**Obr. 19.:** Výbrus vodivého propojení vyrobeného v technologii LTCC. ..... 30
**Obr. 20.:** Struktura pro stanovení kvality vodivého propojení s různými průměry otvorů. ..... 31
**Obr. 21.:** Vliv odporu v závislosti na velikosti vodivého propojení skrz vrstvu. ..... 31
**Obr. 22.:** Úprava sítotiskového stolu pro technologii LTCC (vpravo detail porézního kamene) ..... 33
**Obr. 23.:** Vytvořený motiv vinutí planární cívky A) s nečistotou v podobě vlákna v motivu B) a C) vypálený motiv s defektem, který může vlákno způsobit. ..... 34
**Obr. 24.:** Ukázka natištěné stříbrné pasty vlevo před výpalem a vpravo po výpalu. ..... 35
**Obr. 25.:** Šablony pro laminaci LTCC (vpravo 80 x 80mm, vlevo52 x 52). ..... 37
**Obr. 26.:** Vyrobený anaxiální lis pro technologii LTCC. ..... 37
**Obr. 27.:** Testovací struktura pro zjištěni kvality laminace A) dvě vrstvy s elektrodami B) mikrokanálek. ..... 38
**Obr. 28.:** Kvalita laminace zjišťovaná na mikrokanálcích.(vlevo kvalitní spojení, vpravo rozlaminování jednotlivých pásků v místě kanálku.) ..... 40
**Obr. 29.:** Nízkoteplotní keramika vypálena ve vzduchu (vlevo) a v inertní atmosféře (vpravo). ..... 43
**Obr. 30.:** Změřené teplotní profily pro výpal LTCC při různých typech atmosfér. ..... 43
**Obr. 31.:** Permitivita v závislosti na kmitočtu pro výpal v třech různých atmosférách (vzduch, vakuum, argon). ..... 44
**Obr. 32.:** Návrh senzoru tlaku v technologii LTCC. ..... 48
**Obr. 33.:** Tlakový senzor A) s defektem v podobě praskliny B) s odstraněním defektu. ..... 49
**Obr. 34.:** Tlakový senzor s vytvořenými zlatými elektrodami vakuovým napařováním. ..... 50
**Obr. 35.:** Graf velikosti průhybu substrátu u tlakového senzoru v místě dutiny. ..... 50
**Obr. 36.:** Struktura modulátoru pro THz vlny na obrázku A, aktivní část čipu – fotografie pořízena na reálném vzorku obrázek B. ..... 53
**Obr. 37.:** Upevnění čipu modulátoru THz vln k pouzdru teplotně vodivým tmelem Epotec H31 ..... 53
**Obr. 38.:** Simulace přestupu tepla z čipu THz modulátoru do keramického pouzdra. ..... 54
**Obr. 39.:** Nakontaktování čipu mikrodrátky. ..... 55
**Obr. 40.:** Testování proudové zatížitelnosti mikrodrátků (vlevo), pohled na zničené mikrodrátky při překročení jejich proudové zatížitelnosti (vpravo). ..... 55
**Obr. 41.:** Pouzdro vyrobené v technologii LTCC s ochranou mikrodrátku tmelem Epotec H31. ..... 56
**Obr. 42.:** Rozložení proudové hustoty kontaktu: A) přiložením pásku na vrstvu, B) průchodem pásku skrz vrstvu. ..... 56
**Obr. 43.:** Kontakt v keramickém pouzdru: A) připájení měděného pásku na vrstvě, B) mikrokanálky ve struktuře pro vedení měděného pásku. ..... 57
**Obr. 44.:** Pouzdro pro modulaci terahertzových vln s měděnými pásky pro připojení do elektrického obvodu. ..... 57
**Obr. 45.:** Způsob výroby více struktur, v rámci jednoho celku, při použití šablony větších rozměrů. ..... 58

**Obr. 46.:** Zapojení elektronické části modulátoru terahertzové mřížky. ..... 59
**Obr. 47.:** Vytvořený přípravek pro testování modulátoru terahertzové mřížky A) strana s přidělaným pouzdrem, B)s řídícím obvodem a spínacími tranzistory. ..... 60
**Obr. 48.:** Pracoviště pro testování modulátoru terahertzové mřížky. ..... 62
**Obr. 49.:** Generace ozónu v technologii LTCC. ..... 65
**Obr. 50.:** Generace ozónu na substrátu $Al_2O_3$ s ochranou elektrod křemičitou izolační vrstvou. ..... 66
**Obr. 51.:** Generátor ozónu vyrobený v LTCC po 6 měsíčním provozu A) celý elektrodový systém B) detailní část s opotřebeným povrchem. ..... 68
**Obr. 52.:** Planární cívky vyrobené v technologii LTCC vlevo C1 a vpravo C2. ..... 69
**Obr. 53.:** Rozložení elektrického potenciálu v planární cívce $C_1$. ..... 70
**Obr. 54.:** Rozložení proudové hustoty jedné poloviny planární cívky simulované v axiální symetrii na kmitočtu 20 kHz. ..... 72
**Obr. 55.:** Porovnání naměřených a simulovaných hodnot planární cívky $C_1$. ..... 72
**Obr. 56.:** Jeden závit planární cívky vyrobené v technologii LTCC v řezu (zjištěno výbrusem). ..... 73
**Obr. 57.:** Ukázka rozložení proudové hustoty v jednom závitu planární cívky (stříbro, 20kHz) pro skin efekt. ..... 75
**Obr. 58.:** Ztrátový výkon planární cívky při skin efektu pro tři různé materiály (Au, Ag, Cu). ..... 76
**Obr. 59.:** Rozložení odporu v jednotlivých závitech cívce vlivem proximity jevu (stříbro, 20 kHz, 10 závitů). ..... 77
**Obr. 60.:** Ztrátový výkon planární cívky při proximity efektu. ..... 77
**Obr. 61.:** Popis výskytu vlastní kapacity vinutí u planární cívky vyrobené v technologii LTCC ..... 79
**Obr. 62.:** Výbrus ze struktury planárního vzduchového transformátoru vyrobeného v technologii LTCC. ..... 80
**Obr. 63.:** Obrázek rozložení elektrického potenciálu pro a) prokládané b) separované vinutí. ..... 81
**Obr. 64.:** Pracoviště pro měření částečný výbojů. ..... 82
**Obr. 65.:** Měření částečných výbojů na osciloskopu (vlevo), zobrazení výboje na planárním transformátoru (vpravo). ..... 82
**Obr. 66.:** Ukázka vzniku elektrického průrazu v planárním transformátoru (vlevo) a optická inspekce povrchu v místě elektrického průrazu (vpravo). ..... 83
**Obr. 67.:** Měření na planárním transformátoru A) průběh signálu na primární a sekundární cívce, B) zatížený planární transformátor pomocí dvojce LED diod. ..... 85

# 8 Seznam tabulek

**Tab. 1.:** Parametry smrštivosti vybraných typů substrátů. ..... 9
**Tab. 2.:** Stupně vakua s vybranými parametry ..... 10
**Tab. 3.:** Tabulka koeficientu pro vypočet planární čtvercové cívky ..... 12
**Tab. 4.:** Elektrické vlastnosti vybraných kovů ..... 14
**Tab. 5.:** Tloušťky natištěných vrstev pro vybrané typy past. ..... 34
**Tab. 6.:** Analýza složení LTCC substrátu po výpalu v různých atmosférách. ..... 45
**Tab. 7.:** Vybrané materiály (substráty) a jejich vlastnosti. ..... 46
**Tab. 8.:** Závislost změn kapacity na průhybu substrátu. ..... 51
**Tab. 9.:** Parametry materiálů pro simulaci odvodu tepla z čipu pro THz modulátor. ..... 54
**Tab. 10.:** Závislost celkového proudu $I_c$ , středního ztrátového výkonu $P_S$ a teploty čipu T při použití vodního chlazení na řídicím / napájecím napětí Ucc; $t_p$ = 5μs, f = 10 kHz, činitel plnění pro výpočet středního výkonu je 5%. ..... 60
**Tab. 11.:** Závislost teploty čipu T [°C] na šířce budicích pulzů pro f = 10 kHz : Ucc = 300 V, $I_C$ = 320 mA, $P_M$ = 96 W ..... 60
**Tab. 12.:** Závislost teploty čipu T [°C] na době sepnutí $t_{pulz}$ a změně opakovacího kmitočtu v rozsahu v rozsahu 20 kHz až 65 kHz : Ucc = 300 V, $I_S$ = 320 mA, $P_M$ = 96 W ..... 61
**Tab. 13.:** Závislost teploty čipu na opakovacím kmitočtu pulsů při $t_{pulzu}$ = 400 ns: $P_M$ = 96 W, 30 W a 12,6 W; pro zachování srovnatelného středního výkonu při narůstání četnosti pulzů, byl pulzní výkon postupně snižován. ..... 61
**Tab. 14.:** Porovnání výsledků technologie LTCC s křemičitou izolační vrstvou. ..... 67
**Tab. 15.:** Analýza složení generátoru vyrobeného v LTCC před a po 6-ti měsíční generaci ozónu. ..... 68
**Tab. 16.:** Porovnání simulovaných a vypočítaných hodnot planárních cívek $C_1$, $C_2$. ..... 71
**Tab. 17.:** Vybrané kmitočty a velikost hloubky vniku pro 1 závit planární cívky. ..... 74
**Tab. 18.:** Závislost kapacity vinutí planární cívky na počtu závitu ..... 79
**Tab. 19.:** Kapacita mezi primární a sekundární cívkou ..... 80
**Tab. 20.:** Závislost napětí a proudu planárního transformátoru. ..... 83

# 9 Seznam Literatury

[1] ROOSEN, A.; and SCHINDLER, K., Cold low pressure lamination of pramic green tapes. In *Proceedings of the First International Conference and Exhibition on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies*, 2005.

