

**Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická**

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Substráty pro výkonovou elektroniku realizované
technologií tlustých vrstev**



Disertační práce

**k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika**

Ing. Jiří Hlína

**Substráty pro výkonovou elektroniku realizované
technologii tlustých vrstev**

Školitel: doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni, 18.5.2020

.....
podpis

Poděkování

Rád bych využil tuto příležitost a poděkoval svému školiteli doc. Ing. Aleši Hamáčkovi, Ph.D. a svému školiteli specialistovi doc. Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování a za přátelský přístup při mentorování mé osoby po celou dobu mého doktorského studia.

Rovněž bych rád poděkoval kolegům z Katedry technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni, kteří mi pomáhali a poskytovali cenné rady v průběhu mého studia.

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá problematikou výkonových substrátů, zejména výkonovými substráty realizovanými technologií tlustých vrstev (technologíí TPC). V první části práce jsou popsány konvenční výkonové substráty, keramické materiály používané pro jejich výrobu a výkonové substráty realizované technologií TPC. Experimentální část práce je zaměřena na pokročilé výkonové substráty realizované technologií TPC. V této části práce jsou popsány provedené experimenty a dosažené výsledky v oblasti vícevrstevných TPC struktur, TPC vrstev na keramických podložkách z nitridu hlinitého a odporových sítí kompatibilních s technologií TPC.

Klíčová slova

Výkonový substrát, měď, Al_2O_3 , AlN , TPC, vícevrstvé TPC, výkonový rezistor.

Abstract

This thesis deals with issues of power electronics substrates, especially with power electronics substrates realized by thick film technology (TPC technology). Conventional power electronics substrates, ceramic materials for their manufacturing and power electronics substrates realized by TPC technology are described in the first part of the thesis. The experimental part is focused on advanced power electronics substrates realized by TPC technology. In this part of the thesis are described performed experiments and achieved results in the field of multilayer TPC structures, TPC films on aluminum nitride ceramic bases and resistor networks compatible with TPC technology.

Keywords

Power electronics substrate, copper, Al_2O_3 , AlN , TPC, multilayer TPC, power resistor.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	7
1 ÚVOD.....	10
2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	11
2.1 KERAMICKÉ MATERIÁLY PRO VÝKONOVÉ SUBSTRÁTY	11
2.1.1 Oxid hlinitý (Al_2O_3).....	12
2.1.2 Nitrid hlinitý (AlN)	12
2.1.3 Nitrid křemičitý (Si_3N_4)	13
2.1.4 Oxid berylnatý (BeO)	13
2.1.5 Karbid křemíku (SiC)	13
2.1.6 Parametry keramických materiálů.....	14
2.2 PŘEHLED SUBSTRÁTŮ PRO VÝKONOVÉ APLIKACE.....	15
2.2.1 DBC substráty.....	15
2.2.2 AMB substráty.....	18
2.2.3 DPC substráty.....	20
2.2.4 DBA substráty.....	21
2.2.5 IMS substráty.....	22
2.2.6 Parametry výkonových substrátů.....	24
2.3 SUBSTRÁTY REALIZOVANÉ TECHNOLOGIÍ TLUSTÝCH VRSTEV	24
2.3.1 Technologie tlustých vrstev.....	24
2.3.1.1 Vodivé pasty.....	25
2.3.1.2 Odporové pasty.....	26
2.3.1.3 Dielektrické pasty.....	27
2.3.2 Tlusté vrstvy stříbra pro nevýkonové aplikace.....	27
2.3.3 Tlusté vrstvy mědi pro výkonové aplikace (technologie TPC).....	29
2.3.4 Srovnání technologií TPC a DBC.....	30
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	33
4 VÍCEVRSTVÉ TPC STRUKTURY	34
4.1 PARAMETRY JEDNOVRSTVÝCH TPC STRUKTUR	34
4.2 NÁVRH TESTOVACÍHO MOTIVU.....	38
4.3 REALIZACE TESTOVACÍHO MOTIVU	40
4.4 PARAMETRY VÍCEVRSTVÝCH TPC STRUKTUR (HORIZONTÁLNÍ PROPOJENÍ)	41
4.4.1 Struktura vrstev.....	41
4.4.2 Elektrické parametry.....	42
4.4.3 Adhezční síla.....	43
4.4.4 Možnosti tisku.....	45
4.5 SPOLEČNÝ VÝPAL VRSTEV.....	48
4.6 POKOVENÉ OTVORY (VERTIKÁLNÍ PROPOJENÍ)	51
4.6.1 Realizace pokovených otvorů.....	52
4.6.2 Rentgenové snímky pokovených otvorů.....	55
5 TPC METALIZACE NA PODLOŽKÁCH Z NITRIDU HLINITÉHO	56
5.1 INTERAKCE TPC VRSTEV S PODLOŽKAMI Z OXIDU HLINITÉHO	56

5.2	INTERAKCE TPC VRSTEV S PODLOŽKAMI Z NITRIDU HLINITÉHO.....	59
6	TECHNOLOGIE ODPOROVÝCH SÍTÍ S VODIVÝM SYSTÉMEM Z MĚDI	
	VYTVOŘENÝM TECHNOLOGIÍ TPC	66
6.1	NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO TESTOVÁNÍ REZISTORŮ.....	66
6.2	REZISTORY REALIZOVANÉ STANDARDNÍ ODPOROVOU PASTOU.....	67
	6.2.1 <i>Ověření funkčnosti rezistorů</i>	68
	6.2.2 <i>Návrh a realizace motivu výkonového rezistoru</i>	71
6.3	REZISTORY REALIZOVANÉ ODPOROVÝM INKOUSTEM	74
	6.3.1 <i>Technologie AerosolJet</i>	75
	6.3.2 <i>Realizace vzorků rezistorů</i>	75
	6.3.3 <i>Realizace vzorků rezistorů – upravené složení inkoustu.....</i>	78
	ZÁVĚR.....	81
	SHRNUTÍ.....	85
	SUMMARY.....	86
	ZUSAMMENFASSUNG	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	88
	SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ STUDENTA VZTAHUJÍCÍ SE K PŘEDMĚTU	
	DISERTAČNÍ PRÁCE	93
	OSTATNÍ PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA.....	95

Seznam symbolů a zkratk

AJ	Aerosol Jet = Zařízení pro depozici materiálů ve formě aerosolu
AMB	Active Metal Brazing = Aktivní tvrdé pájení kovů na keramickou podložku
CPV	Concentrated Photovoltaics = Koncentrovaná fotovoltaika
CT	Computed Tomography = Počítačová tomografie
CTE	Coefficient of Thermal Expansion = Součinitel teplotní délkové roztažnosti
CVD	Chemical Vapor Deposition = Chemická depozice z plynné fáze
DBA	Direct Bonded Aluminum = Přímé spojování hliníku s keramickou podložkou
DBC	Direct Bonded Copper = Přímé spojování mědi s keramickou podložkou
DPC	Direct Plated Copper = Spojování mědi s keramickou podložkou prostřednictvím mezivrstvy
DPS	Deska Plošného Spoje
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy = Energiově disperzivní spektroskopie
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold = Bezproudově nanesená dvojrstva niklu a zlata
FR4	Flame Retardant 4 = Substrát z tkaniny ze skelných vláken sycených epoxidovou pryskyřicí
IMS	Insulated Metal Substrate = Izolovaný kovový substrát
IRP	Intermittent Resistor Pattern = Motiv pro stanovení kontaktního odporu
LED	Light Emitting Diode = Dioda emitující světlo
ppm	Parts Per Million = Počet částic na jeden milion
scm	Standard Cubic Centimeter per Minute = Standardní kubický centimeter za minutu
SEM	Scanning Electron Microscope = Rastrovací elektronový mikroskop
TCR	Temperature Coefficient of Resistance = Teplotní součinitel odporu
TGA	Thermal Gravimetric Analysis = Termogravimetrická analýza
TPC	Thick Printed Copper = Tištěné tlusté vrstvy mědi

C (F)	Kapacita
d (m)	Tloušťka
ΔR (Ω)	Změna odporu
ΔT (K)	Změna teploty
E_P (kV·mm ⁻¹)	Elektrická pevnost
I_S (A)	Svodový proud
l (m)	Délka
L (W· Ω ·K ⁻²)	Lorentzovo číslo – pro měď $2,23 \cdot 10^{-8}$
R (Ω)	Elektrický odpor
S (m ²)	Průřez
T (K)	Teplota
U (V)	Napětí
U_P (kV)	Průrazné napětí
ϵ_0 (F·m ⁻¹)	Permitivita vakua – $8,85 \cdot 10^{-12}$
ϵ_r (-)	Relativní permitivita
λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Tepelná vodivost
ρ ($\Omega \cdot m$)	Měrný elektrický odpor - rezistivita
σ (S·m ⁻¹)	Měrná elektrická vodivost - konduktivita

Al₂O₃	Oxid hlinitý
AlN	Nitrid hlinitý
B₂O₃	Oxid boritý
BeO	Oxid berylnatý
Bi₂O₃	Oxid bismutitý
CaO	Oxid vápenatý
Cu₂O	Oxid měďný
IrO₂	Oxid iridičitý
MgO	Oxid hořečnatý
PdO	Oxid palladnatý
Rh₂O₃	Oxid rhoditý
RuO₂	Oxid rutheničitý

Si₃N₄	Nitrid křemičitý
SiC	Karbid křemíku
SiO₂	Oxid křemičitý
TiO₂	Oxid titaničitý
Y₂O₃	Oxid ytritý
ZrO₂	Oxid zirkoničitý

1 Úvod

Výkonová elektronika je speciálním odvětvím elektroniky, ve kterém jsou kladeny zvýšené nároky na elektronické součástky i substráty. Současným trendem ve výkonové elektronice je neustálá miniaturizace a zvyšování výkonů. Tento trend přináší problémy zejména s odvodem ztrátového tepla ze zatížených elektronických součástek. Běžně používané sklo-epoxidové podložky svými vlastnostmi v této oblasti již nedostačují. Z tohoto důvodu se ve výkonových aplikacích používají keramické podložky s vysokou tepelnou vodivostí. Tyto podložky rozvádí ztrátové teplo do větší plochy a tím snižují teplotu zatížených součástek a zvyšují jejich životnost. Vodivá vrstva na keramických podložkách je nejčastěji vytvářena technologií přímého spojování keramiky s mědí (DBC). Měď se při výrobě výkonových substrátů používá z důvodu vysoké tepelné i elektrické vodivosti.

Konvenční výkonové substráty se používají řadu let v různých aplikacích výkonové elektroniky, nicméně tyto substráty mají i řadu nevýhod, mezi které patří zejména nízké rozlišení motivů, které je důsledkem celoplošného nanášení tlusté měděné fólie a následného leptání požadovaných motivů a rovněž i velmi obtížná realizace vícevrstvých substrátů. Proto se v posledních letech v oblasti výkonových substrátů rozvíjí nová technologie tištěných tlustých vrstev mědi (TPC), která umožňuje selektivní nanášení měděných vrstev o tloušťce až 300 μm . Tato technologie se ve srovnání s technologií DBC vyznačuje celou řadou předností, mezi které patří například možnost vytváření měděných motivů s vysokým rozlišením a různou tloušťkou vrstev na jednom substrátu, vysoká odolnost proti změnám teplot a rovněž i možnost integrace pasivních součástek a realizace vícevrstvých struktur. Díky výše zmíněným přednostem je technologie TPC perspektivní technologií například pro realizaci chytrých výkonových modulů, CPV přijímačů, LED modulů atd.

Tato disertační práce se věnuje problematice výkonových substrátů a zejména výkonovým substrátům vytvořeným technologií TPC. V první části práce je shrnut současný stav poznání v oblasti konvenčních výkonových substrátů včetně keramických materiálů používaných při jejich realizaci a rovněž jsou zde popsány výkonové substráty realizované pomocí technologie TPC. Experimentální část práce je věnována pokročilým možnostem technologie TPC při realizaci výkonových substrátů. V této části práce jsou popsány provedené experimenty a shrnuty dosažené výsledky týkající se vícevrstvých TPC struktur, TPC vrstev na keramických podložkách z nitridu hlinitého a odporových sítí kompatibilních s technologií TPC.

2 Analýza současného stavu poznání

Tato kapitola obsahuje shrnutí současného stavu problematiky v oblasti výkonových substrátů. Jsou zde popsány nejpoužívanější keramické materiály pro výrobu keramických podložek, běžně používané konvenční výkonové substráty včetně technologie jejich výroby a rovněž i výkonové substráty realizované pomocí technologie tlustých vrstev (TPC).

V celé disertační práci je pojmem keramická podložka označena keramická destička bez vodivých motivů. Pojem substrát označuje keramickou podložku s vytvořeným vodivým motivem buď pomocí konvenčních technologií nebo technologií TPC.

2.1 Keramické materiály pro výkonové substráty

Keramické materiály se ve výkonové elektronice používají v širokém rozsahu aplikací, ať už se jedná například o pouzdra výrobků, různé distanční nebo nosné podložky. Jedná se o polykrystalické anorganické materiály charakteristické svou vysokou tvrdostí, odolností proti změnám teplot a nízkou tepelnou roztažností. Neustálými změnami teploty se mění i objem keramického materiálu. Tyto změny jsou definovány součinitelem teplotní roztažnosti (CTE). Tento součinitel je klíčovým parametrem při spojování keramických podložek a kovů. Oba spojované materiály by měly mít v ideálním případě podobné součinitele teplotní roztažnosti, aby vlivem neustálého zvyšování a snižování teploty (teplotních cyklů) nedocházelo k oddělení připojené kovové vrstvy od keramické podložky.

Velkou nevýhodou keramických materiálů je jejich křehkost, která je způsobena kovalentními nebo iontovými vazbami mezi atomy hlavní polykrystalické složky. Vnitřní struktura keramiky neumožňuje plastickou deformaci dislokačními mechanismy. Tento problém lze omezit zmenšováním keramických zrn, snížením pórovitosti a odstraněním skelné fáze na hranicích zrn.

Dále jsou popsány keramické materiály, které se používají jako nosné podložky ve výkonové elektronice. Keramická podložka tvoří mechanickou základnu pro další vrstvy a komponenty a zajišťuje odizolování vodivých částí výsledného zařízení. Volba vhodného keramického materiálu závisí na konkrétní aplikaci, požadavcích na vlastnosti substrátu a také na podmínkách, ve kterých bude výsledné zařízení provozováno. Nejčastěji používanými keramickými materiály jsou oxid hlinitý (Al_2O_3), nitrid hlinitý (AlN) a nitrid křemičitý (Si_3N_4). V některých aplikacích se používají i oxid berylnatý (BeO) a karbid křemíku (SiC).