[2] WAHLERS, R. L.; HUANG, C. Y. D.; HEINZ, M. R.; FEINGOLD, A. H.; BIELAWSKI, J.; and SLAMA, G., "Low-profile LTCC transformers," in *Proceedings. Int. Microelectron. Packag. Soc. Conf.*, vol. 4931. 2002, pp. 76–80.

[3] KLEIN WASSINK, R.J., Soldering in Electronics, Elektrochemical Publication Limited, 1989

[4] SLAMA, G., "Low-temperature cofired magnetic tape yields high benefits," Powe Electron. Technol., vol.29, no.1, pp. 30–34, Jan.2003.

[5] 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.*

[6] 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.*

[7] SERGENT, J. E.; and HARPER, C. A.; (editors), Hybrid Microelectronics Handbook, *McGraw-Hill, Inc., second edition, New York, Chapter 1 & 3, 1995.*

[8] 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.*

[9] 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.

[10] 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

[11] 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.*

[12] 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.

[13] "LTCC introduction",[online],[cit.10.8.2011]dostupné na WWW: www.ltcc.de.

[14] 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.

[15] 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.

[16] *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

[17] *SZENDIUCH, I.* Tenké vrstvy, [online],[cit.10.2.2011]dostupné na WWW: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-bmts-5-tenke-vrstvy.pdf

[18] ČSN 34 5641 Elektrická zařízení. Metody měření charakteristik částečných výbojů. 1985

[19] MUSIL, V.; BOUŠEK, J.; MACHÁČEK, M., VOVES, J. Návrh mřížkové struktury s modulací vodivosti pro terahertzové vlny. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích.* Brno: Novpress, 2010. s. 86-110. ISBN: 978-80-214-4229- 0.

[20] HAVLÍČEK, T.; BOUŠEK, J.; HÁZE, J. Amplitude Analysis in Partial Discharge Measurement. In *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro- electronics CENICS 2009.* Malta, Slilema: IEEE Computer Society, 2009. s. 24-27. ISBN: 978-0-7695-3832- 7.

[21] HAVLÍČEK, T.; BOUŠEK, J.; MAGÁT, M. PC Partial Discharge Processing. In *6th International Conference of PhD Students.* Miskolc: University of Miskolc, Innovation and Technology Transfer Centre, 2007. s. 245-248. ISBN: 978-963-661-779-0.

[22] NIKNEJAD, A. M. and MEYER, R. G., "Analysis, design and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF IC's," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, pp. 1470–1481, Oct. 1998.

[23] DOWELL, P. L., "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings," *Proc. IEEE, Vol 113 No. 8, August 1966*

[24] VANDELAC, J. P.; "A Novel Approach for Minimizing High Frequency Transformer Copper Loss," *0275-9306/87/0000 1987 IEEE*.

[25] KO Systems, "Proxy, A Proximity and Skin Effect Analysis Program," *10437 Laramie Ave, Chatsworth, CA, 818 341 3864.*

[26] CARSTEN, J. P.,"High Frequency Conductor Losses in Switchmode Magnetics", High Frequency Power Conversion Conference Proceedings, CA, May 1986

[27] BOSSHARD, W., Ein neues, vollvertragliches endliches Element fur Plattenbiegung. *Abh. Int.Verein. Bruuckenbau Hochbau 28/I (1968), 27,40.*

[28] Pietriková, A.; Somora, M., *Vývojové trendy materiálov pre hrubé vrstvy,* Košice, 1998. ISBN 80-7099-316-2.

[29] HARPER, A., *Handbook of thick Film Hybrid Microelectronics*. Kingsport Press, Baltimore 1974, ISBN 0-07-026680-8.

[30] BARNWELL, P. G.; JACKSON, T. J., Low profile high frequency power supplies using thick film planar transformers. EPE Sept.1993, pp.93-97.

[31] "Ceramic Circuit Thermal Design Using Tailored Vias" Application Note, [online],[cit. 10.5.2011] dostupné na:www.duDont.com.

[32] LAUTZENHISER, F.; ZHANG, W.; SHAHBAZI, S.; "Production development of zero-shrink LTCC material system," in *Proc. 37th Int. Symp. Microelectron.*,2004.

[33] LAHTI, M.; LANTTO, V.; LEPPAVUORI, S., "Planar inductors on an LTCC substrate realized by the gravure-offsetprinting technique", *IEEE Trans. on Components and Packaging Technol.*, vol.23 (2000), p.606-610.

[34] ŽENIŠEK, A., Applications of Mathematics, [online],[cit. 4.8.2011] dostupné na: http://dspace.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/103246/AplMat_14-1969-5_2.pdf

[35] FOURNIER, Y.; BARRAS, A.; BOUTINARD ROUELLE, G.; MAEDER T.; RYSER, P., *SMD Pressure and Flow Sensors for Industrial Compressed Air in LTCC Technology*. In 17th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2009) – IMAPS, proceeding 17-S3-8.

[36] FOURNIER, Y.; WILLIGENS, R.; MAEDER, T., and RYSER P. *Integrated LTCC micro-fluidic modules - an SMT flow sensor*. In 15th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2005) – IMAPS, pages P2.06, 577-581.

[37] GONGORA-RUBIO, M.R.; ESPINOZA-VAAEJOBS, P.; SOLA-LAGUNA, L.; SANTIAGO-AVILÉS, J.J., Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST). *Sens. Actuators A,* 89 (2001), pp. 222–241.

[38] SEBASTIAN, M.T.; JANTUNEN, H., Low Loss dielectric materials for LTCC applications: a review. *Int. Mater. Rev.,* 53 (2008), pp. 57–90.

[39] BELAVIČ, D.; HROVAT, M.; SANTO-ZARNIK, M.; CILENEK, J.; KITA, J.; GOLONKA, L.; DZIEDZIC, A.; SMETANA, W.; HOMOLKA, H.; REICHER, R., Benchmarking different substrates for thick-film sensors of mechanical quantities, in: Proceedings of the 15th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC-IMAPS), Brugge, Belgium, 2005: pp. 216-221.

[40] BIROL, H.; MAEDER, T.; NADZEYKA, I.; BOERS, M.; RYSER, P., Fabrication of a millinewton force sensor using low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology. *Sensors and Actuators A,* 134 (2007), pp. 334–338.

[41] ZHANG, X.C. – XU, J., Introduction to THz wave photonics. Springer, 2009, ISBN 978-1-4419-0977-0

[42] LEE, Y-S., Principles of terahertz science and technology. Springer, 2009, ISBN 978-0-387-09539-4

[43] FRANK, H.; ŠNEJDAR, V., Principy a vlastnosti polovodičových součástek, SNTL Praha 1976

[44] PHILOFSKY, E., "Design Limits When Using Gold-Aluminum Bonds", 9th Annual Proceedings, Reliability Physics,1971.

[45] Clatterbaugh, G.; Weiner, J.; Charles, H., "Gold- Aluminum Interrnetallics: Ball Bond Shear Testing and Thin Film Reaction Couples", IEEE, December 1984, pp.349-356.

[46] KOCH, T.; RICHLING, W.; WHITLOCK, J.; HALL, D., "A Bond Failure Mechanism", Proceedings of IEEE IRPS,1986, pp. 55- 60.

[47] Seigneur, F.; Fournier, Y.; Maeder, T.; Ryser, P; Jacot, J., "Hermetic package for optical MEMS", Proceedings, International Conference on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT), Munich (DE), 627-633 (THA24), 2008.

[48] KELEN, A., Diagnostics of HV insulation – From inspection to continuous monitoring. Ref.1020-05, CIGRĚ Symposium 05-87, Vídeň, květen 1987.

[49] VEVERKA, A., Technika vysokých napětí. SNTL Praha, 1966.

[50] ČSN EN 60270, Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů, Praha, Český normalizační institut, 2001.

[51] JIN, J., *The Finite Element Method in Electromagnetics*, *John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.*

[52] KUCZMANN, M.; IVANYI, A.; *The Finite Element Method in Magnetics*, Akad´emiai Kiad´o, Budapest, 2008.

[53] GREEN, L.; *RF-inductor modelling for the 21st century*, EDN, 2001.

[54] ROSA, E. B.; GROVER, F. W., Formulas and Tables for the Calculation of Mutual and Self Induction, *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 8, No. 1, 1911, p. 122.

[55] NAGAOKA, H., Jour. Coil. Sci., Tokyo 27, 18-33, art. 6 (1909), B. of S. Sci. Paper 169, 64. [8] *AC/DC Module Model Library*, COMSOL AB., 2006.

[56] LUNDIN, R., A handbook formula for the inductance of a singlelayer circular coil, *Proc. IEEE,* Vol. 73, No. 9, Sep. 1985, pp.1428-1429.

[57] BÍRÓ, O.; PREIS, K.; RICHTER, K. R., On the use of the magnetic vector potential in the nodal and edge finite element analysis of 3D magnetostatic problems, *IEEE Trans. on Magn* , Vol. 32, 1996, pp. 651–654.

[58] HOLLAHAN, J.; BELL, A., *Techniques and Applications of Plasma Chemistry* . Wiley & Sons, 1974.

[59] HINZE, M .; KÖSTER, M.; TUREK, S., A Space-Time Multigrid Solver for Distributed Control of the Time-Dependent Navier-Stokes System. SPP 1253 Report, 2008.

[60] NEITZEL, I.; PRÜFERT, U.; SLAWIG, T., Strategies for time-dependent PDE control with inequality constraints using an integrated modeling and simulation environment. Numerical Algorithms, *2008, DOI 10.1007/s11075-008-9225-4.*

[61] Aubrecht, V., *Fyzika a diagnostika plazmatu* . skripta, VUT Brno, 2006. 117 s.

[62] MEYER, H., Accurate single-layer-solenoid induktance calculations, *QST, April 1992, pp. 76-77*

[63] LIONS, J. L., Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential Equations. Springer-Verlag, Berlin, 1971.

[64] NCP5181 datasheet [online],[cit. 4.2.2012] dostupné na: WWW:http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=NCP5181.

[65] IRFPC50 datasheet [online],[cit. 4.2.2012] dostupné na: WWW: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irfpc50.pdf

[66] PROSSER, V., Experimentální metody biofyziky, 1. vyd. Praha : Academia, 1989, ISBN 80-200-0059-3.

[67] ULLMANN, V., Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. [online],[cit. 1.9.2011], dostupné na: WWW:http://www.sweb.cz/AstroNuklfyzika/DetekceSpektrometrie.htm.

[68] HRENNIKOFF, A., *Solution of problems of elasticity by the frame-work method*, ASME J. Appl. Mech. 8 (1941), A619–A715

[69] VOZNICOVÁ, R., *Diplomová práce,* MU Brno, 2002

[70] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Interconection 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.

[71] 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.

[72] 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.

[73] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. *Bonding in 3D structure.* Budapest, Hungary: Budapest, Hungary, 2008. s. 246-247.

[74] KOSINA, P.; HEJÁTKOVÁ, E.; ŠANDERA, J. Spojení tenkých vrstev s keramikou nízkých teplot. In *Sborník přízpěvků konference Zvůle 2008.* Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologii: Vysoké Učení Technické v Brně, 2008. s. 99-102. ISBN: 978-80-214-3709-8.

[75] 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.

[76] KOSINA, P.; ADÁMEK, M.; ŠANDERA, J. Micro-channel in LTCC. *Electronics,* 2008, roč. 2008, č. 1, s. 109-114. ISSN: 1313-1842.

[77] 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.

[78] 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.

[79] KOSINA, P.; ŠANDERA, J.; BLÁHA, V. Inductance sensor for measuremetn 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.

[80] 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.

[81] 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.

[82] KOSINA, P.; ŘEZNÍČEK, M.; ŠVECOVÁ, O.; SYMERSKÝ, T. Senzor průtoku v technologii LTCC. In *Mikrosyn. Nové trendy v mikroelektonických systémech a nanotechnologiích.* 1. Brno 2010: Novpress, 2010. s. 44-49. ISBN: 978-80-214-4229- 0.

[83] KOSINA, P.; ŘEZNÍČEK, M.; ŠANDERA, J.; SYMERSKÝ, T. Thermodynamic flow sensor. In *Proceeding of 8th international conference.* 1. BUT, Ústav Radiolektroniky: Tiskárna Atom, Ltd., Chuchelna 254, Semily, 2010. s. 72-75. ISBN: 978-80-214-4139- 2.

[84] 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.

[85] HÁJKOVÁ, L.; KOSINA, P.; ŠANDERA, J. Senzory pro meření vibrací. In *Sborník příspěvků konference Králíky 2009.* Brno: MJ servis, s.r.o., Božetěchova 133, 2009. s. 92-96. ISBN: 978-80-214-3938- 2.

[86] ŠVECOVÁ, O.; KOSINA, P.; ŠANDERA, J.; ADÁMEK, M. *Committing of electronic modules by ball pins and their reliability.* Abstract proceedings. Polymer Electronics and Nanotechnologies: towards System Integration. Warsaw, Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010. s. 154-155. ISBN: 978-83-7207-870- 4.

[87] ŠVECOVÁ, O.; KOSINA, P.; ADÁMEK, M.; ŠANDERA, J. Committing of electronic modules by ball pins and their reliability. In *Electronics Technology (ISSE), 2010 33rd International Spring Seminar on.* 2010. s. 259-262. ISBN: 978-1-4244-7849- 1.

[88] NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; ŠVECOVÁ, O.; KOSINA, P. Recent advance in solder ball interconnections reliability examination. In *ISSE 2011 - PROCEEDINGS. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics.* 1. Košice, SK: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 253-257. ISBN: 978-1-4577-2111- 3. ISSN: 2161- 2528.

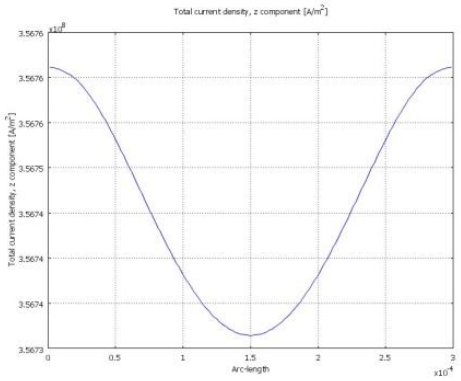
[89] KOSINA, P.; BOUŠEK, J.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J. 3D- LTCC struktura pro pouzdření modulátoru terahertzových vln. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích.* Brno: Novpress, 2012. s. 50-55. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

[90] NICÁK, M.; KOSINA, P.; ŠANDERA, J. 3D PROPOJOVACÍ STRUKTURY REALIZOVANÉ POMOCÍ GALVANICKÝCH VRSTEV NA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTECH. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích.* 1. Brno: Novpress, 2010. s. 25-30. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

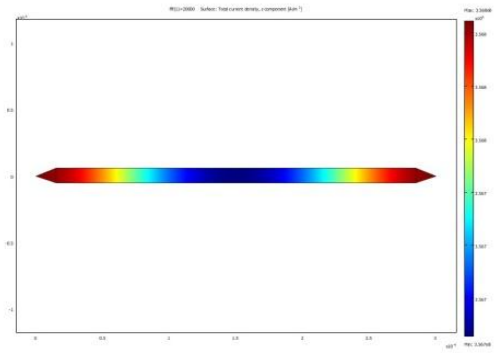
[91] KOSINA, P.; MIKULÍK, P.; MUSIL, V.; BOUŠEK, J.; PROKOP, R. Spínaná mřížková struktura pro modulaci terahertzových vln. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích.* Brno: Novpress, 2012. s. 44-49. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

# Přílohy

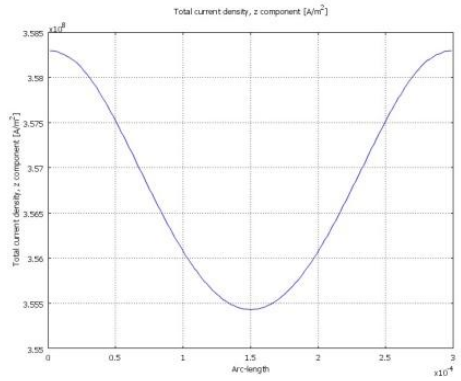
## Příloha 1: Simulace skin efektu provedené v práci pro vodič vyrobený technologií TFT v LTCC – měď