Na výše zmíněné nosné podložky je z jedné nebo z obou stran různými technologiemi připojena měděná (technologie DBC a AMB) nebo hliníková (technologie DBA) fólie

definované čistoty a tloušťky. Měděná vrstva může být vytvořena také pokovením (technologie DPC) nebo technologií tlustých vrstev (technologie TPC). Tyto technologie jsou podrobněji popsány v kapitolách 2.2 a 2.3. [1–3]

2.1.1 Oxid hlinitý (Al_2O_3)

Oxid hlinitý (korund) je nejčastěji používaným materiálem pro výrobu keramických nosných podložek. Předností tohoto materiálu je dobrá tepelná vodivost ($24,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), výborná kombinace mechanických i elektrických vlastností a ceny. Dalšími přednostmi jsou vysoká tvrdost, pevnost a dobrá chemická odolnost. Naopak nevýhodou je nižší odolnost proti teplotním cyklům a poměrně vysoká křehkost.

Standardně se vyrábějí podložky o čistotě (obsahu Al_2O_3) 94–99,5 %. Zbylou část tvoří přísady zlepšující zpracovatelnost při výrobě a vlastnosti vypálené keramiky (SiO_2 , MgO , CaO atd.) [4]. Nejpoužívanější podložky jsou složeny z 96% oxidu hlinitého se 4 % přísad. Množství přísad má vliv na tepelnou vodivost podložky (s rostoucím obsahem přísad tepelná vodivost klesá).

Al_2O_3 podložky se běžně používají v nízko a středně výkonových aplikacích (do 10 kW). [2, 3]

Oxid hlinitý se vyrábí z bauxitových rud nejčastěji Bayerovým procesem. Výstupem tohoto procesu je keramický prášek, který je v dalším kroku rozemlet a jsou k němu přidány další přísady (sklo obsahující hořčík a vápník) a organické pojivo. Vytvořená směs je zpracována v kulových mlýnech, kde dochází ke sjednocení oxidu hlinitého s přísadami. Takto vznikne keramická hmota, která je dále zpracována válcováním, lisováním nebo litím na požadovaný tvar a rozměry. Dalším krokem je slinování (spékání) v běžné atmosféře vzduchu, které probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku při teplotě 400–550 °C dochází k odstranění organických látek a ve druhém kroku při teplotě 1500–1700 °C dochází ke slinutí struktury. [3, 5, 6]

2.1.2 Nitrid hlinitý (AlN)

Nitrid hlinitý je dalším často používaným keramickým materiálem pro výrobu nosných podložek. Tyto podložky vynikají vysokou tepelnou vodivostí (typicky $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), nízkým součinitelem teplotní roztažnosti ($4,4\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a výbornými elektroizolačními i mechanickými vlastnostmi.

Podložky z nitridu hlinitého se vyrábí podobným způsobem jako Al_2O_3 podložky. AlN prášek je smíchán s přísadami (skleněný prášek obsahující přísady jako CaO , Y_2O_3 atd.) a organickým pojivem a následně je zpracován na požadovaný tvar a rozměry. Slinování

probíhá při teplotách 1600-1900 °C v dusíkové atmosféře. Proces slinování vyžaduje přesnou kontrolu atmosféry i teploty. Použití AlN substrátů je omezeno teplotou 700 °C, protože po překročení této teploty dochází k silné oxidaci a na povrchu AlN se vytváří vrstva Al₂O₃. Kvůli nutnosti výpalu v dusíkové atmosféře jsou tyto podložky až 10x dražší než podložky z oxidu hlinitého. Nevýhodou je nízká adheze nanášených vrstev, proto je před nanášením dalších vrstev (před DBC i TPC) nutné tyto substráty preoxidovat (vytvoření tenké vrstvy Al₂O₃ na povrchu AlN). [6–8]

AlN podložky se používají v aplikacích s vysokým výkonovým zatížením do 180 kW, ve kterých jsou požadovány vysoká tepelná vodivost a nízká tepelná roztažnost. [3, 6]

2.1.3 Nitrid křemičitý (Si₃N₄)

Nitrid křemičitý je keramický materiál charakteristický svými výbornými mechanickými vlastnostmi, dobrou tepelnou vodivostí (90 W·m⁻¹·K⁻¹) a odolností proti korozi a oxidaci. Díky nízkému součiniteli teplotní roztažnosti (3,3·10⁻⁶ K⁻¹) je odolný vůči změnám teploty.

Slinování podložek z nitridu křemičitého probíhá v dusíkové atmosféře při teplotách 1750-1900 °C. Druhou možností výroby je reakční spékání výlisků z křemíkového prášku, ale takto připravený nitrid křemičitý má horší mechanické vlastnosti.

Keramické podložky vyrobené z nitridu křemičitého se používají v aplikacích, kde je požadována dlouhodobá životnost, dobrá tepelná vodivost a vysoká spolehlivost (např. AMB substráty). [3, 9]

2.1.4 Oxid berylnatý (BeO)

Oxid berylnatý je keramický materiál s unikátní kombinací elektrických, fyzikálních a chemických vlastností. Má nejvyšší tepelnou vodivost ze všech keramických materiálů (250 W·m⁻¹·K⁻¹, vyšší než hliník), nízké dielektrické ztráty, vysokou rezistivitu a vynikající pevnost. Velkým problémem oxidu berylnatého jsou jeho toxické (zejména při vdechnutí prášku) a karcinogenní účinky. Zejména kvůli nákladům na opatření pro snížení toxických účinků během výroby je oxid berylnatý nejdražším keramickým materiálem.

Keramické podložky vyrobené z oxidu berylnatého se používají v náročných výkonových aplikacích, kde jsou využity jejich unikátní vlastnosti a kde není překážkou vyšší cena. [2, 6, 10]

2.1.5 Karbid křemíku (SiC)

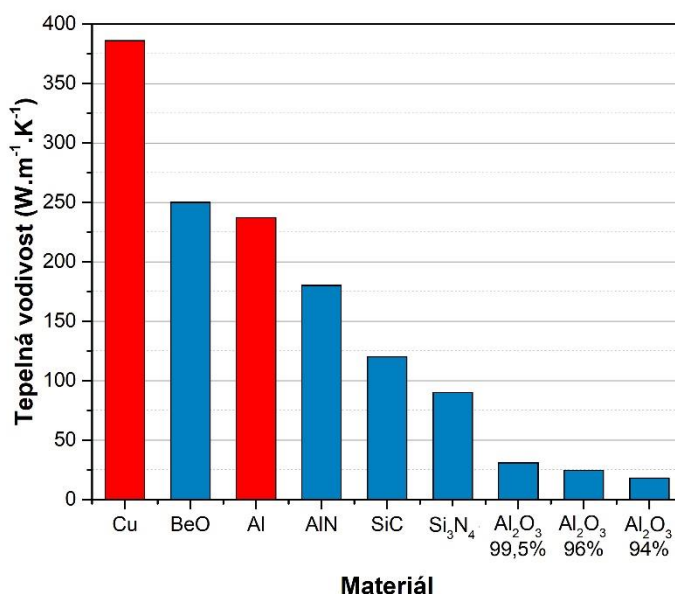
Karbid křemíku je keramický materiál s podobnými vlastnostmi, jaké má nitrid hliníku. Jeho přednostmi jsou vysoká tepelná vodivost (120 W·m⁻¹·K⁻¹), nízký součinitel teplotní roztažnosti (4,4·10⁻⁶ K⁻¹) a odolnost proti teplotním cyklům. Mechanické vlastnosti jsou

ovlivněny způsobem výroby a kvalitou základní suroviny. Nevýhodou karbidu křemíku je 4-5krát vyšší relativní permitivita a o několik řádů horší rezistivita než u ostatních keramických materiálů.

Karbid křemíku se nejnadhěji vyrábí zahřátím směsi křemičitého písku a koksu na teplotu 1600-2500 °C. Čistý karbid křemíku lze připravit metodou chemické depozice z plynné fáze (CVD) nebo tepelným rozkladem polymethylsilanu v inertní atmosféře. SiC připravený tímto způsobem má polovodičové vlastnosti (šířka zakázaného pásu 2,2-3,3 eV v závislosti na struktuře krystalu). Hutný karbid křemíku se obvykle připravuje spékáním při teplotách 1850-2500 °C. [6, 11]

2.1.6 Parametry keramických materiálů

Ve výkonových aplikacích jsou jednotlivé komponenty zatíženy vysokými výkony a produkují značné ztrátové teplo, které je potřeba odvádět. Z tohoto důvodu je velmi důležitým parametrem tepelná vodivost použitého keramického materiálu. Porovnání tepelných vodivostí jednotlivých keramických materiálů a kovů (měď, hliník) je uvedeno na Obr. 1. Další základní parametry jednotlivých keramických materiálů jsou shrnuty v Tab. 1.



Obr. 1: Porovnání tepelné vodivosti keramických materiálů a kovů [3].

Tab. 1: Parametry jednotlivých keramických materiálů [3, 6, 7, 9–11].

Keramický materiál	Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Součinitel teplotní roztažnosti (CTE) (10^{-6}K^{-1})	Modul pružnosti (GPa)	Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Rezistivita ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Relativní permitivita (-)
Al_2O_3 94%	18,0	8,1	300	3,69	$> 10^{14}$	9,1
Al_2O_3 96%	24,7	8,2	344	3,92	$> 10^{14}$	9,0
Al_2O_3 99,5%	31,0	8,4	370	3,98	$> 10^{14}$	9,8
AlN	180	4,4	300	3,27	$> 10^{12}$	8,9
Si_3N_4	90	3,3	320	3,18	$> 10^{12}$	7,5
BeO	250	7,5	345	2,87	$> 10^{14}$	6,5
SiC	120	4,0	407	3,10	10^5	40

2.2 Přehled substrátů pro výkonové aplikace

V této kapitole jsou popsány nejpoužívanější substráty pro výkonové aplikace a technologie jejich výroby. Jsou zde popsány substráty vyrobené technologiemi DBC (Direct Bonded Copper), AMB (Active Metal Brazing), DPC (Direct Plated Copper), DBA (Direct Bonded Aluminum) a IMS (Insulated Metal Substrate). Tyto substráty se liší způsobem vytvoření nebo připevnění vodivé vrstvy na keramickou podložku, svými parametry i cílovými aplikacemi. Jako vodivá vrstva je u těchto substrátů (kromě DBA) použita měď díky vysoké elektrické i tepelné vodivosti a relativně nízké ceně.

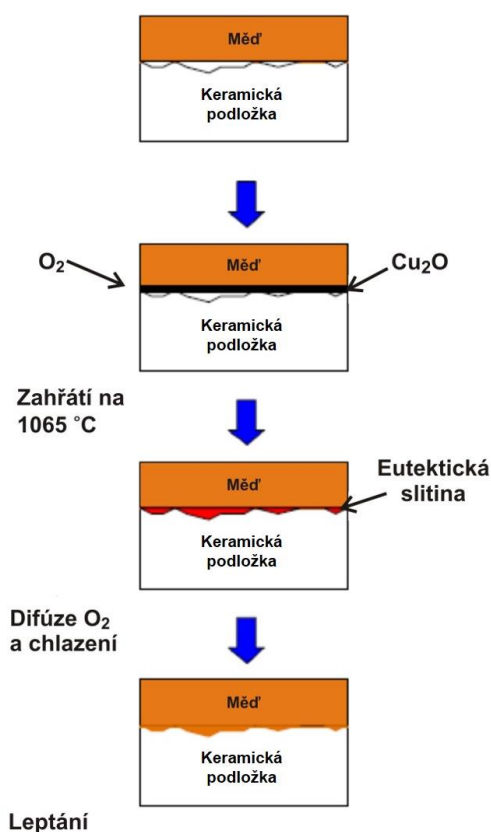
2.2.1 DBC substráty

Technologie DBC (Direct Bonded Copper, přímé spojení mědi s keramikou) byla vyvinuta v 70. letech a v současné době patří DBC substráty mezi nejpoužívanější ve výkonové elektronice. Tato technologie je založena na přímém spojení měděné fólie s keramickou podložkou prostřednictvím eutektické vrstvy. Nejčastěji používané keramické podložky pro DBC jsou vyrobeny z oxidu hlinitého (Al_2O_3), případně může být použit i nitrid hlinitý (AlN) nebo oxid berylnatý (BeO). Jako vodivá vrstva je použita měděná fólie o tloušťce až 650 μm [1], zpravidla se používá měděná fólie o tloušťce 300 μm . Měděná fólie bývá obvykle na obou stranách keramické podložky z důvodu minimalizace průhybu vlivem rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti mědi a keramiky. Rovněž tloušťka keramiky by měla být stejná nebo větší, než je tloušťka měděné fólie, aby nedošlo k popraskání nebo deformaci podložky. [1, 6, 12]

Při výrobě DBC substrátu (Obr. 2) je na keramickou podložku z obou stran položena měděná fólie o vysoké čistotě a požadované tloušťce, na které se na straně přikládání k podložce vytvoří tenká vrstva Cu_2O . Vrstvu Cu_2O na povrchu měděné fólie lze vytvořit dvěma způsoby. Buď nanesením Cu_2O prášku na povrch Cu (obtížná kontrola procesu) nebo oxidací Cu za zvýšené teploty (jednodušší metoda). Keramická podložka s přiloženými

měděnými fóliemi je následně ohřáta na teplotu tavení eutektika Cu-Cu₂O 1065 °C (teplota o 18 °C nižší než teplota tavení čisté mědi). Při této teplotě dojde k tavení vrstvy Cu₂O na měděné fólii a na povrchu podložky se vytvoří vrstva eutektické měděné taveniny. Tato tavenina reaguje s keramickou podložkou a po pomalém ochlazení na pokojovou teplotu dojde k vytvoření silné vazby mezi měděnou fólií a keramickou podložkou. Tento spoj je stabilní do teploty 850-900 °C. Vyšší teploty a rovněž příliš rychlé chlazení po výpalu mohou způsobit vznik prasklin nebo delaminaci měděné fólie. Celý tento proces probíhá v inertní (dusíkové) atmosféře za přítomnosti kontrolovaného množství kyslíku (0,39 %). [1, 3, 8]

Typ chemické vazby závisí na typu použité keramické podložky. V případě Al₂O₃ je vazba s mědí tvořena sloučeninou CuAl₂O₄. V případě AlN je nejprve potřeba na povrchu podložky oxidací vytvořit tenkou vrstvu Al₂O₃. Tato vrstva je vytvořena při teplotě kolem 1250 °C v oxidační atmosféře. Po oxidaci následuje stejný postup nanesení měděné vrstvy jako v případě Al₂O₃. Problémem jsou mikrotrhliny, které vznikají ve vrstvě Al₂O₃ v důsledku rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti mědi, Al₂O₃ a AlN. [1, 8, 13]

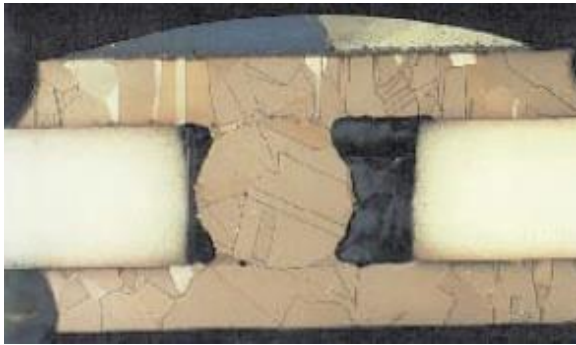


Obr. 2: Postup výroby DBC substrátu [14].