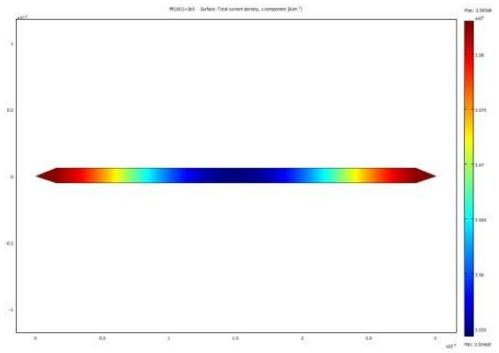

**Obr.1:** Graf proudové hustoty – Cu – 20 kHz



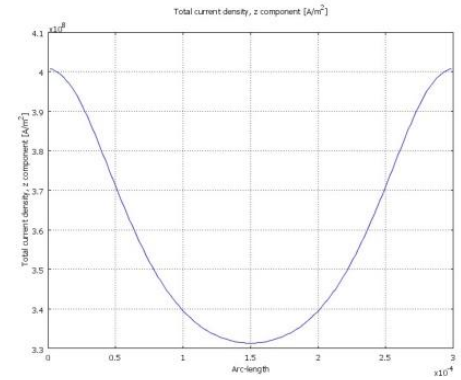
**Obr.2:** Rozložení proudové hustoty v závitu – Cu 20 kHz



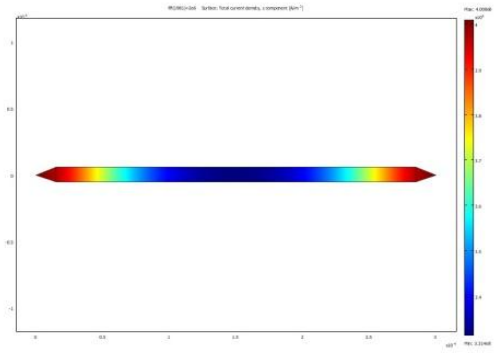

**Obr.3:** Graf proudové hustoty – Cu – 200 kHz



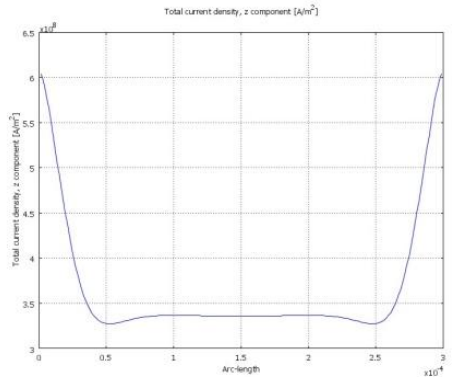
**Obr.4:** Rozložení el. potenciálu v závitu – Cu 200 kHz



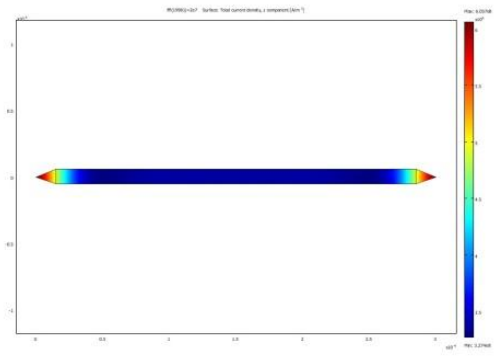

**Obr.5:** Graf proudové hustoty – Cu – 2 MHz



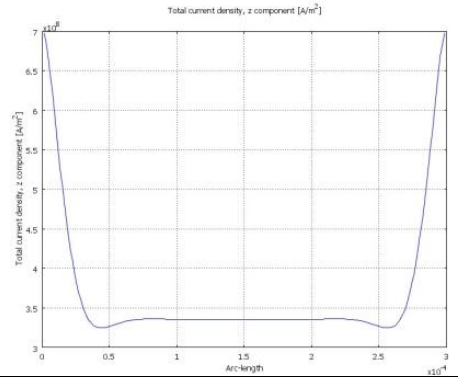
**Obr.6:** Rozložení proudové hustoty v závitu – Cu 2 MHz



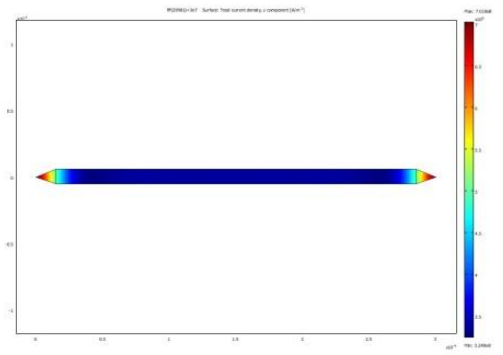

**Obr.7:** Graf proudové hustoty – Cu – 20 MHz



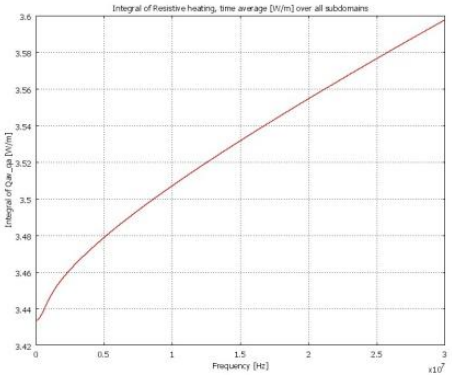
**Obr.8:** Rozložení proudové hustoty v závitu – Cu 20 MHz




**Obr.9:** Graf proudové hustoty – Cu – 30 MHz

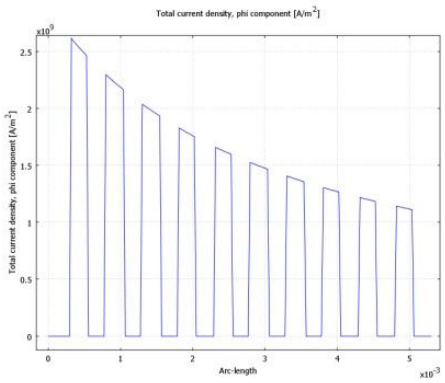
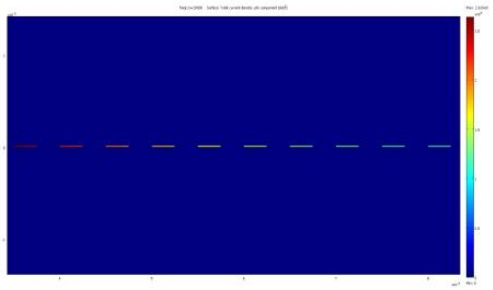
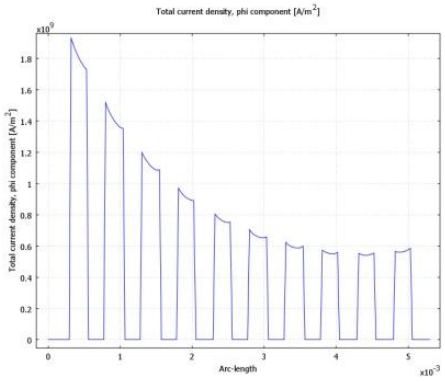
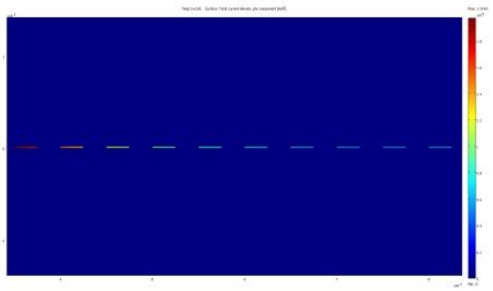
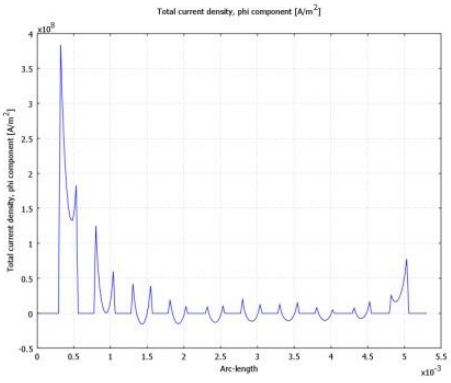
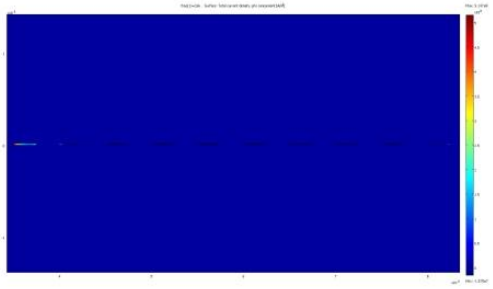


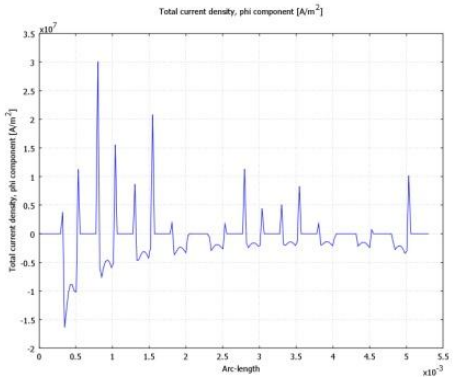
**Obr.10:** Rozložení proudové hustoty v závitu – Cu 30 MHz