Požadovaný motiv je na DBC substrátu vytvořen pomocí fotolitografického leptání stejně jako v případě klasických DPS. Rozdíl spočívá v množství materiálu, který je potřeba odleptat, protože tloušťka měděné vrstvy je v případě DBC substrátů mnohem větší. Použití leptání

snižuje rozlišení výsledného motivu, proto by vodivé čáry a mezery mezi nimi neměly být menší než 500 μm (při 300 μm Cu) [15]. Po vyleptání motivu je možné provést povrchovou ochranu měděné vrstvy proti oxidaci např. poniklováním nebo metodou ENIG.

Technologie DBC umožňuje i vytváření vícevrstvých obvodů. Buď mohou být propojeny měděné vrstvy na obou stranách DBC substrátu nebo může být vytvořena sendvičová struktura. Elektrické propojení vrstev je realizováno skrz vyvrtané otvory v keramické podložce dvěma možnými způsoby. Při prvním způsobu propojení je při výrobě DBC substrátu do vyvrtaného otvoru vložena měděná kulička (Obr. 3), která elektricky propojí obě vrstvy. Druhý způsob propojení je realizován přitlačením měděných vrstev k sobě skrz otvor v keramice a svaření těchto vrstev k sobě (Obr. 4). Obě metody se vyznačují nízkou produktivitou, obtížnou automatizovatelností a náročností výroby. Z těchto důvodů se vícevrstvé DBC substráty příliš nepoužívají. [1, 16]



Obr. 3: Propojení měděných vrstev měděnou kuličkou [14].



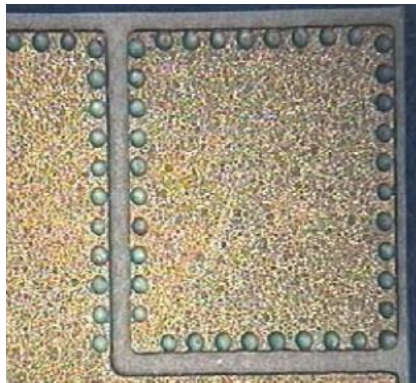
Obr. 4: Propojení měděných vrstev svařením skrz díru v keramice [14].

Velmi důležitá je správná volba tloušťky měděné fólie, aby byla zajištěna požadovaná elektrická a tepelná vodivost a s ohledem na tloušťku měděné fólie i volba správné tloušťky keramiky. Použití tenké fólie usnadňuje leptání a umožňuje vytvořit motivy s vyšším rozlišením, naopak tlustá fólie umožňuje přenos vysokých proudů. [8]

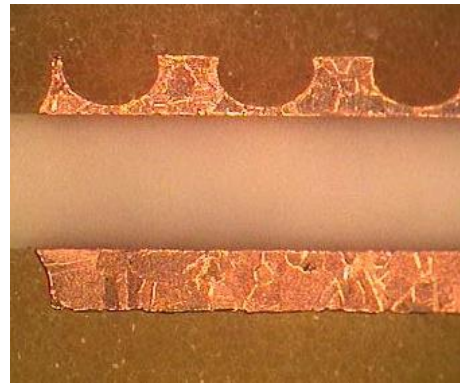
Technologie DBC je dlouhodobě používána v různých aplikacích výkonové elektroniky a vyznačuje se řadou výhod. Mezi hlavní výhody patří vysoká elektrická a tepelná vodivost měděné vrstvy, vysoká adheze měděné vrstvy na Al_2O_3 podložce, dobrá pájitelnost, bondovatelnost a rovněž možnost pokovení (ENIG).

Kromě výše uvedených výhod má DBC technologie i mnoho nevýhod. Jedná se o subtraktivní technologii, která využívá k vytváření motivů technologicky náročné leptání. Použití leptání přináší celou řadu problémů, mezi které patří například nižší rozlišení výsledných motivů, hrozící podleptání nebo přepleptání, vyšší spotřeba mědi a v neposlední řadě i problémy z hlediska ekologie. DBC technologie rovněž neumožňuje výrobu substrátů

s rozdílnou tloušťkou měděné vrstvy na jednom substrátu. Další nevýhodou je obtížné a nespolehlivé vytváření vícevrstevných struktur. DBC substráty také vykazují nízkou odolnost proti teplotním cyklům. Po několika desítkách cyklů dojde k delaminaci měděné vrstvy. Tento problém částečně řeší perforace okrajů měděné vrstvy (tzv. dimples), která zvýší odolnost DBC substrátů na několik stovek teplotních cyklů (Obr. 5 a Obr. 6). Odolnost DBC substrátů proti teplotním cyklům výrazně ovlivňuje i tloušťka měděné fólie (větší tloušťka – menší odolnost) [17]. [16, 18]



Obr. 5: Perforace okrajů měděné vrstvy [14].

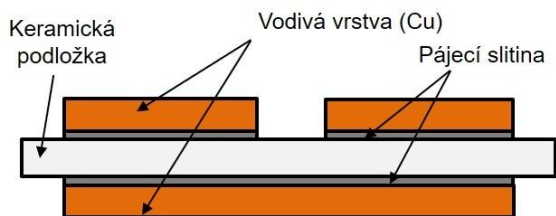


Obr. 6: Metalografický výbrus [14].

2.2.2 AMB substráty

Technologie AMB (Active Metal Brazing) umožňuje spojení kovů (např. měď, titan, molybden atd.) s keramikou pomocí tvrdého pájení. AMB substráty představují možnou alternativu k technologii DBC. Jejich výhodou je vyšší přilnavost kovové vrstvy a nižší potřebná teplota pro vytvoření dobrého spojení s keramikou. Nejčastěji používanou keramickou podložkou pro technologii AMB je nitrid křemičitý (Si_3N_4), případně mohou být použity i nitrid hlinitý (AlN), oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo karbid křemíku (SiC). Struktura AMB substrátu je znázorněna na Obr. 7. [1, 19]

Nejčastěji připojovaným kovem bývá měď ve formě fólie nebo plechu o tloušťce až 0,8 mm [19]. Spoj mezi mědí a keramikou je tvořeno pájecí slitinou ve formě preformy (pájecí slitina ve formě tenkého plechu), pasty nebo prášku. V případě připojování měděné fólie nebo plechu se nejčastěji používají slitiny mědi, stříbra a titanu. Titan v pájecí slitině představuje aktivní prvek, který zvyšuje reaktivitu, zajišťuje dobrou smáčivost pájecí slitiny na povrchu keramické podložky a během pájení difunduje do keramické podložky i měděné vrstvy. Titan je nejčastěji používaným aktivním prvkem v pájecích slitinách používaných pro technologii AMB, případně může být použit i jiný prvek ze IV. B skupiny periodické tabulky prvků (zirkon, hafnium). Používané pájecí slitiny pro AMB jsou shrnuty v Tab. 2. [3, 8, 20, 21]



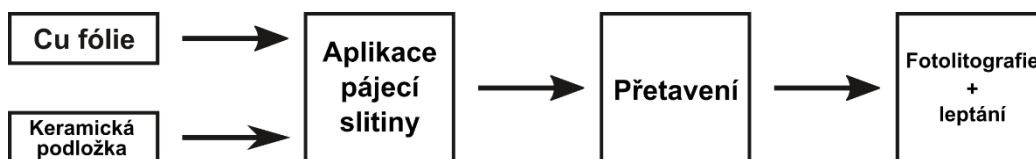
Obr. 7: AMB substrát.

Tab. 2: Pájecí slitiny pro AMB [8].

Slitina	Složení (hm. %)	Teplota pájení (°C)
Au-Ni-Ti	96,4-3-0,6	1025-1030
Cu-Al-Si-Ti	92,75-2-3-2,25	1025-1050
Pb-In-Ti	92-4-4	850-950
Ti-Cu-Ni	70-15-15	960-1000
Ti-Cu-Ag	68,8-26,7-4,5	810-900
Sn-Ag-Ti	86-10-4	850-950
Ag-Ti	96-4	1000-1050
Ag-Cu-Ti	70,5-26,5-3	850-950
Ag-Cu-Ti	64-34,5-1,5	850-950
Ag-Cu-Ti	63-35,2-1,75	830-850
Ag-Cu-In-Ti	72,5-19,5-5-3	850-950
Ag-Cu-In-Ti	61,5-24-14,5-(Ti)*	850-950
Ag-Cu-In-Ti	59-27,2-12,5-1,25	700-750
Ag-Cu-Al-Ti	92,75-5-1-1,25	900-950
Ag-Cu-Sn-Ti	63-34,2-1-1,75	810-860
Ag-Cu-Ni-Ti	71,5-28-0,5-(Ti)*	850-950
Ag-Cu-Ni-Ti	56-42-2-(Ti)*	900-1000

*Obsah titanu < 0,1%

Proces výroby AMB substrátů (Obr. 8) probíhá obvykle v inertní atmosféře nebo ve vysokém vakuu (10^{-3} Pa), protože nadměrné množství kyslíku v atmosféře může reagovat s aktivním prvkem v pájecí slitině a ovlivnit pevnost a integritu spoje. Výroba AMB substrátů probíhá při teplotách v rozmezí 700-1050 °C v závislosti na složení pájecí slitiny [8]. Při tomto procesu vznikne mezi keramikou a mědí silné intermetalické spojení odolné proti dlouhodobému termomechanickému namáhání, protože vrstva pájecí slitiny vyrovnává termální stres mezi keramickou podložkou a připojenou měděnou vrstvou. [20, 21]



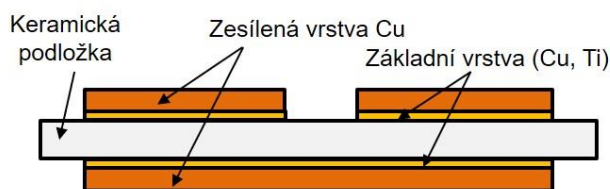
Obr. 8: Postup výroby AMB substrátu.

Velmi důležitý je správný výběr jednotlivých složek pájecí slitiny a rovněž i samotný proces pájení. Nesprávné složení pájecí slitiny nebo nedodržení předepsaného procesu pájení může způsobit vyšší výskyt a růst křehkých intermetalických sloučenin, které mohou při dlouhodobém termomechanickém namáhání způsobit praskliny a trhliny v mezivrstvě mezi mědí a keramickou podložkou. Z tohoto důvodu je AMB proces technologicky náročnější než výroba DBC substrátů. [3]

Stejně jako u DBC technologie je vodivá vrstva AMB substrátů tvořena měděnou folií nebo plechem a požadovaný motiv je vytvořen pomocí fotolitografického leptání. Při výrobě AMB substrátu je navíc potřeba odleptat i vrstvu pájecí slitiny. AMB a DBC substráty mají srovnatelné vlastnosti s výjimkou odolnosti proti teplotním cyklům, která je u AMB substrátů mnohem vyšší (několik tisíc cyklů). [1, 8]

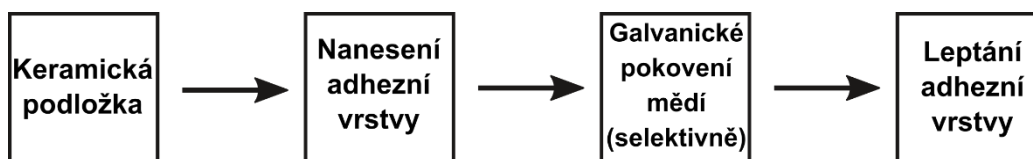
2.2.3 DPC substráty

Měděnou vrstvu lze na keramické podložce vytvořit i technologií DPC (Direct Plated Copper). Tato technologie je založena na celoplošném nanesení adhezni kovové vrstvy (měď, titan), která je poté selektivně zesílena galvanickým pokovením mědí. Nejčastěji používanými keramickými podložkami pro technologii DPC jsou oxid hlinitý (Al_2O_3) a nitrid hlinitý (AlN). Struktura DPC substrátu je znázorněna na Obr. 9. [8, 22]



Obr. 9: DPC substrát.

Prvním krokem výroby DPC substrátů (Obr. 10) je nanesení adhezni vrstvy. Adhezni vrstva může být nanášena několika způsoby – technologií tenkých vrstev (vakuové depoziční metody – napařování, naprašování) nebo chemickým pokovením. Požadovaný motiv je následně vytvořen standardní fotolitografií. Pomocí fotorezistu jsou zakryta místa, kde nemá být vrstva zesílena. Poté je adhezni vrstva selektivně zesílena galvanickým pokovením mědí. Následně je odstraněn fotorezist a odleptána adhezni vrstva kovu.



Obr. 10: Postup výroby DPC substrátu.

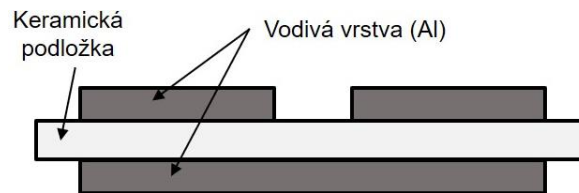
Výhodou této technologie je, že se jedná o nízkoteplotní proces, při kterém nevzniká žádný termomechanický stres mezi mědí a keramikou jako u vysokoteplotních procesů (DBC, AMB). Díky tomu lze vyrobit substrát s měděnou metalizací pouze na jedné straně, aniž by došlo k deformaci keramické podložky (průhyb, trhliny). Další výhodou spočívá v leptání měděné vrstvy malé tloušťky (základní vrstva). V případě, že je adhezni vrstva vytvořena chemickým pokovením nebo vakuovými depozičními metodami, lze snadno realizovat

i pokovené otvory, které jsou v keramické podložce vyvrtány před nanesením základní vrstvy a propojit tak obě strany substrátu. [8, 23]

Nevýhodou DPC technologie je, že nelze vytvořit substráty s tloušťkou mědi větší než 125 μm [8] a technologická náročnost celého procesu výroby (pokovování, vakuové depoziční metody).

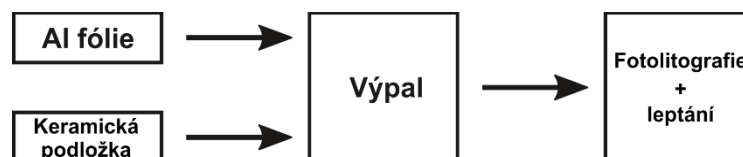
2.2.4 DBA substráty

Dalším typem substrátů používaných ve výkonové elektronice jsou substráty vyrobené technologií DBA (Direct Bonded Aluminum). Tyto substráty jsou založeny na spojení hliníkové fólie nebo plechu o vysoké čistotě s keramickou podložkou a představují další možnou alternativu k technologii DBC. Tloušťka hliníkové vrstvy může být až 0,4 mm [24]. Nejčastěji používanou keramickou podložkou je nitrid hlinitý, případně může být použit i oxid hlinitý. Struktura DBA substrátu je znázorněna na Obr. 11. [3]



Obr. 11: DBA substrát.

Tyto substráty je možné vyrobit dvěma způsoby. První způsob je podobný jako při výrobě DBC substrátů, kdy je hliníková fólie na keramickou podložku připojena přímo prostřednictvím eutektické vrstvy (Obr. 12). Druhý způsob naopak vychází z technologie AMB. Hliníková fólie je v tomto případě na keramickou podložku připojena pomocí tvrdého pájení AlSi pájecí slitinou. Tato slitina má teplotu tání 577 °C a může být nanášena ve formě preformy nebo pasty. Oba výše zmíněné postupy probíhají ve vakuu nebo v inertní atmosféře při teplotě 580-600 °C a při zatížení substrátu tlakem 5 MPa. Požadovaný motiv je opět vytvořen pomocí leptání. [25, 26]



Obr. 12: Postup výroby DBA substrátu.

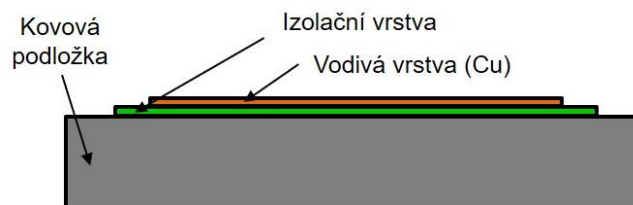
DBA substráty jsou odolnější proti působení teplotních cyklů než DBC i AMB substráty, protože hliník je kujnější kov než měď a dokáže absorbovat termomechanické napětí, které tyto cykly způsobují. Proto tyto substráty nalézají uplatnění v zařízeních provozovaných v extrémních podmínkách. Na druhou stranu má hliník nižší hustotu a značně nižší tepelnou a

elektrickou vodivost, proto jsou potřeba tlustější vrstvy hliníku pro zajištění stejného odvodu ztrátového tepla a stejného proudového zatížení jako v případě měděné vrstvy. [21, 27]

Největší překážkou používání DBA substrátů je rychle se vytvářející, kompaktní tenká vrstva oxidu hlinitého na povrchu substrátu. Tato vrstva oxidu zabráňuje vytvoření silného spojení mezi hliníkovou folií a keramickou podložkou a rovněž značně omezuje možnost pájení a nanášení dalších vrstev. Z tohoto důvodu je nutná úprava povrchu DBA substrátů např. zinkováním a následně pokovením niklem nebo stříbrem. Další možností je natisknutí nanočásticové stříbrné pasty nebo použití speciálních pájecích slitin, které umožňují pájení na hliník. [28]

2.2.5 IMS substráty

Ve výkonové elektronice se rovněž používají substráty s kovovým jádrem označované jako IMS (Insulated Metal Substrate). Na rozdíl od DBC, AMB a DBA není jako základ IMS substrátu použita keramická, ale kovová podložka pokrytá izolačním materiálem, na kterém je vytvořen vodivý motiv. IMS substrát (Obr. 13) se tedy skládá z kovové podložky, izolační a vodivé vrstvy. IMS substráty jsou používány jako náhrada klasických substrátů FR4, které mají nízkou tepelnou vodivost a nezajišťují dostatečný odvod tepla ze zatížených součástek, a proto nejsou v mnoha případech vhodné k použití ve výkonových aplikacích.



Obr. 13: IMS substrát.

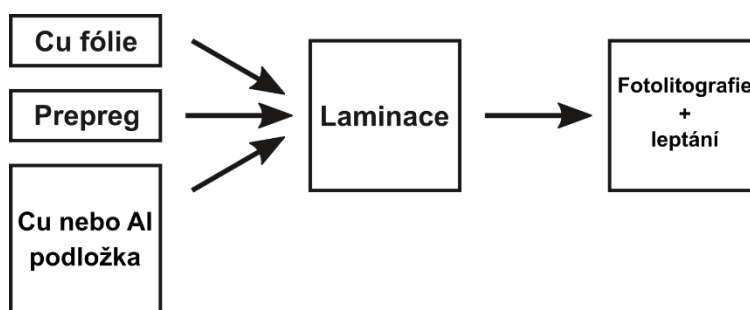
Tloušťka kovové podložky se pohybuje v rozmezí 0,5-9 mm v závislosti na konkrétní aplikaci. Tato kovová podložka bývá nejčastěji vyrobena ze slitin na bázi hliníku, případně může být jako nosný materiál použita i měď. Hliníkové slitiny jsou používány v méně náročných aplikacích, kde není překážkou nižší tepelná vodivost hliníku v porovnání s mědí. Nejpoužívanějšími slitinami na bázi hliníku jsou hliník s hořčíkem AlMg2,5 (označení Al 5052) a hliník s hořčíkem a křemíkem AlMg1SiCu (označení Al 6061). Častěji se používá slitina AlMg2,5 z důvodu lehčího opracování a tváření. Měď se díky vyšší tepelné vodivosti používá v aplikacích, kde jsou přenášeny vyšší výkony a kde je potřeba lepší odvod ztrátového tepla. Parametry jednotlivých kovových materiálů jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Parametry kovových materiálů používaných pro IMS substráty [8, 29, 30].

Materiál	Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Součinitel teplotní roztlačnosti (CTE) (10^{-6} K^{-1})	Modul pružnosti (GPa)	Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Al 5052	138	25,7	70,3	2,68
Al 6061	167	25,2	68,9	2,70
Cu	386	16,5	110	8,96

Na kovové podložce je nanesena izolační vrstva o tloušťce zpravidla 50-200 μm , která odděluje vodivé části IMS substrátu. Izolační vrstva má z celé struktury IMS substrátu nejnižší tepelnou vodivost, proto by tato vrstva měla být co nejtenčí, ale zároveň musí zajistit spolehlivé oddělení vodivé vrstvy od kovové podložky. Nejčastěji se používá prepreg (skleněná vlákna impregnovaná epoxidovou pryskyřicí) plněný keramickým práškem (Al_2O_3 , AlN , BeO) z důvodu zvýšení tepelné vodivosti. Velikost, tvar a množství keramických zrn určují výsledné vlastnosti izolační vrstvy.

Na izolační vrstvě je nanesena vrstva mědi, která zajišťuje vodivé propojení jednotlivých součástek na povrchu substrátu. Pokud je jako izolační vrstva použit prepreg, tvoří vodivou vrstvu měděná fólie, která je na kovovou podložku připojena laminací společně s prepregem. Tloušťka měděné fólie může být 18, 35, 70 nebo 105 μm . Proces výroby IMS substrátu je znázorněn na Obr. 14. [3, 31, 32]


Obr. 14: Postup výroby IMS substrátu.

Technologie IMS umožňuje i výrobu vícevrstvých struktur, které vznikají vrstvením jednotlivých izolačních a vodivých vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou propojeny slepými pokovenými otvory, které v tomto případě slouží i k vedení tepla mezi jednotlivými vrstvami. Vyšší počet vrstev snižuje tepelnou vodivost substrátu a zároveň zvyšuje pravděpodobnost vzniku trhlin v důsledku rozdílných součinitelů teplotní roztlačnosti použitých materiálů.

Výhodou IMS substrátů jsou jejich mechanické vlastnosti v porovnání s keramikou, 5-10krát vyšší tepelná vodivost než v případě klasických FR4 substrátů a také to, že v mnoha případech už není potřeba přídavný chladič. Naopak mezi nevýhody patří vysoká tepelná

roztlačnost kovů, které jsou použity jako nosná podložka a rovněž i nízká tepelná vodivost a nízká elektrická pevnost izolační vrstvy. [31, 32]

2.2.6 Parametry výkonových substrátů

Jednotlivé typy výkonových substrátů se liší svými parametry, spolehlivostí a cílovými aplikacemi. V Tab. 4 jsou uvedeny jejich základní parametry. Pro porovnání jsou zde uvedeny i parametry nevýkonového substrátu FR4.

Tab. 4: Parametry jednotlivých výkonových substrátů [21, 24, 31, 33].

Substrát	Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Součinitel teplotní roztažnosti (CTE) (10^{-6}K^{-1})	Elektrická pevnost ($\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Teplotní odolnost ($^{\circ}\text{C}$)
FR4	0,25	20	40	< 150
DBC Al ₂ O ₃ , 300 μm Cu	19-26	7,5	~15	850-900
DBC AlN, 300 μm Cu	180	> 4,6	15-20	850-900
DPC, Al ₂ O ₃	19-26	7,5	~15	850-900
AMB Si ₃ N ₄ , 300 μm Cu	90	> 3,4	~18	< 600
DBA AlN, 400 μm Al	170	-	> 11	< 500
IMS	1-8	13-21	6	< 150

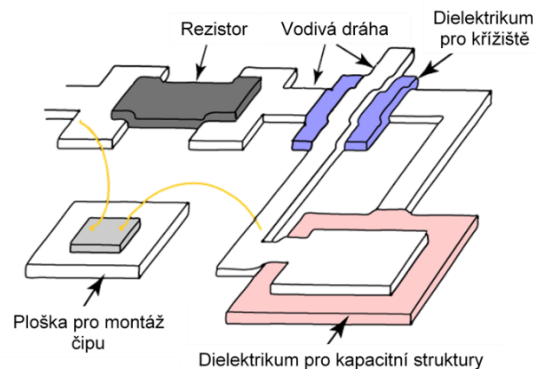
2.3 Substráty realizované technologií tlustých vrstev

Tato kapitola je věnována substrátům, které jsou vyrobeny technologií tlustých vrstev. Je zde popsána technologie tlustých vrstev a jednotlivé typy past. Vodivé vrstvy jsou obvykle natištěny stříbrnými (pro nevýkonové aplikace) nebo měděnými pastami (pro výkonové aplikace).

2.3.1 Technologie tlustých vrstev

Technologie tlustých vrstev je nejpoužívanější a nejefektivnější technologie pro hybridní elektronické obvody, která pokrývá širokou oblast aplikací a je vhodná i pro výrobu výkonových hybridních elektronických obvodů. Jedná se o aditivní technologii používanou pro vytváření vodivých, odporových nebo dielektrických vrstev na keramických (obvykle Al₂O₃) podložkách (Obr. 15). Technologií tlustých vrstev lze tedy vytvářet vodivé motivy, integrované nebo diskrétní rezistory, kondenzátory a vícevrstvé obvody. Tlustými vrstvami se označují vrstvy o tloušťce větší než 1 μm . Tyto vrstvy jsou sekvenčně natištěny sítotiskem ve formě pasty a následně vysušeny a vypáleny. Pro tlusté vrstvy představuje sítotisk jednoduchou, efektivní a dostatečně přesnou technologii tisku. Sušení natištěných vrstev probíhá při teplotách 100-150 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 10-15 minut. Po sušení následuje výpal v peci

při teplotách 500-1000 °C (typicky 850 °C) v oxidační nebo inertní atmosféře. Konkrétní teplota sušení a výpalu závisí na konkrétním typu pasty. [2, 34]



Obr. 15: Technologie tlustých vrstev [35].

Tlustovrstvé pasty se skládají ze třech hlavních složek – funkční, pojivové a organické. Funkční složka udává charakter pasty (vodivá, odporová, dielektrická). Pojivová složka (skelná fáze) je tvořena skleněnou fritou, která během výpalu společně se sklem obsaženým v keramické podložce vytváří vazbu mezi funkční složkou pasty a podložkou. Při výpalu nesmí dojít k roztavení, ale k měknutí skla, aby vznikla nosná matrice pro funkční složku. Proto se používají nízkotavná skla s teplotou měknutí od 600 °C. Organická složka zajišťuje tiskové vlastnosti (viskozitu) pasty. Je tvořena organickými látkami, které v průběhu výpalu vyhoří a nepodílí se na konečné funkčnosti vypálené vrstvy. [2, 8, 36]

Důležitým parametrem vypálených vrstev je plošný odpor. Plošný odpor je definován jako odpor plochy jednoho čtverce definované tloušťky. Jednotkou plošného odporu je tedy Ω/\square (Ohm na čtverec). Velmi důležitým parametrem je také adheze vypálené vrstvy na keramické podložce. U odporových past je důležitým parametrem teplotní součinitel odporu (TCR), který udává, o kolik se změní odpor 1 Ω při změně teploty o 1 °C. Teplotní součinitel odporu je obvykle udáván v K^{-1} nebo $^{\circ}C^{-1}$. [2, 8]

2.3.1.1 Vodivé pasty

Funkční složka vodivých past pro tlusté vrstvy je tvořena kovovými částicemi. Běžně používanými kovy jsou zlato, stříbro a slitiny stříbra s palladiem, stříbra s platinou nebo slitiny zlata s palladiem, zlata s platinou a také měď. Kovové částice typicky tvoří 50-75 % hmotnosti pasty. Velikost a tvar těchto částic má značný vliv na elektrické a fyzikální vlastnosti výsledné vrstvy. Vlastnosti běžně používaných vodivých past jsou uvedeny v Tab. 5. Vhodná vodivá pasta pro konkrétní aplikace je volena na základě kompatibility s odporovými a dielektrickými pastami, ceny a dalších požadavků. [2, 8, 37]

Tab. 5: *Vlastnosti vodivých past [8].*

Vodivá pasta	Plošný odpor * (mΩ/□)	Pájitelnost	Adheze (Al ₂ O ₃ podložka)
Au-Pt	30-50	+++	++
Au-Pd	5-7	++	+
Ag	3-5	++	++
Ag-Pt	4-6	++	+++
Ag-Pd (25:1)	4-7	++	++
Ag-Pd (6:1)	12-16	++	++
Ag-Pd (4:1)	15-20	++	++
Cu	2-4	+++	++

* vypálené vrstvy o tloušťce 12,7 μm

2.3.1.2 Odporové pasty

Odporové pasty se používají pro tisk diskretních nebo integrovaných odporů. Funkční složka odporových past je tvořena částicemi kovů nebo oxidů kovů. Koncentrace těchto částic má vliv na výslednou hodnotu plošného odporu. Hodnota plošného odporu je nastavována poměrem funkční a pojivové složky. První komerčně dostupné pasty byly založeny na kombinaci palladia, oxidů palladia (PdO) a stříbra. Tyto pasty byly značně citlivé na přesnost vypalovacího profilu. Moderní komerčně dostupné pasty jsou založeny na oxidech ruthenia (RuO₂), iridia (IrO₂) a rhodia (Rh₂O₃). Tyto pasty jsou méně citlivé na přesnost vypalovacího profilu, mají nižší hodnotu teplotního součinitele odporu (TCR) a dobrou stabilitu.

Odporové pasty jsou dostupné v širokém rozsahu hodnot plošného odporu (v dekadických řadách). Pasty obsahující oxidy ruthenia, iridia nebo rhodia mohou mít plošný odpor v rozmezí 10-10⁷ Ω/□. V pastách s nízkými hodnotami plošného odporu (0,1-10 Ω/□) se používají slitiny stříbra s palladiem (Ag-Pd). Odporové pasty se obvykle vypalují v oxidační atmosféře.