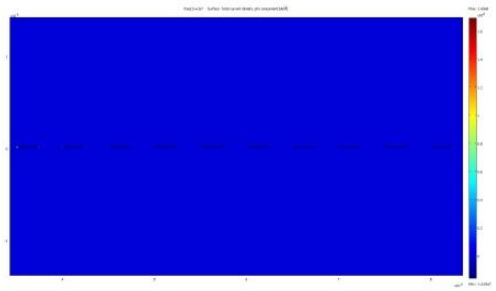

**Obr.11:** Graf ztrátového výkonu v Cu vodiči v kmitočtovém pásmu 20 kHz – 30 MHz

# Příloha 2: Simulace proximity efektu provedené v práci pro cívku 10 závitů – meď

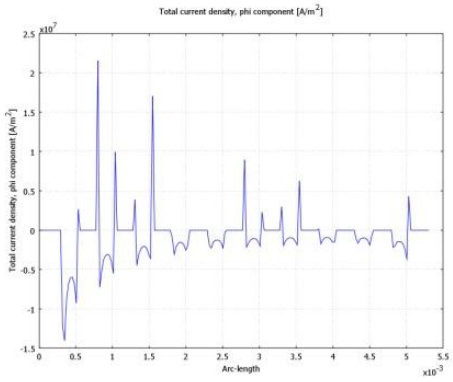
<table>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td>Obr.1.: Graf rozložení proudové hustoty pro 20 kHz</td><td>Obr.2.: Rozložení proudové hustoty pro 20 kHz</td></tr>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td>Obr.3.: Graf rozložení proudové hustoty pro 200 kHz</td><td>Obr.4.: Rozložení proudové hustoty pro 200 kHz</td></tr>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td>Obr.5.: Graf rozložení proudové hustoty pro 2 MHz</td><td>Obr.6.: Rozložení proudové hustoty pro 2 MHz</td></tr>
</table>



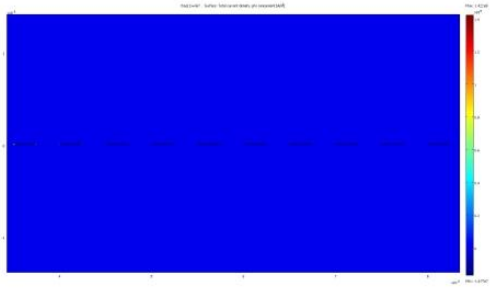

**Obr.7.:** Graf rozložení proudové hustoty pro 20 MHz



**Obr.8.:** Rozložení proudové hustoty pro 20 MHz

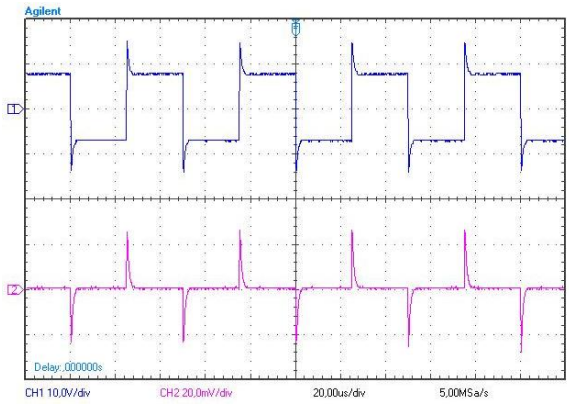
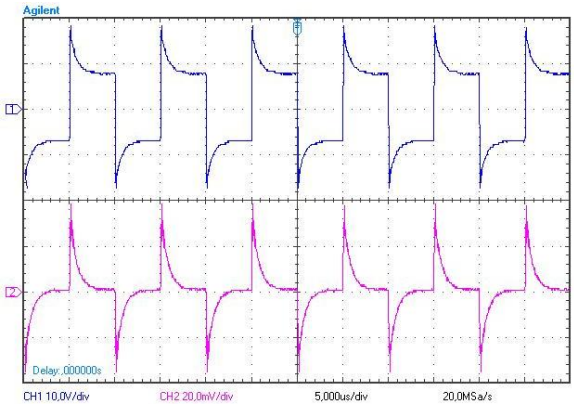
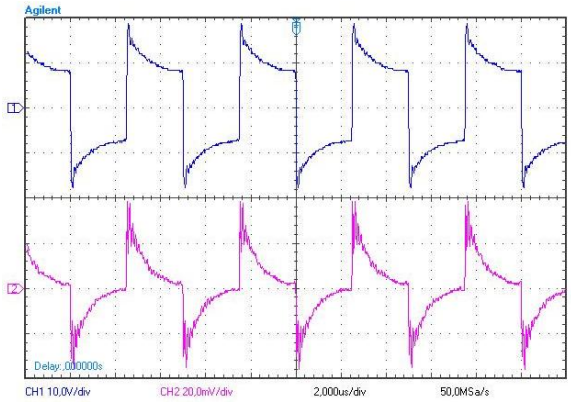
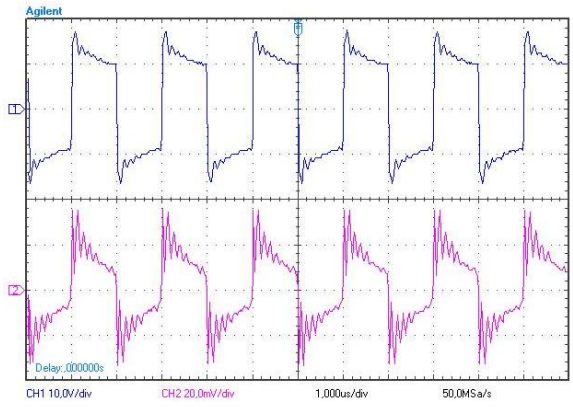


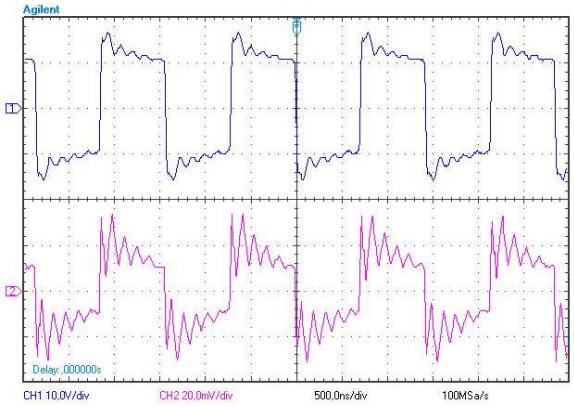
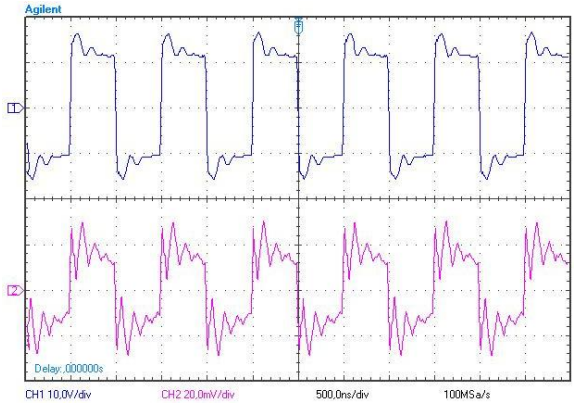
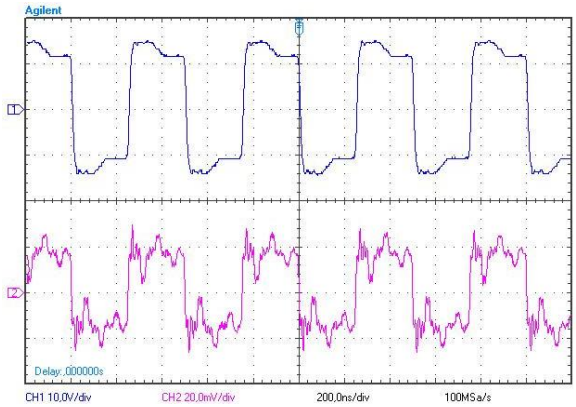
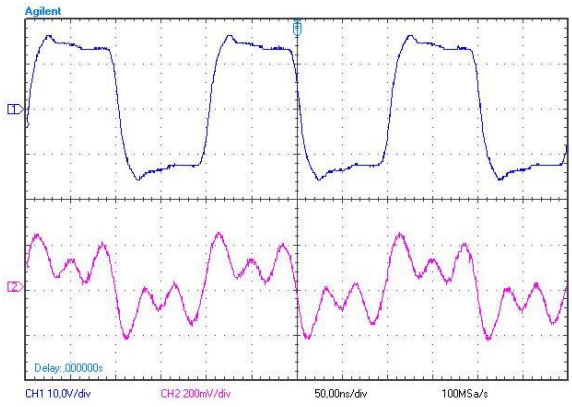