Prvním krokem výroby tlustovrstvých rezistorů je tisk a výpal vývodů (převážně Ag-Pd pasty). V případě, že se jedná o rezistory přímo integrované na substrátu, je tedy nejdříve natištěna vodivá vrstva. Správný výběr materiálu vývodů (kontaktů) je klíčový pro dosažení požadovaných parametrů a stability rezistoru. Typ materiálu, ze kterého jsou vývody vyrobeny, může ovlivnit hodnotu plošného odporu. Dalším krokem je tisk a výpal odporové vrstvy. Odporová vrstva může být následně zakryta izolační vrstvou (zakrývací pastou), která ji chrání proti vlivům prostředí a zároveň slouží jako mechanická ochrana. Pro dosažení přesné hodnoty odporu mohou být rezistory trimovány laserem.

Tlustovrstvé rezistory jsou typicky vyráběny s tolerancemi hodnot odporu $\pm 10\%$ (bez trimování) a teplotním součinitelem odporu $\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. [2, 8, 37]

2.3.1.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty se používají pro zapouzdření (např. odporových vrstev), oddělení vodivých vrstev (vícevrstvé obvody) a pro tisk kondenzátorů. Tyto pasty se tedy dělí na izolační a dielektrické. Izolační pasty se používají pro oddělení vodivých vrstev a pro zapouzdření (zakrytí) a jedná se o pasty s nízkou relativní permitivitou (menší než 15), naopak pro tisk kondenzátorů se používají dielektrické pasty s vysokou relativní permitivitou (větší než 20).

Izolační pasty se dále dělí na zakrývací a na pasty pro tisk vícevrstevných obvodů. Úkolem zakrývacích past je mechanická ochrana a ochrana proti vlivům prostředí (chemické látky atd.). Tyto pasty jsou tvořeny skly s teplotou tavení kolem $500\text{ }^\circ\text{C}$. Pasty pro tisk vícevrstevných obvodů se používají jak pro křížení dvou vodičů, tak i pro vytváření struktur s několika vrstvami. Hlavní složkou izolačních past je sklo, které je plněné keramickým práškem (např. Al_2O_3 atd.). U izolačních past jsou požadovány vysoká elektrická pevnost, vysoký izolační odpor, nízký ztrátový činitel a součinitel teplotní roztažnosti podobný s použitou podložkou.

Funkční složka dielektrických past pro tisk kondenzátorů je obvykle tvořena anorganickými sloučeninami (titanáty, niobáty, oxidy titanu a feroelektrické materiály). Pro vytvoření vrstev bez pórů je u většiny past založených na těchto materiálech potřeba vysoká teplota výpalu ($1300\text{-}1400\text{ }^\circ\text{C}$). Teplotu výpalu lze snížit přidáním skla, které zvýší adhezi, ale zároveň výrazně sníží relativní permitivitu. Dielektrické pasty vypalované při $850\text{ }^\circ\text{C}$ mají relativní permitivitu v rozmezí 25-500.

U tištěných kondenzátorů je obtížné dodržet přesné tolerance hodnot kapacity a je obtížné připravit pasty s vysokou relativní permitivitou. Proto se tištěné kondenzátory příliš nepoužívají. [2, 8, 37]

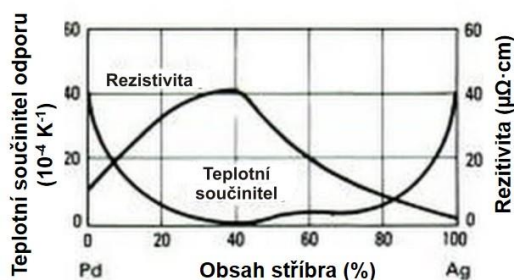
2.3.2 Tlusté vrstvy stříbra pro nevýkonové aplikace

Vodivé pasty, jejichž funkční složka je tvořena stříbrem nebo slitinami stříbra (s palladiem nebo platinou), patří mezi nejpoužívanější pasty v hybridní elektronice. Stříbro je ušlechtilý kov s nejvyšší elektrickou i tepelnou vodivostí ze všech kovů. Nevýhodou past obsahující čisté stříbro je malá odolnost proti rozpouštění v pájce a tendence stříbra k migraci za přítomnosti elektrického pole. Elektromigrace způsobuje růst dendritů a následný zkrat. Stříbro může migrovat i skrz dielektrické vrstvy během výpalu. Migraci stříbra lze omezit správným návrhem obvodu, vhodným dielektrikem a použitím speciálních zakrývacích past.

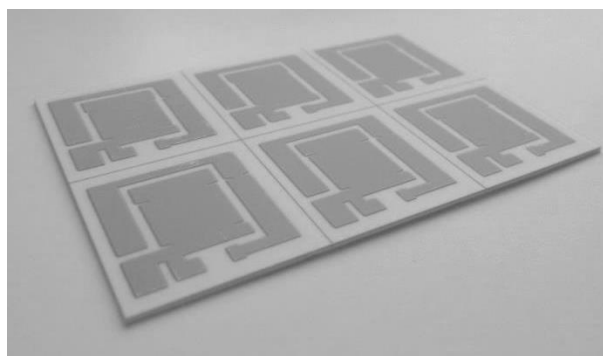
Pasty obsahující čisté stříbro se používají např. při výrobě plasmových displejů, metalizací pro solární čipy a dalších aplikacích hybridní elektroniky, které nejsou určeny pro provoz v korozivním prostředí.

Nejrozšířenějšími vodivými pastami v hybridní elektronice jsou pasty založené na slitině stříbra s palladiem (v různém poměru). Tyto pasty se typicky používají například pro tisk vývodů rezistorů. Přidání palladia do čistého stříbra zlepšuje odolnost proti rozpouštění v pájce a snižuje tendenci stříbra k migraci. Přidání palladia má i nežádoucí účinky. S rostoucím obsahem palladia v pastě se značně zvyšuje rezistivita (Obr. 16). Nejvyšší rezistivitu má slitina obsahující 40 % stříbra a 60 % palladia. Na druhou stranu má tato slitina téměř nulový teplotní součinitel odporu, a proto ji lze použít pro výrobu rezistorů s nízkými hodnotami plošného odporu (do 10 Ω/\square). Nežádoucí jsou rovněž sklony palladia k oxidaci. Během vypalovacího procesu při chlazení se na povrchu vrstvy tvoří oxid palladnatý (PdO), který způsobuje snížení vodivosti a pájitelnosti. Tvorbu PdO lze omezit rychlým chlazením.

Nejčastěji se používají slitiny stříbra s palladiem v poměru 3:1, 4:1 a 6:1. Slitiny v tomto poměru mají vysokou vodivost. Podobnou vodivost mají i slitiny stříbra s platinou (v poměru 100:1). Přidání malého množství platiny zvýší odolnost stříbra proti rozpouštění v pájce, nicméně malé množství platiny nesníží tendenci stříbra k migraci. Ukázka substrátu s natištěnou vrstvou stříbra je zobrazena na Obr. 17.



Obr. 16: Rezistivita a teplotní součinitel odporu slitin stříbra s palladiem [8].



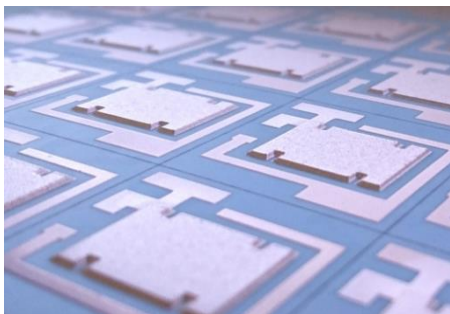
Obr. 17: Substrát s natištěnou vrstvou stříbra (Ag-Pd pasta).

Ve výkonových obvodech je potřeba přenášet vysoké proudy a odvádět ztrátové teplo od zatížených součástek, proto musí mít natištěné vrstvy značnou tloušťku. Stříbro je sice kov s nejvyšší elektrickou i tepelnou vodivostí, ale vzhledem k jeho ceně by bylo použití stříbra ve výkonových obvodech značně nákladné. Proto se stříbrné pasty (převážně Ag-Pd pasty) používají především pro nevýkonové aplikace. [2, 8]

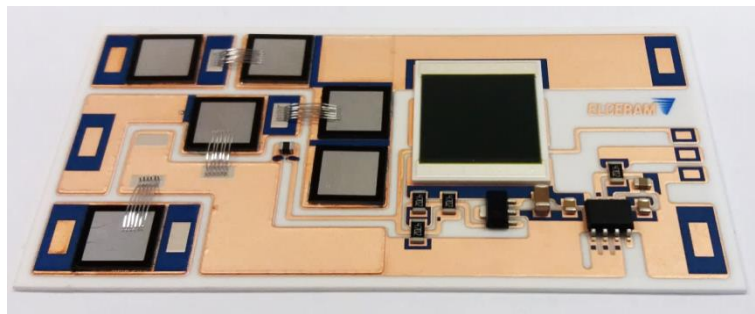
2.3.3 Tlusté vrstvy mědi pro výkonové aplikace (technologie TPC)

Funkční složka vodivých past může být tvořena i mědí. Měď je kov s vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí a v porovnání se stříbrem i nízkou cenou. Proto je měď vhodným materiálem pro výrobu výkonových substrátů. Na rozdíl od stříbra nemá měď tendenci migrovat a natištěné měděné vrstvy jsou odolné proti rozpouštění v pájce. Nevýhodou je, že měď silně oxiduje, proto musí být měděné pasty vypalovány v inertní atmosféře. Problematická je rovněž adheze natištěných měděných vrstev (v porovnání se stříbrnými vrstvami). [2, 8]

V posledních letech se pro keramické podložky s natištěnými tlustými vrstvami mědi začalo používat označení TPC (Thick Printed Copper). Výkonové substráty vyrobené technologií TPC představují alternativu k substrátům vyrobeným technologií DBC. Jednou z největších výhod ve srovnání s DBC substráty je vynikající odolnost proti teplotním cyklům. Díky dalším výhodám, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.3.4, je TPC technologie základem pro realizaci pokročilých inteligentních výkonových modulů. Příklady TPC substrátu a inteligentního výkonového modulu vyrobeného TPC technologií jsou zobrazeny na Obr. 18 a Obr. 19.



Obr. 18: TPC substrát.



Obr. 19: Inteligentní 100 A třífázový usměrňovač s integrovaným měřením teploty a proudu.

V případě TPC substrátů je měděná vrstva selektivně natištěna sítotiskem speciálními měděnými pastami na Al_2O_3 nebo preoxidované AlN podložky. Poté následuje sušení při teplotě $125\text{ }^\circ\text{C}$ a výpal v retortové peci s ochrannou dusíkovou atmosférou při teplotách kolem $900\text{ }^\circ\text{C}$. Následně mohou být natištěny další měděné vrstvy až do celkové tloušťky $300\text{ }\mu\text{m}$. [38, 39]

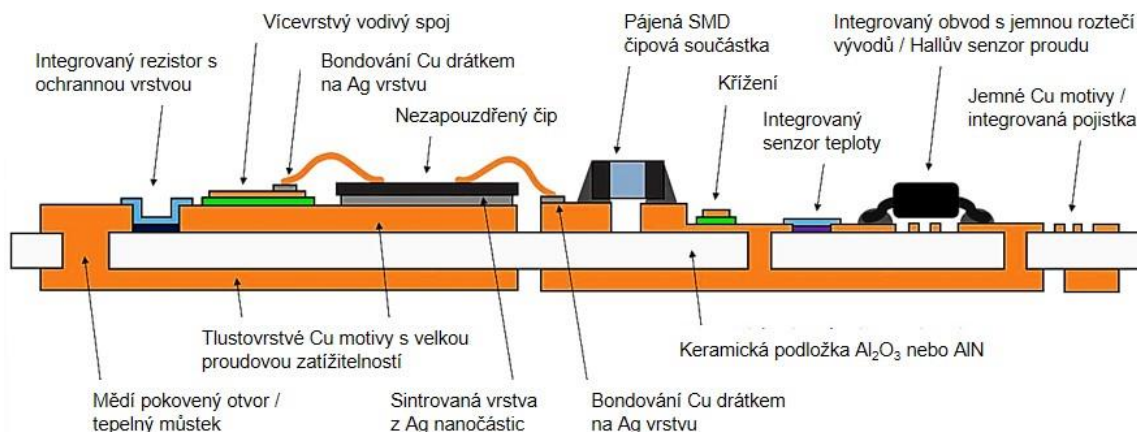
Hlavními výrobci měděných past pro technologii TPC jsou společnosti Heraeus, ElectroScience Laboratories (ESL) a DuPont a vývoj těchto past neustále probíhá. Velký progres TPC technologie nastal v roce 2014, kdy společnost Heraeus představila systém skládající se ze dvou past. První pasta je adhezivní a obsahuje větší množství pojivové složky (skelné fáze). Tato pasta je určena pro vytvoření dobrého spojení s keramickou (obvykle Al_2O_3) podložkou.

Druhá pasta je určena k navyšování tloušťky výsledné měděné vrstvy a obsahuje menší množství pojiva. [39, 40]

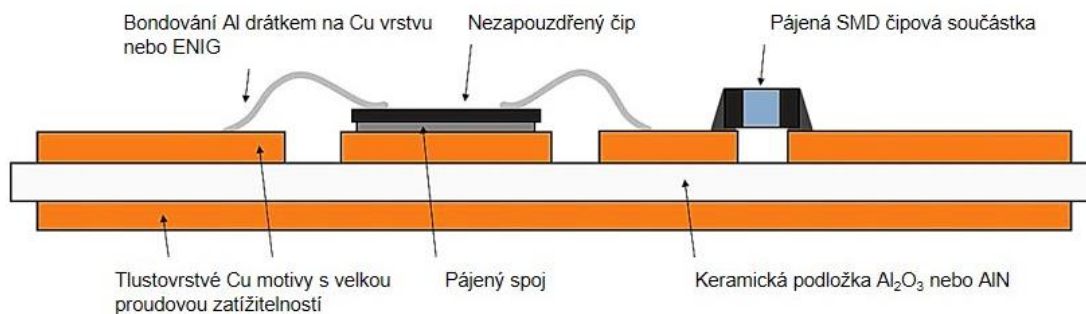
TPC substráty mohou být vypalovány v průběžných nebo retortových pecích. Kvůli snadné oxidaci musí být měděné vrstvy vypalovány v ochranné dusíkové atmosféře s určitou koncentrací kyslíku zejména v první části vypalovacího profilu (do teploty 400 °C). V této části vypalovacího profilu dochází k odstranění organické složky z pasty chemickou reakcí s kyslíkem. Příliš nízká koncentrace kyslíku snižuje adhezi vypálené vrstvy, na druhou stranu při příliš vysoké koncentraci kyslíku dochází během výpalu k oxidaci měděné vrstvy. Vrstva oxidu snižuje pájitelnost a elektrickou vodivost vrstvy. Na vlastnosti vypálené vrstvy má značný vliv i maximální teplota výpalu. Proto je velmi důležitá optimalizace podmínek výpalu. Problematika výpalu TPC vrstev je podrobně popsána v [41]. [39, 42, 43]

2.3.4 Srovnání technologií TPC a DBC

Technologie TPC má v porovnání s DBC technologií (princip a vlastnosti jsou popsány v kapitole 2.2.1) mnoho výhod. Rozdíly mezi možnostmi těchto dvou technologií jsou zobrazeny na Obr. 20 a Obr. 21 a srovnání parametrů je uvedeno v Tab. 6. Měděná vrstva je v případě TPC natištěna sítotiskem (aditivní nanášení) pouze na požadovaná místa vodivého motivu, zatímco v případě DBC je vodivý motiv vyleptán v měděné folii, která je na keramickou podložku připojena prostřednictvím eutektické vrstvy. Použití aditivní technologie nanášení přináší úsporu mědi a odpadá nutnost použití leptání, které je technologicky náročné a vzniká při něm značné množství chemického odpadu.