**Obr.9.:** Graf rozložení proudové hustoty pro 30 MHz

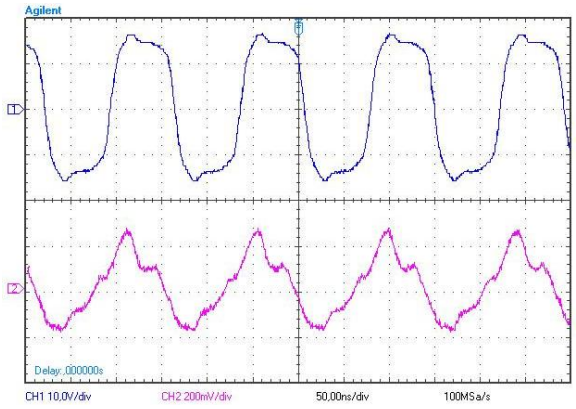
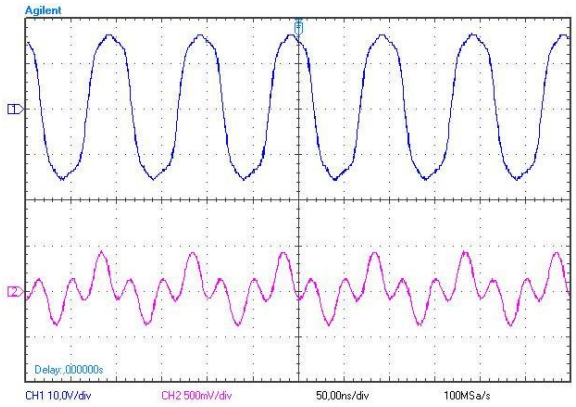
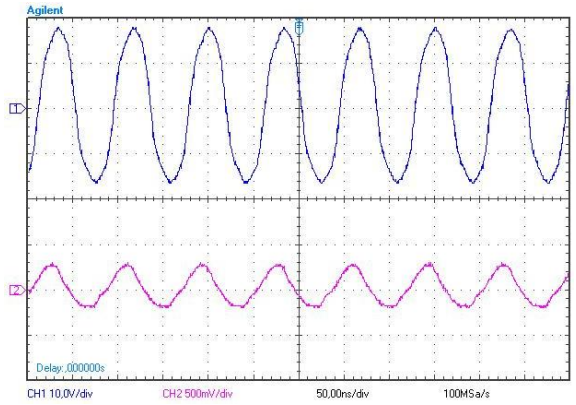
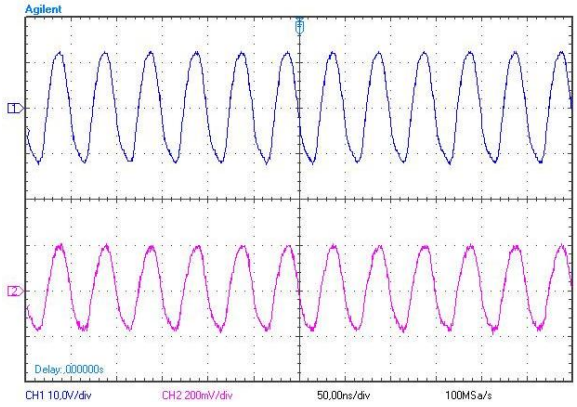


**Obr.10.:** Rozložení proudové hustoty pro 30 MHz

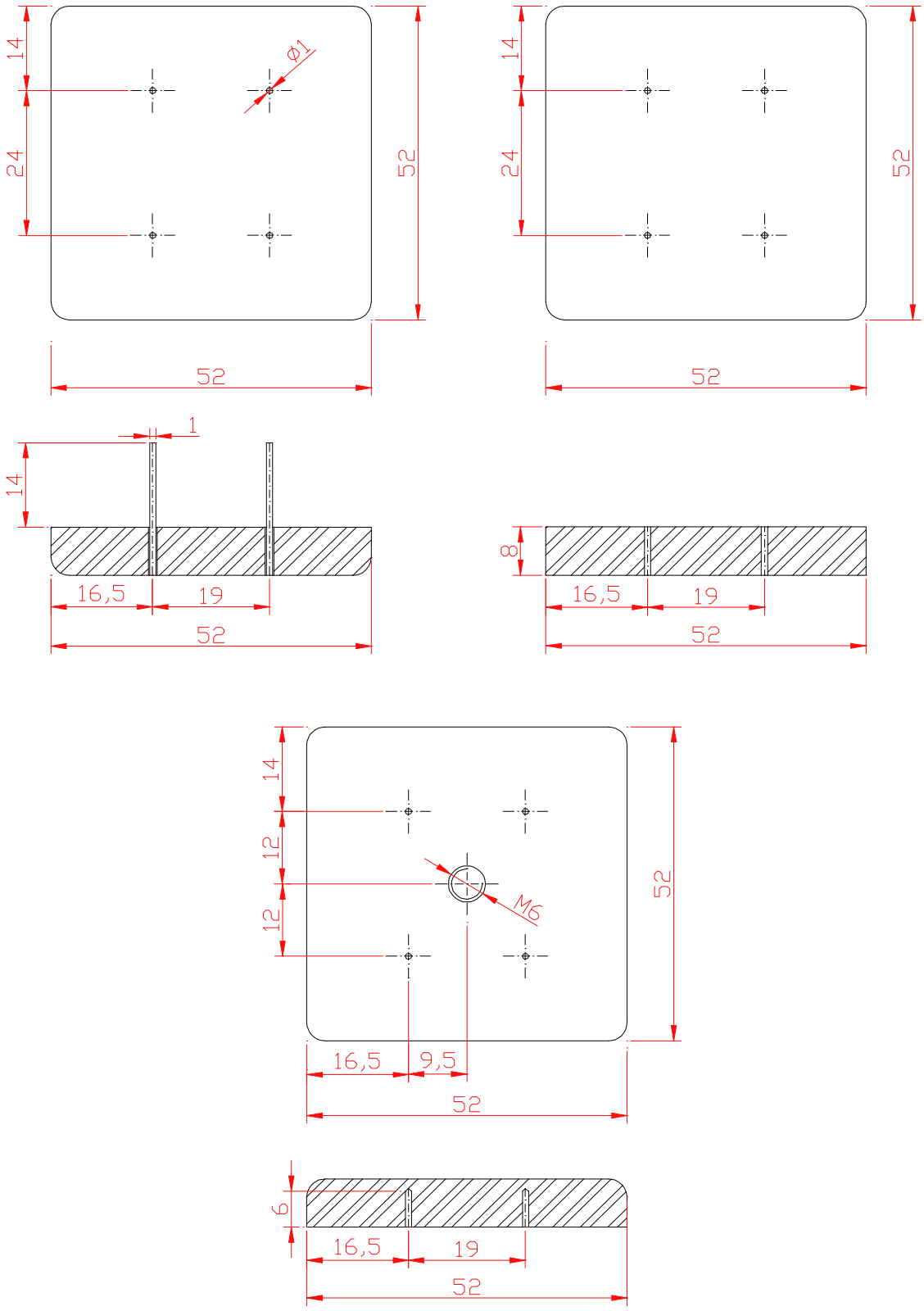
# Příloha 3: Měření na planárním transformátoru bez proudového posílení

| Kmitočet [MHz] | Měření na planární transformátoru |
|---|---|
| 0,02 |  |
| 0,1 |  |
| 0,2 |  |
| 0,5 |  |