Obr. 20: Výkonový substrát realizovaný technologií TPC s integrovanými pasivními a aktivními součástkami (nezapouzdřené čipy, IO s jemnou roztečí vývodů, integrované tištěné rezistory, senzory teploty, propojovací otvory a křížení vodičů).

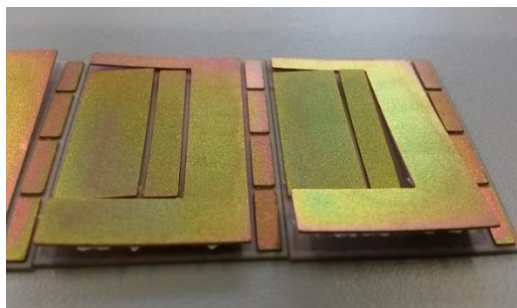


Obr. 21: Výkonový substrát realizovaný technologií DBC s omezenými technologickými možnostmi integrace komponent.

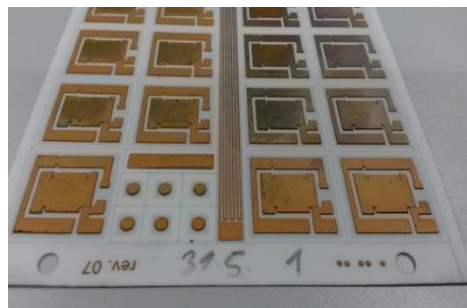
Tab. 6: Porovnání parametrů DBC a TPC technologií [21, 39].

Parametry	DBC technologie	TPC technologie
Typická tloušťka Cu (μm)	300	300
Minimální tloušťka Cu (μm)	80	20
Rozlišení vodič/mezera (μm)	500 při 300 μm Cu	250 při 300 μm Cu
Hustota Cu vrstvy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	8,94	7,14
Konduktivita Cu vrstvy ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	58	42,1
Tepelná vodivost Cu vrstvy ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	398	280
Měrná tepelná kapacita Cu vrstvy ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	385	377
Spolehlivost	Dobrá (s perforací okrajů)	Vynikající
Náročnost výroby	Nízká	Nízká
Cena	Nízká	Střední (závisí na počtu vrstev)

Hlavní výhodou TPC technologie je možnost vytvářet měděné vrstvy s různou tloušťkou na jednom substrátu (tloušťky v rozmezí 20-300 μm) a možnost realizace jemných motivů s rozlišením vodič/mezera až 100 μm (při tloušťce vrstvy 20 μm). Na TPC substrát lze tedy osadit i součástky s jemnou roztečí vývodů. Díky tomu mohou být na jednom TPC substrátu umístěny jak výkonové, tak i řídicí obvody (na rozdíl od DBC).



Obr. 22: DBC substrát po 170 teplotních cyklech.



Obr. 23: TPC substrát po 1000 teplotních cyklech (bez známek delaminace).

Další velkou výhodou TPC je vysoká odolnost proti teplotním cyklům (mnohem vyšší než u DBC), která je způsobena porózní vypálené měděné vrstvy. Porézní struktura vrstvy

snižuje vliv rozdílných teplotních roztažností mědi a Al_2O_3 podložky. Nicméně tato porozita rovněž snižuje elektrickou i tepelnou vodivost vrstvy (Tab. 6). U DBC substrátů dochází k delaminaci měděné fólie po několika desítkách cyklů, zatímco u TPC substrátu není patrné žádné poškození ani po několika tisících cyklech (Obr. 22 a Obr. 23). [39, 44]

Technologií TPC je možné vytvářet i vícevrstvé propojovací struktury (křížení vodičů, pokovené otvory atd.) Vytváření těchto struktur pomocí DBC technologie je rovněž možné, ale technologicky velmi náročné (viz kapitola 2.2.1). TPC technologie umožňuje i realizaci a integraci pasivních součástek (tištěné tlustovrstvé rezistory, senzory teploty atd.)

Oba typy substrátů umožňují integraci holých výkonových čipů i zapouzdřených součástek a možnost pokovení (např. ENIG). Je potřeba dodat, že technologie TPC je nová a stále se nachází ve stádiu optimalizace a dalšího testování. Naopak technologie DBC je zavedená a používaná desítky let v mnoha aplikacích výkonové elektroniky. [39]

3 Cíle disertační práce

Na základě předchozí kapitoly byly stanoveny cíle disertační práce v následujících oblastech.

1. Technologie pro realizaci vícevrstevných TPC substrátů.

Návrh a realizace horizontálních a vertikálních propojovacích struktur kompatibilních s technologií TPC. Otestování fyzikálních vlastností jednovrstevných a vícevrstevných TPC substrátů a jejich porovnání s ohledem na jejich konečné využití.

2. Realizace vodivých motivů vytvořených technologií TPC na podložkách z nitridu hlinitého.

Vytvoření spolehlivého spojení tištěných měděných vrstev a keramických podložek s vysokou tepelnou vodivostí, jako je např. nitrid hlinitý.

3. Technologie odporových sítí s vodivým systémem z mědi vytvořeným technologií TPC.

Návrh a realizace plně tištěných tlustovrstevných rezistorů s měděnými (TPC) vývody, včetně jejich detailní charakterizace a specifikace.

4 Vícevrstvé TPC struktury

Technologie TPC ze své podstaty umožňuje i vytváření vícevrstevných struktur. V těchto strukturách jsou jednotlivé měděné vrstvy odděleny dielektrickou vrstvou. Dielektrická vrstva je rovněž natištěna sítotiskem, musí být kompatibilní s tištěnými měděnými vrstvami a musí umožňovat výpal v ochranné dusíkové atmosféře. Díky schopnosti vytváření vícevrstevných struktur a dalším výhodám je TPC technologie vhodná pro výrobu pokročilých inteligentních výkonových modulů, jejichž řídicí i výkonové obvody mohou být umístěny na jednom substrátu. Řídicí obvody těchto modulů mohou být vytvořeny na několika měděných vrstvách, které mohou být vzájemně horizontálně i vertikálně propojeny.

Vícevrstvé struktury jsou v současné době obvykle realizovány technologií tlustých vrstev stříbra. Stříbro je kov s vyšší tepelnou i elektrickou vodivostí, nicméně dostupné stříbrné pasty nejsou určeny k vrstvení do velkých tloušťek v řádu stovek μm . Stříbrné pasty jsou rovněž mnohem dražší než měděné a jejich použití pro výrobu výkonových substrátů by bylo velmi neekonomické.

V této kapitole jsou nejprve shrnuty parametry jednovrstevných TPC struktur. Další část kapitoly je již věnována vícevrstevným TPC strukturám.

4.1 Parametry jednovrstevných TPC struktur

Jednovrstvou TPC strukturou je v tomto případě myšlena měděná (TPC) vrstva natištěná na jedné nebo z obou stran keramické podložky (zpravidla 96% Al_2O_3). Samotná měděná vrstva může být tvořena jednou nebo několika postupně natištěnými a vypálenými vrstvami měděné pasty. Struktura vypálené měděné vrstvy obsahuje částice skla a také póry, proto mají tištěné měděné vrstvy v porovnání s celistvou mědí rozdílné elektrické, mechanické i tepelné parametry.

Kvůli ověření vlivu tloušťky tištěných měděných vrstev na elektrické, mechanické i tepelné parametry byly realizovány vzorky s různou tloušťkou (počtem) měděných vrstev (1-6) na Al_2O_3 podložce o tloušťce 0,6 mm, které obsahovaly motivy pro měření rezistivity, proudové zatížitelnosti, adhezní síly, hustoty měděné vrstvy atd. První dvě TPC vrstvy byly natištěny měděnou pastou Heraeus C7403 (adhezní pasta) a další vrstvy pastou Heraeus C7404 (pasta pro navyšování tloušťky měděné vrstvy).

Tloušťka měděné vrstvy jednotlivých vzorků byla změřena na metalografických výbrusech (Obr. 25) pomocí SEM mikroskopu Phenom ProX. Červená barva na SEM snímcích

představuje póry. Porozita jednotlivých vzorků (v %) byla vypočtena pomocí softwaru Promicra QuickPHOTO.

Pro stanovení rezistivity, elektrické a tepelné vodivosti byl použit měděný meandr o délce 50 čtverců (Obr. 24). Profil (průřez) vodivé měděné dráhy byl změřen laserovým konfokálním mikroskopem Olympus OLS5000. Čtyřbodovou metodou byl změřen odpor meandru a poté vypočtena rezistivita měděné vrstvy ρ podle vzorce

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (4.1)$$

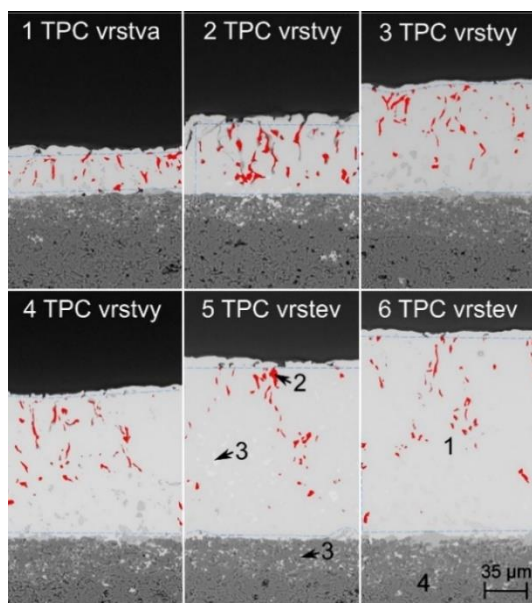
kde R je změřený odpor měděného meandru, S je průřez vodivé dráhy meandru změřený mikroskopem a l je délka meandru.

Dalším vypočteným parametrem byla konduktivita σ , která je převrácenou hodnotou rezistivity ρ .

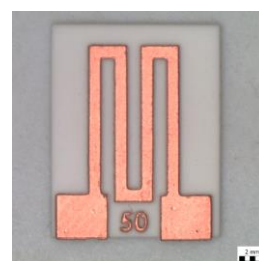
Tepelná vodivost měděné vrstvy λ byla vypočtena podle Wiedemann-Franzova zákona [45]

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T, \quad (4.2)$$

kde σ je konduktivita měděné vrstvy, L je Lorentzovo číslo (pro měď $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$) a T je teplota (pokojová teplota 298,15 K).



Obr. 25: Metallografické výbrusy vzorků s různým počtem TPC vrstev včetně měření porozity – 1: měděná vrstva, 2: póry, 3: skelná fáze, 4: Al_2O_3 podložka.



Obr. 24: Měděný meandr.



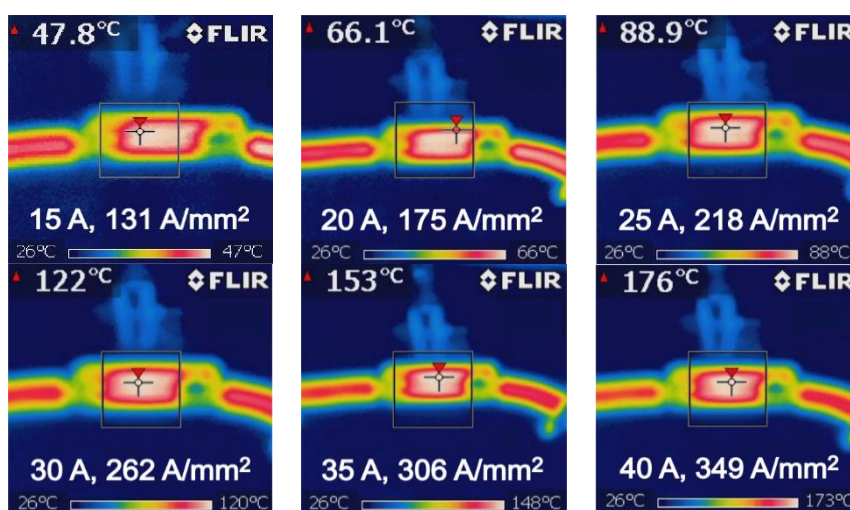
Obr. 26: Měděný motiv pro měření proudové zatížitelnosti.

Adhezní síla měděných vrstev na Al_2O_3 podložce byla měřena metodou Pull off (ASTM D4541). Vzorky pro měření adhezní síly se skládaly z kruhového měděného motivu o průměru

4 mm na vrchní straně a čtvercového měděného motivu o rozměrech 5×5 mm na spodní straně Al₂O₃ podložky. Princip měření adhezni síly je podrobněji popsán v kapitole 4.4.3.

Hustota měděných vrstev byla změřena přesnou laboratorní vahou. Odloupnuté měděné vrstvy byly nejprve zváženy na vzduchu a poté v isopropanolu. Z těchto dvou hmotností byla vypočtena hustota měděných vrstev.

Proudová zatížitelnost byla změřena na měděném motivu s šířkou měděné dráhy 1 mm a tloušťkou měděné vrstvy 126 μm (Obr. 26). Tato měděná dráha byla zatěžována stejnosměrným proudem v rozmezí 15-40 A s krokem 5 A, a vždy po ustálení teploty substrátu (po 5 minutách) byla termokamerou změřena teplota (Obr. 27). Proudová zatížitelnost měděných vrstev byla vypočtena na 218 A·mm⁻² při zatížení proudem 25 A a oteplení substrátu na 90 °C. Tato teplota je bezpečná pro spolehlivou funkci elektronických součástek na substrátu.



Obr. 27: Proudová zatížitelnost měděných vrstev.

Výše popsané parametry měděných vrstev jsou shrnuty v Tab. 7 (vždy průměrné hodnoty ze dvou vzorků, u měření adheze průměrné hodnoty ze šesti vzorků). Konduktivita a tepelná vodivost měděných vrstev se zvyšuje s narůstající tloušťkou vrstvy (Obr. 28). U vzorků s tloušťkou měděné vrstvy 166,8 μm jsou hodnoty konduktivity i tepelné vodivosti o 14 % nižší než v případě celistvé mědi. V případě tištěných měděných vrstev jsou nižší hodnoty konduktivity i tepelné vodivosti dány strukturou vrstev, která obsahuje i póry a sklo (skelnou fázi). Skelná fáze je součástí formulace měděné pasty a tato skelná fáze proniká během výpalu do Al₂O₃ podložky (Obr. 25) a zajišťuje dobré spojení mezi měděnou vrstvou a podložkou. Nicméně, malé množství sklené fáze zůstává po výpalu i v měděné vrstvě a ovlivňuje její parametry.

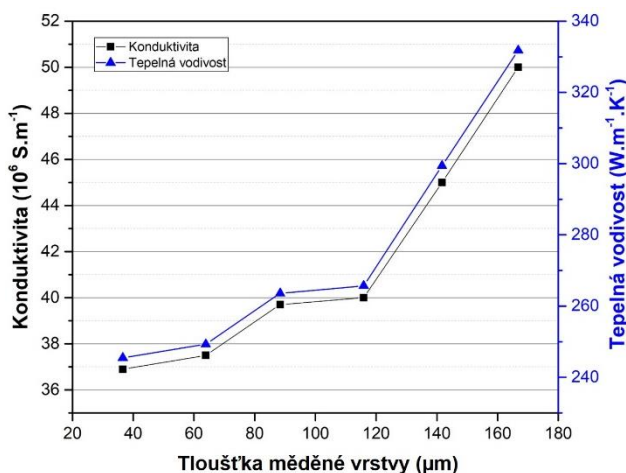
Statistické výsledky měření adhezni síly jsou zobrazeny na Obr. 29. U vzorků s 1-4 TPC vrstvami docházelo k odtržení částečně mezi měděnou vrstvou a Al₂O₃ podložkou a částečně

v pájce. Naopak u vzorků s 5-6 TPC vrstvami došlo k odtržení z Al_2O_3 podložky na rozhraní proniklé skelné fáze (Obr. 30).

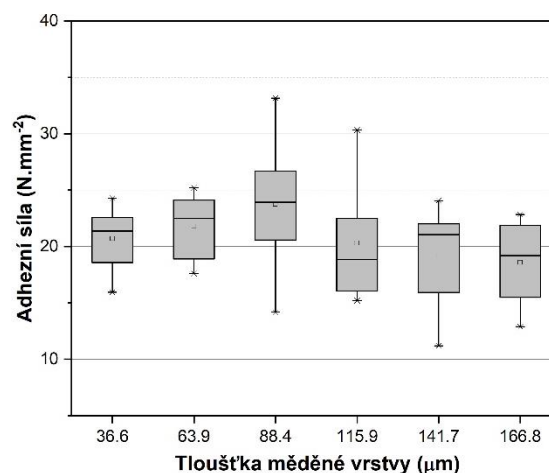
Hustota měděných vrstev se pohybovala kolem $7,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (o 13 % nižší než hustota celistvé mědi). Nižší hustota měděných vrstev je rovněž způsobena póry a obsaženou sklenou fází.

Tab. 7: Parametry tištěných měděných vrstev.

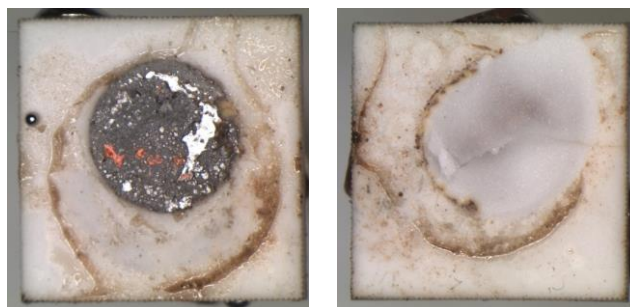
Parametr	1 TPC vrstva	2 TPC vrstvy	3 TPC vrstvy	4 TPC vrstvy	5 TPC vrstev	6 TPC vrstev	Tabulkové hodnoty mědi [8]
Tloušťka (μm)	36,6	63,9	88,4	115,9	141,7	166,8	-
Rezistivita ($10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$)	2,71	2,63	2,52	2,50	2,22	2,00	1,68
Konduktivita ($10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$)	36,9	37,5	39,7	40,0	45,0	50,0	58,11
Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	245,5	249,3	263,6	265,7	299,4	331,8	386,0
Adhezní síla ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	20,62	22,10	23,74	20,29	19,33	18,70	-
Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7,91	7,89	7,85	7,96	7,86	7,77	8,96
Porozita (%)	4,26	5,30	2,73	2,08	2,45	1,15	-



Obr. 28: Elektrická a tepelná vodivost měděných vrstev.



Obr. 29: Adhezní síla měděných vrstev.



Obr. 30: Vzorky po měření adhezní síly – vzorek se dvěma TPC vrstvami (vlevo) a vzorek se šesti TPC vrstvami (vpravo).

Parametry měděných vrstev popsané v této kapitole jsou stejné v případě jednovrstvých i vícevrstvých TPC struktur, protože měděné vrstvy jsou v obou případech tištěny stejným způsobem a stejnými pastami. Liší se však parametry izolačních vrstev. V případě

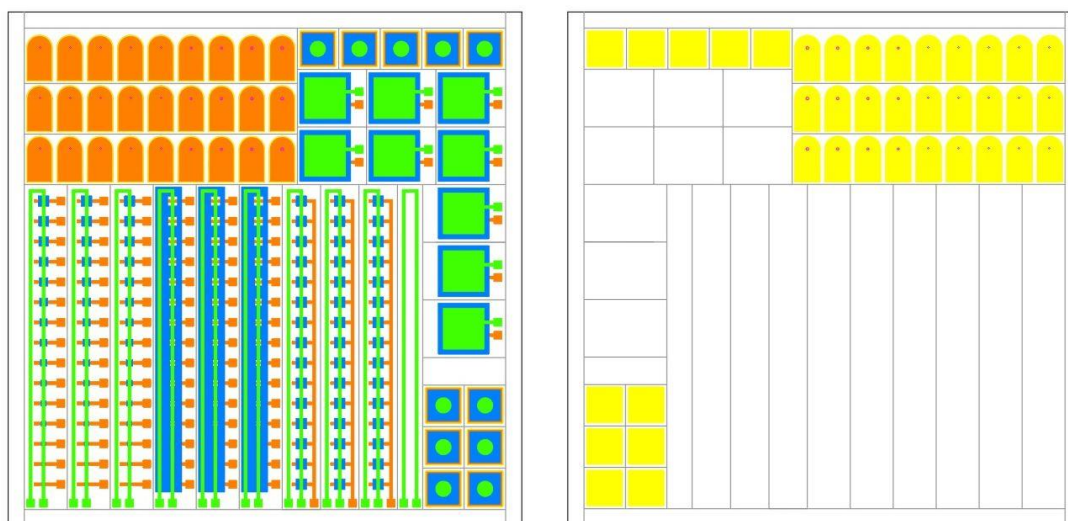
jednovrstvých TPC struktur je izolační vrstvou samotná keramická podložka (Al_2O_3), naopak u vícevrstevných TPC struktur je izolační vrstva natištěna dielektrickou pastou. V Tab. 8 jsou uvedeny parametry Al_2O_3 podložky o tloušťce 0,6 mm z obou stran potištěné jednou vrstvou mědi (adhezni pasta C7403). Postup měření těchto parametrů je podrobněji popsán v kapitole 4.4.2. Rozdíl byl pouze v nárůstu napětí při měření elektrické pevnosti (1 kV/s).

Tab. 8: Parametry potištěné Al_2O_3 podložky.

Parametr	Hodnota
Kapacita při 100 kHz (pF)	71,45
Relativní permitivita při 100 kHz (-)	10,46
Ztrátový činitel při 100 kHz (-)	0,0013
Rezistivita ($10^{12} \Omega \cdot m$)	25,42
Průrazné napětí (kV)	15,89
Elektrická pevnost ($kV \cdot mm^{-1}$)	24,98

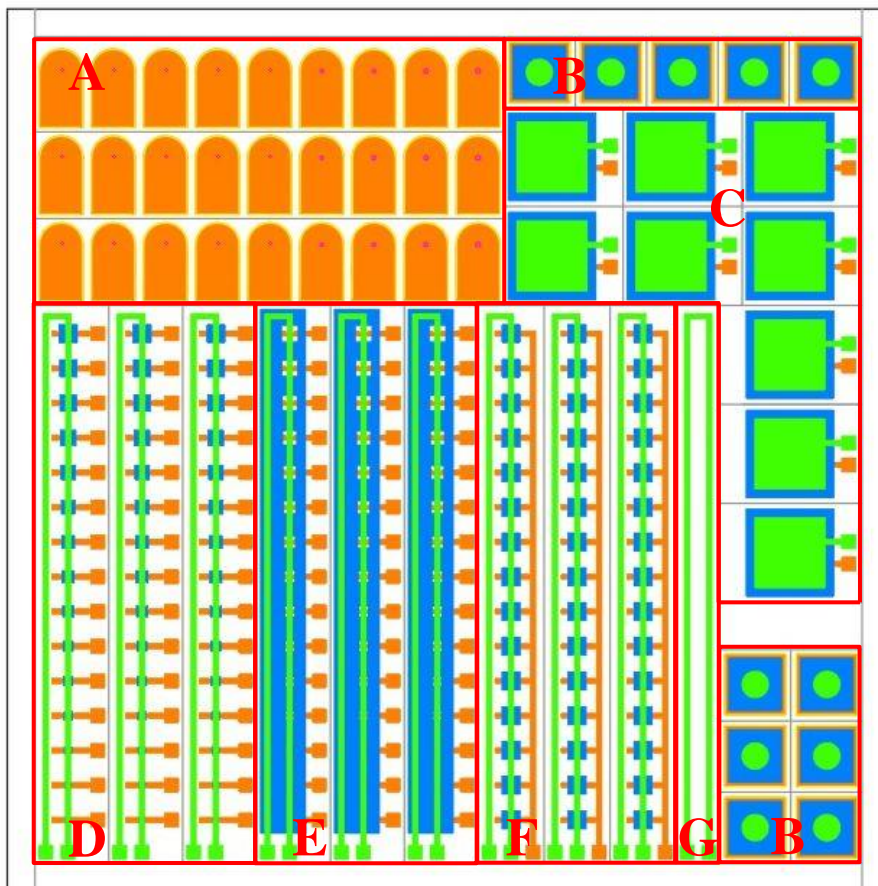
4.2 Návrh testovacího motivu

Testovací motiv byl navržen pro ověření elektrických i mechanických parametrů vícevrstevných TPC substrátů a rovněž pro ověření možností realizace horizontálních (křížení vodičů) a vertikálních propojení (pokovené otvory). Základem je keramická (Al_2O_3) podložka o rozměrech $101,6 \times 101,6$ mm. Líc a rub testovacího motivu jsou zobrazeny na Obr. 31. Líc testovacího motivu se skládá ze dvou vrstev mědi oddělených dielektrikem. Spodní vrstva mědi (Cu1) je označena oranžovou barvou, dielektrická vrstva je reprezentována modrou barvou a horní vrstva mědi (Cu2) je označena barvou zelenou. Na rubu substrátu je rovněž natištěna měděná vrstva (žlutá barva), která je součástí motivů pro testování adhezni síly a pokovených otvorů.



Obr. 31: Líc (vlevo) a rub (vpravo) testovacího motivu.

Na Obr. 32 jsou vyznačeny jednotlivé skupiny motivů. Každá skupina motivů slouží pro určité typy testů, které jsou uvedeny v Tab. 9.



Obr. 32: Testovací motiv – rozdělení podle typu testů.

Tab. 9: Popis a účel jednotlivých testovacích motivů.

Motiv	Účel motivu, testování
A	Pokovené otvory v keramické podložce
B	Adhezní síla druhé vrstvy mědi na dielektrické vrstvě
C	Elektrické parametry, metalografické výbrusy
D	Kontinuita horní měděné vrstvy při přetisku dielektrika (přetisk vyvýšených částí dielektrika)
E	Kontinuita horní měděné vrstvy při přetisku dielektrika (tisk do prohlubní)
F	Kontinuita horní měděné vrstvy při přetisku dielektrika (přetisk opakovaných vyvýšených míst)
G	Normálový motiv
D,F	Zkraty mezi horní a spodní vrstvou mědi

Motiv A je určen pro elektrické i optické testování pokovených otvorů s různým průměrem (průměr otvorů v rozmezí 100 μm až 500 μm s krokem 50 μm).

Motiv B slouží k testování adhezní síly druhé měděné vrstvy na dielektrické vrstvě. Testování probíhá tak, že jsou k oběma stranám substrátu připájeny mosazné šrouby a poté následuje upevnění do trhacího zařízení pomocí lanek a změření adhezní síly.

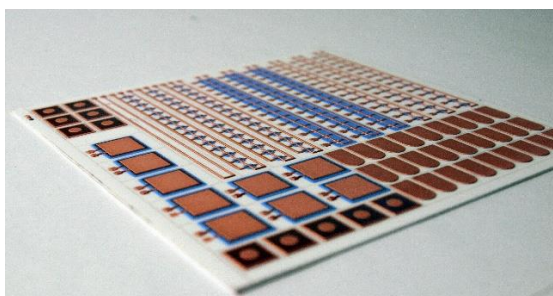
Motiv C je navržen pro měření elektrických parametrů vícevrstvých TPC substrátů (relativní permitivita, rezistivita, elektrická pevnost atd.) Na tomto motivu je možné realizovat i metalografické výbrusy.

Motivy D-F jsou určeny pro testování continuity horní měděné vrstvy při přetisku dielektrika. Testován je přetisk vyvýšených částí dielektrika o různých rozměrech (motiv D), tisk do prohlubní o různých rozměrech v dielektriku (motiv E) i přetisk opakovaných vyvýšených částí dielektrika o stejném rozměru (motiv F). Tyto motivy rovněž slouží i pro testování zkratů mezi horní a spodní měděnou vrstvou.

Motiv G je normálový a slouží pro porovnání hodnot elektrického odporu vodivých cest motivů D-F.

4.3 Realizace testovacího motivu

Podle výše popsaného návrhu byly připraveny vzorky testovacího motivu (Obr. 33). Základem byla keramická podložka (96% Al_2O_3) o tloušťce 0,6 mm. Jednotlivé vrstvy testovacího motivu byly natištěny sítotiskem, zasušeny (125 °C, 10 min) a vypáleny v retortové peci v ochranné dusíkové atmosféře. Měděné vrstvy byly natištěny měděnou pastou Heraeus C7403 (vždy jedna vrstva – tisk, sušení, výpal), která představuje adhezni pastu ve dvou pastovém systému pro technologii TPC. Vyplnění otvorů v keramické podložce měděnou pastou (realizace pokovených otvorů) je podrobněji popsáno v kapitole 4.6. Pro tisk dielektrické vrstvy byla zvolena pasta Heraeus IP9319D (dvě vrstvy – tisk, sušení, tisk, sušení, výpal), která je kompatibilní s technologií TPC a je určena pro výpal v dusíkové atmosféře. Parametry tisku jsou shrnuty v Tab. 10.