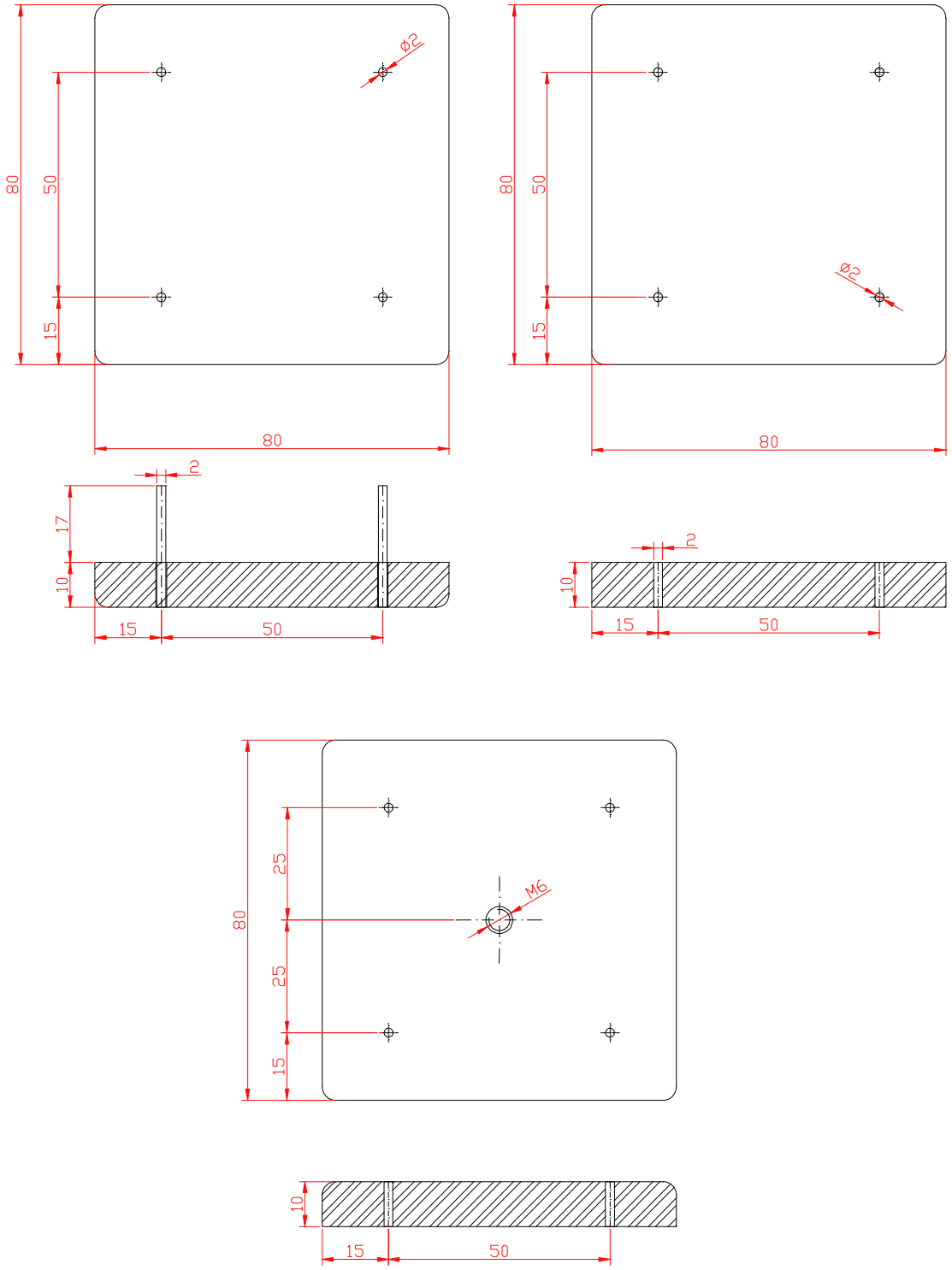
| | |
|---|---|
| 0,7 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 20,0mV/div<br>500,0ns/div<br>100MSa/s |
| 1 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 20,0mV/div<br>500,0ns/div<br>100MSa/s |
| 2 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 20,0mV/div<br>200,0ns/div<br>100MSa/s |
| 5 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 200mV/div<br>50,00ns/div<br>100MSa/s |

| | |
|---|---|
| 7 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 200mV/div<br>50,00ns/div<br>100MSa/s |
| 10 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 500mV/div<br>50,00ns/div<br>100MSa/s |
| 12 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 500mV/div<br>50,00ns/div<br>100MSa/s |
| 20 | Agilent<br>Delay: .000000s<br>CH1 10,0V/div<br>CH2 200mV/div<br>50,00ns/div<br>100MSa/s |

# Příloha 4: Výkresy pro výrobu laminačních šablon




**Obr.1.:** Výkres laminační šablony vytvořený v program AutoCad pro keramiku o rozměru 30 x 35 mm



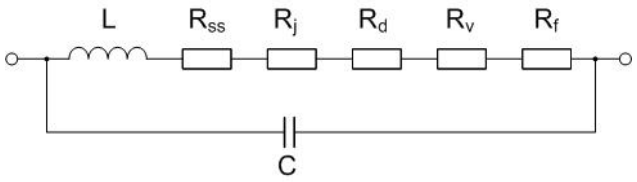

**Obr.2.:** Výkres laminační šablony vytvořený v program AutoCad pro keramiku o rozměru 50 x 50 mm

# Příloha 5: Popis vinutých prvků

## Náhradní schéma cívky

Indukčnost cívky se mění v závislosti na kmitočtu. Náhradní schéma nemůže nikdy přesně popsat chování cívky v celém kmitočtovém rozsahu, v kterém se střídá proudová rezonance (paralelní) cívky s napěťovou (sériová) a reaktance cívky se mění střídavě z induktivní na kapacitní. V praxi vycházíme z náhradního schématu cívky, které je vyhovující přibližně do prvního rezonančního kmitočtu cívky.

Nejjednodušší forma náhradního obvodu cívky vychází z indukčnosti, která bývá zjištěna při nízkém kmitočtu v sérii s dalšími odpory. Jeden z odporů je konstantní a představuje stejnosměrný odpor vinutí cívky, který se zvyšuje s rostoucím kmitočtem. Toto zvýšení je způsobeno ztrátami způsobenými povrchovým jevem a magnetickým působením sousedních závitů cívky. Náhradní schéma cívky je na obr.1.




**Obr.1.:** Náhradní schéma cívky.

Popis jednotlivých elektrických prvků v náhradním zapojení cívky:

Rss udává stejnosměrný odpor vinutí nezávislí na frekvenci
Rj popisuje ztráty způsobeny v jádru, buď hysterezí nebo vířivými proudy
Rd dielektrické ztráty
Rv ztráty způsobené vyzářením výkonu
Rf odpor závislý na kmitočtu
C parazitní kapacita cívky mezi jednotlivými závity.

Pokud bychom sloučili všechny ztrátové odpory do jednoho výsledného R, zapojený v sérii s indukčností cívky L, vyjádříme impedanci zapojení následující rovnicí:

$$Z = j\omega L + R, \tag{1.0}$$

kde

$$L = \frac{L\ 1-\omega^2 LC\ -CR^2}{1-\omega^2 LC\ ^2+2GR+G^2\ R^2+\omega^2 L^2\ +\omega^2 C^2 R^2} \tag{1.1}$$

a následně

$$R = \frac{R+G\ R^2+\omega^2 L^2}{1-\omega^2 LC\ ^2+2GR+G^2\ R^2+\omega^2 L^2\ +\omega^2 C^2 R^2}. \tag{1.2}$$

Při změření impedance cívky na jednom kmitočtu a jejímu rozložení na část reálnou a imaginární bychom získaly hodnoty blízké hodnotám *L* a *R*. Za určitých předpokladů je možné rovnice (1.1) a (1.2) zjednodušit a to pokud jsou hodnoty *G* i *C R* tak malé, že je možné některé členy v čitateli proti jiným zanedbat. Všechny členy ve jmenovateli budou proti výrazu ($1\text{-}\omega^2 LC$) malé tehdy, jestliže je dodržena dostatečná vzdálenost mezi pracovním a vlastním rezonančním kmitočtem cívky. V tomto případě lze rovnice (1.1) a (1.2) napsat ve tvaru:

$$L = \frac{1}{1-\omega^2 LC}. \tag{1.3}$$

$$R = \frac{R+G\omega^2 L^2}{1-\omega^2 LC\ ^2}. \tag{1.4}$$

Zjištěním hodnot L a R při dvou uhlových kmitočtech ω umožní výpočet hodnot L, C, R a G a tím popis náhradního schématu cívky. Z výrazů je zřejmé, že ani činitel jakosti nebude se změnou kmitočtu konstantní. Hlavní podíl na této skutečnosti má vlastní kapacita cívky. Pokud jsou uvažovány dielektrické ztráty je činitel jakosti dán rovnicí:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L\ 1-\omega^2 LC}{R+G\omega^2 L^2} \tag{1.5}$$

Pokud jsou svody a ztráty v dielektriku vlastní kapacity vinutí zanedbány dostane následující tvar rovnice:

$$Q = \frac{\omega L}{R}\ 1-\omega^2 LC \tag{1.6}$$

Zavedením $\omega_r = 1 / \sqrt{LC}$ do posledního výrazu v rovnici (1.6) pak dostaneme výsledná tvar rovnice:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L}{R}\ 1-\ \frac{\omega}{\omega_r}\ ^2 \tag{1.7}$$

Zmenšení činitele jakosti cívky vlivem vlastní kapacity jednotlivých závitů cívky závisí na poměru kmitočtu, při kterém daný okamžik je působeno na cívku v jejím vlastním rezonančním kmitočtem. Horní hranice kmitočtového rozsahu použití cívky je ve větší míře.

## Indukčnost a vzájemná indukčnost různých prvků

Vodivé spoje v elektrických obvodech vytvářejí indukčnost, která způsobuje magnetický indukční tok uvnitř tak i vně vodiče. Indukčnost spoje je podmíněna indukčním tokem uvnitř vodiče a tvoří jeho vnitřní indukčnost, která se vlivem povrchového jevu s rostoucím kmitočtem snižuje. Pro výpočet indukčnost je možné použít výraz, který se skládá ze tří částí: z vnější indukčnosti vodiče, vnitřní indukčnosti a členu závislém na kmitočtu. Dlouhé přímé nemagnetické dvouvodičové vedení uvedené na obr.2.

V případě, že vedení je jednotkové délky pak platí:

$$L = \frac{\mu_{\cdot 0}}{\pi} \; 2{,}3 \log \frac{2D}{d} + \frac{1}{4} \tag{1.8}$$

V případě, že se jedná o přímý, nemagnetický vodič jednotkové délky vztaženého k zemi ve vzdálenosti *h* je pak indukčnost vyjádřena:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \; 2{,}3 \log \frac{4h}{d} + \frac{1}{4} \tag{1.9}$$

Pro indukčnost vodiče délky l:

$$L = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \; 2{,}3 \log \frac{4l}{d} - 1 \tag{1.10}$$

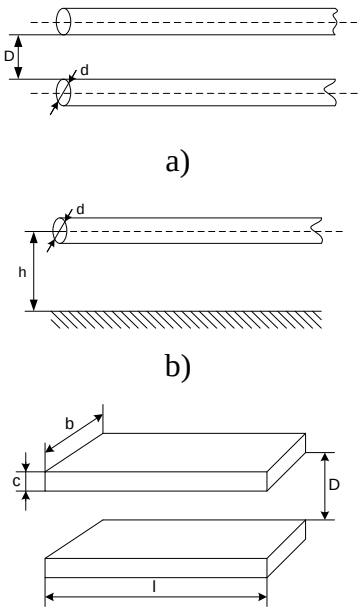
Indukčnost dvou rozměrově stejných čtyřhranů přímých, nemagnetických, krátkých vodičů:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \; 2{,}3 log \frac{D}{b+c} + \frac{2}{3} \tag{1.11}$$

Indukčnost krátkého přímého nemagnetického, čtyřhranného vodiče délky *l*:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \; 2{,}3 log \frac{2l}{b+c} + \frac{1}{2} \tag{1.12}$$

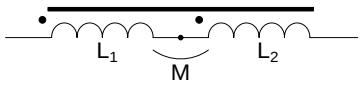
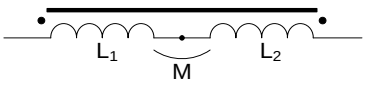
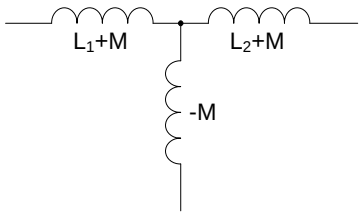
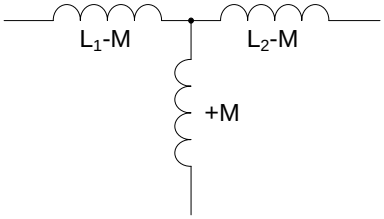
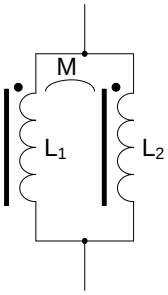
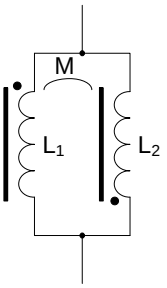
Jednotlivé veličiny ze vzorců jsou popsány na obr.2.




**Obr.2.:** Jednotlivé typy vedení.

Výsledná indukčnost dvou vinutí sériově a paralelně zapojených vázaných vzájemnou indukčností je uvedena v tab.5.

**Tab.1.:** Výsledná indukčnost dvou vzájemně vázaných cívek.

| | | |
|---|---|---|
| Sériové zapojení |  |  |
| | Náhradní zapojení | |
| |  |  |
| | $L = L_1 + L_2 + 2M_{vz}$ | $L = L_1 + L_2 - 2M_{vz}$ |
| Paralelní zapojení |  |  |
| | $L = \frac{L_1 + M_{vz} \quad L_2 + M_{vz}}{L_1 + L_2 + 2M_{vz}}$ | $L = \frac{L_1 - M_{vz} \quad L_2 - M_{vz}}{L_1 + L_2 - 2M_{vz}}$ |

Při těsné vazbě lze napsat, že:

$$M_{vz} = \overline{L_1 L_2}. \tag{1.12}$$

## Transformátory a jejich náhradní schéma

Transformátor je netočivý elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Jeho funkce je změna střídavého napětí na jiné napětí při nezměněném kmitočtu. Při popisu transformátoru se vychází z fyzikálních a matematických vztahu. Pro jednodušší pochopení je vhodnější vycházet z modelu ideálního transformátoru (beze ztrát), potom model upravit na skutečný, doplněním ztrát a rozptylového magnetického toku.

U idealizovaného transformátoru se předpokládá uzavřený magnetický obvod, který má nekonečně velkou magnetickou vodivost. Na magnetickém obvodu jsou umístěny dvě vinutí: primární a sekundární, které mají $N_1$ a $N_2$ závitů. Je–li připojeno střídavé sinusové napětí o okamžité hodnotě $u_1$ začne tímto vinutím procházet

elektrický proud $i_2$ ten způsobí vytvoření magnetického indukčního toku $\Phi_1$ a na základě indukčního zákona vznikne v sekundární cívce napětí $u_2$.Indukované napětí v cívce je pak dáno následujícím vzorcem:

$$u_i = N\frac{d\Phi}{dt}. \tag{1.13}$$

Pokud se magnetický indukční tok mění sinusově, pak můžeme vyjádřit, že:

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega. \tag{1.14}$$

Dosazení do rovnice (3.14) lze vyjádřit:

$$u_i = \frac{Nd\ \Phi_{max} \sin \omega}{dt}. \tag{1.15}$$

Po derivaci rovnice (1.15) lze napsat:

$$u_i = N\omega\Phi_{\max} \cos \omega t \tag{1.16}$$

Pro vyjádření maxima rovnice (1.16) musí platit, že výraz cosωt = 1 a pak můžeme přejít na tvar pro maximální hodnotu napětí:

$$U_{max} = N\omega\Phi_{\max}. \tag{1.17}$$

Po dosazení úhlového kmitočtu a přechodem na efektivní hodnotu dostáváme výraz:

$$U_i = \ \overline{2}\pi f N\Phi, \tag{1.18}$$

kde
$U_i$ - je efektivní hodnota indukovaného napětí
$N$ - udává počet závitů cívky transformátoru
$f$ - kmitočet napájecího napětí
$\Phi$ – značí magnetický indukční tok (jeho maximální hodnota)

Rovnice (1.18) je základní rovnice pro transformátory, ale mnohem známější je tvar, který vznikne po vynásobení rovnice $\overline{2}\pi$ a to:

$$U_i = 4{,}4Nf\Phi. \tag{1.19}$$

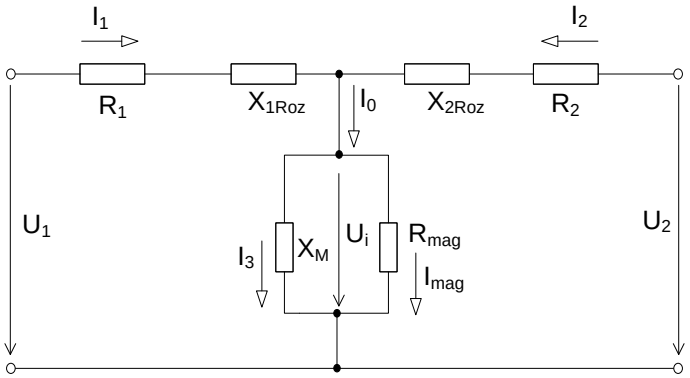
**Náhradní schéma transformátoru**

Při vytváření schéma transformátoru se vychází z energetické bilance. Musí být respektován činný odpor vinutí a konečnou magnetickou vodivost jádra, stejně tak i skutečnost, že ne všechen magnetický tok je uzavřen v jádru transformátoru, ale část se uzavírá bez užitku vzduchem.
Činný odpor vinutí lze určit ze vzorce:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{1.20}$$

kde $\rho$ je měrný odpor vodiče, $l$ jeho délka a $S$ obsah průřezu.

U reálného transformátoru se na rozdíl od ideálního musí počítat s konečnou magnetickou vodivost, která má za následek vznik tzv. ztrát v železe. Tyto ztráty budou způsobeny vířivými proudy a hysterezí. Do náhradního schématu jsou tyto ztráty zavedeny připojením magnetizační reaktanci $X_M$, která je zapojena paralelně k odporu, který zahrnuje ztráty v železe (Rmag). Dále je nutné do náhradního schématu také zahrnout rozptylovou reaktanci ($X_{1,2Roz}$), která bere v potaz to, že určitá část magnetického toku se uzavře kolem vlastního vinutí cívky.




**Obr. 4.:** Náhradní schéma zatíženého transformátoru

# 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.