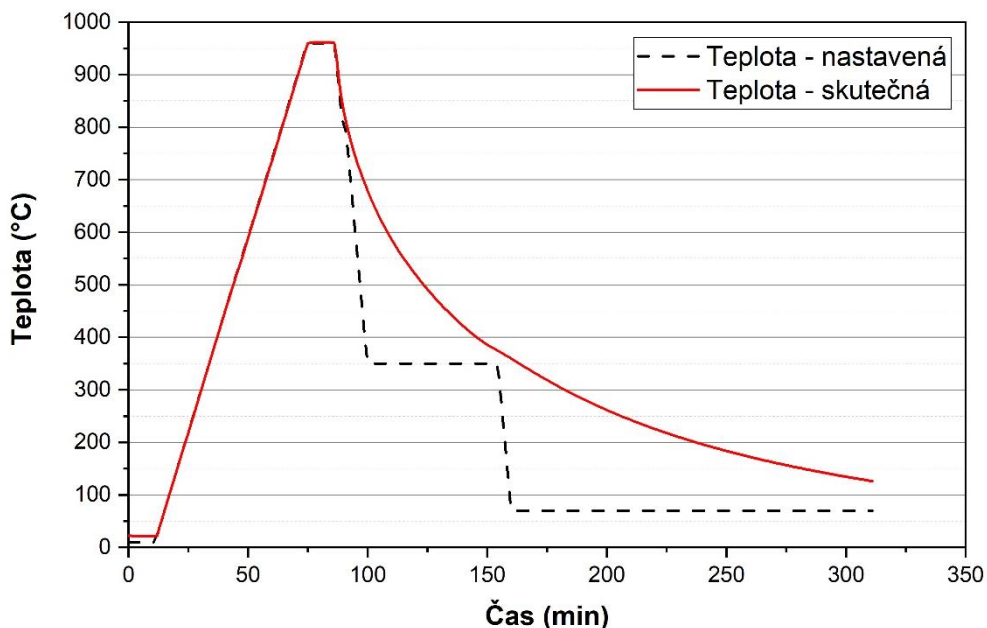
Obr. 33: Realizovaný testovací motiv.

Tab. 10: Parametry tisku.

Parametr	Hodnota
Síto	Mesh 200, úhel vláken 45°
Tloušťka rezistu	50 μm
Tvrdość těrky	80 ShA
Úhel náběhu těrky	45 °
Odtrh	1,8-2,0 mm
Přítlak těrky	60-70 N
Rychlost těrky	80 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Profil výpalu jednotlivých natištěných vrstev byl záměrně zvolen stejný. Vzorky byly vypalovány v retortové peci s ochrannou dusíkovou atmosférou. Profil výpalu je zobrazen na Obr. 34 a jednotlivé fáze výpalu jsou popsány v Tab. 11. Rychlost ohřevu pece byla

nastavena na 15 °C/min a rychlost chlazení 50 °C/min. Z důvodu nedostatečného nuceného chlazení a kvůli vakuu byla skutečná rychlost chlazení nižší, cca 5-10 °C/min.



Obr. 34: Profil výpalu vícevrstevných TPC struktur.

Tab. 11: Fáze výpalu.

Teplota (°C)	Popis
25-150	Vyčerpání atmosféry a naplnění retorty směsí N ₂ -vzduch
150-520	Odstranění organického pojiva z natištěných vrstev ve směsi N ₂ -vzduch
520-640	Odčerpání zbytků po odstranění organického pojiva současně s plněním retorty N ₂
960	Sintrování vrstev (10 min)
960-25	Chlazení

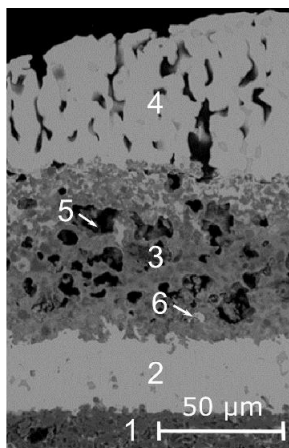
4.4 Parametry vícevrstevných TPC struktur (horizontální propojení)

V této kapitole jsou shrnuty parametry horizontálních propojovacích struktur (vnitřní struktura vrstev, elektrické parametry, adheze atd.) včetně metodiky měření a technologických možností jejich realizace (křížení vodičů).

4.4.1 Struktura vrstev

Vnitřní struktura vrstev byla pozorována na metalografickém výbrusu (Obr. 35) pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) Phenom ProX. Na výbrusu je patrné, že horní vrstva mědi (Cu₂) je více porézní než vrstva spodní (Cu₁). Menší porozita spodní vrstvy mědi je způsobena absolvováním více výpalů (vrstva je více zhutněná) a postupným zatékáním skelné fáze z past během výpalu dalších vrstev. Skelná fáze během výpalu zatéká i do Al₂O₃ podložky a vytváří spojení mezi spodní měděnou vrstvou a podložkou.

Pomocí SEM mikroskopu byla na metalografickém výbrusu změřena i tloušťka dielektrické vrstvy – 66 μm .



Obr. 35: Metalografický výbrus vícevrstvé TPC struktury – 1: Al_2O_3 podložka, 2: spodní měděná vrstva (Cu1), 3: dielektrická vrstva, 4: horní měděná vrstva (Cu2), 5: póry, 6: pór vyplněný skelnou fází.

4.4.2 Elektrické parametry

Elektrické parametry dielektrické vrstvy byly testovány na testovacím motivu C. Detail realizovaného vzorku tohoto motivu je zobrazen na Obr. 36.



Obr. 36: Detail vzorku pro měření elektrických parametrů.

Prvními měřeními parametry byly kapacita a ztrátový činitel při frekvenci 100 kHz. Z kapacity byla vypočtena relativní permitivita ϵ_r podle vzorce

$$\epsilon_r = \frac{d \cdot C}{\epsilon_0 \cdot S}, \quad (4.3)$$

kde d je tloušťka dielektrické vrstvy, C je kapacita, ϵ_0 je permitivita vakua a S je plocha horní měděné elektrody (vrstva Cu2).

Dalším měřeným parametrem byl svodový proud protékající skrz dielektrickou vrstvu, který byl změřen elektrometrem při napětí 200 V. Ze svodového proudu I_s byla vypočtena rezistivita ρ podle následujícího vzorce

$$\rho = \frac{R \cdot S}{d} = \frac{U}{I_s} \cdot \frac{S}{d}, \quad (4.4)$$

kde d je opět tloušťka dielektrické vrstvy, U je napětí (200 V) a S je opět plocha horní měděné elektrody.

Nejdůležitějším měřeným parametrem byla elektrická pevnost dielektrické vrstvy. U vzorků bylo změřeno průrazné napětí dle normy ČSN EN 60243-1 střídavým napětím s frekvencí 50 Hz a nárůstem napětí 50 V/s. Elektrická pevnost byla vypočtena ze změřeného průrazného napětí U_P podle vzorce

$$E_P = \frac{U_P}{d}, \quad (4.5)$$

kde d je opět tloušťka dielektrické vrstvy.

Elektrické parametry byly testovány i u vzorků po zrychleném stárnutí suchým teplem (155 °C, 1000 hodin, dle normy ČSN EN 60068-2-2) a po teplotní šokové cyklické zkoušce (1000 cyklů v rozmezí teplot od -40 °C do 125 °C, 10 min setrvání na každé teplotě, dle normy ČSN EN 60068-2-14). Elektrické parametry vícevrstvých TPC struktur včetně elektrických parametrů po klimatických testech jsou shrnuty v Tab. 12. Jednotlivé hodnoty jsou průměrem ze šesti vzorků.

Tab. 12: Elektrické parametry vícevrstvých TPC struktur.

Parametr	Před klimatickými testy	Po stárnutí suchým teplem	Po teplotních šocích
Kapacita při 100 kHz (pF)	43,56	44,27	43,75
Relativní permitivita při 100 kHz (-)	5,08	5,16	5,10
Ztrátový činitel při 100 kHz (-)	0,005	0,003	0,005
Rezistivita ($10^{12} \Omega \cdot m$)	2,89	20,97	125,23
Průrazné napětí (kV)	0,58	0,65	0,62
Elektrická pevnost ($kV \cdot mm^{-1}$)	8,76	9,89	9,34

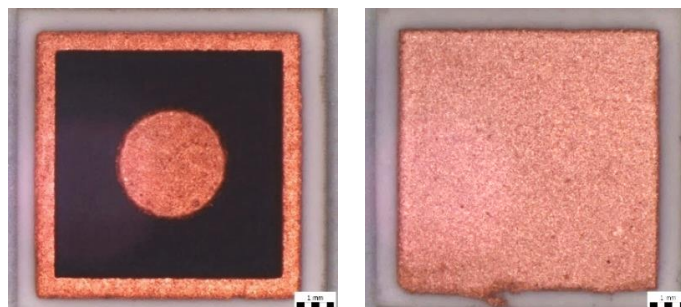
Výše popsané klimatické testy nezpůsobily zhoršení elektrických parametrů. Naopak po těchto testech došlo ke zvýšení rezistivity (více než sedminásobně) a elektrické pevnosti (o 13,1 % po zrychleném stárnutí a o 8,8 % po teplotních šocích). Tento jev je pravděpodobně způsoben rekrystalizací a postupným vysušením dielektrické vrstvy během klimatických testů.

Elektrické parametry realizovaných vícevrstvých TPC struktur jsou vyhovující pro realizaci propojovacích struktur řídicích obvodů přímo integrovaných na substrátech výkonových modulů. Vzhledem k nižší elektrické pevnosti dielektrických vrstev a nižší tloušťce vytvářených vodivých vrstev v porovnání s jednovrstvými TPC strukturami nejsou vícevrstvé TPC struktury určeny pro realizaci výkonových obvodů.

4.4.3 Adhezní síla

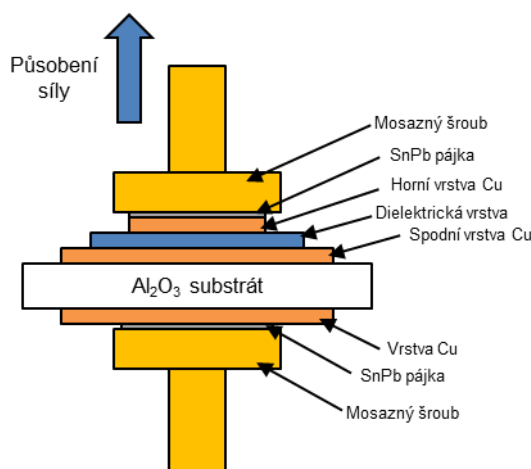
Adhezní síla horní měděné vrstvy (Cu₂) na dielektrické vrstvě byla testována na testovacím motivu B. Detail realizovaného vzorku tohoto motivu je znázorněn Obr. 37. Tyto

vzorky mají natištěnou měděnou vrstvu i na rubu keramické podložky (čtverec 7×7 mm). Motiv na horní měděné vrstvě (kruh o průměru 3 mm) má záměrně menší plochu, aby nedocházelo k odtržení měděné vrstvy na spodní vrstvě Cu nebo na rubu keramické podložky.



Obr. 37: Detail vzorku pro měření adhezni síly – líc (vlevo) a rub (vpravo).

Adhezni síla byla měřena metodou Pull off dle standardu ASTM D4541. Princip měření adhezni síly je popsán na Obr. 38. K oběma stranám vzorků byly SnPb pájecí slitinou připájeny mosazné šrouby a pomocí těchto šroubů byly vzorky ocelovými lanky upevněny do čelistí testovacího zařízení LabTest 3.030. Upnutí pomocí ocelových lanek bylo použito z důvodu minimalizace rizika namáhání testovacích vzorků ve stříhu. Rychlost pohybu čelistí byla 50 mm/s.



Obr. 38: Princip měření adhezni síly.

Adhezni síla byla stejně jako elektrické parametry změřena i u vzorků po klimatických testech (Tab. 13). Jednotlivé hodnoty jsou průměrem z deseti vzorků. Během měření adhezni síly docházelo k odtržení vždy mezi dielektrickou vrstvou a spodní vrstvou mědi (Cu1). Tento jev je pravděpodobně způsoben zatékáním skelné fáze do dielektrické vrstvy během výpalu horní měděné vrstvy (Cu2) a proto je spojení mezi těmito dvěma vrstvami silnější než spojení mezi dielektrickou vrstvou a vrstvou Cu1. Adhezni síla horní měděné vrstvy na dielektriku je

srovnatelná s adhezní silou měděné vrstvy na Al_2O_3 substrátu v případě jednovrstvých TPC substrátů.

U vzorků po klimatických testech došlo k výraznému poklesu adhezní síly horní měděné vrstvy (o 46,3 % po zrychleném stárnutí a o 42,9 % po teplotních šocích). Nicméně i tyto hodnoty jsou dostatečné pro spolehlivou funkci vícevrstvého TPC substrátu.

Tab. 13: Adhezní síla vícevrstvých TPC struktur.

Parametr	Před klimatickými testy	Po stárnutí suchým teplem	Po teplotních šocích
Adhezní síla ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	22,26	12,01	12,76

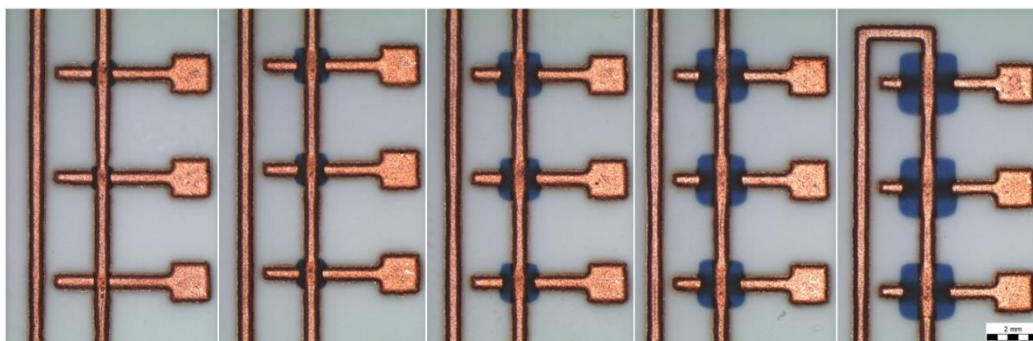
4.4.4 Možnosti tisku

Technologické možnosti tisku při realizaci vícevrstvých TPC struktur byly ověřeny na testovacích motivech D-F. Šířka vodivých měděných cest na všech těchto motivech byla 0,5 mm.

Testovací motiv D (Obr. 39) je určen pro testování kontinuity horní měděné vrstvy při přetisku vyvýšených částí dielektrika o různé velikosti (patnáct čtvercových plošek s rozměry od $0,6\times 0,6$ mm do 2×2 mm s krokem 0,1 mm) natištěných přes spodní měděnou vrstvu (křížení vodičů). Detaily jednotlivých křížení jsou zobrazeny na Obr. 40. Na tomto motivu byly rovněž testovány zkraty mezi horní a spodní měděnou vrstvou.



Obr. 39: Realizovaný testovací motiv D – přetisk vyvýšených částí dielektrika o různé velikosti.



Obr. 40: Detailní pohled na jednotlivá křížení na testovacím motivu D.

Kontinuita horní měděné vrstvy byla zachována při přetisku všech vyvýšených míst. Při křížení měděných vodivých čar o šířce 0,5 mm je vhodné použít pro oddělení vrstev

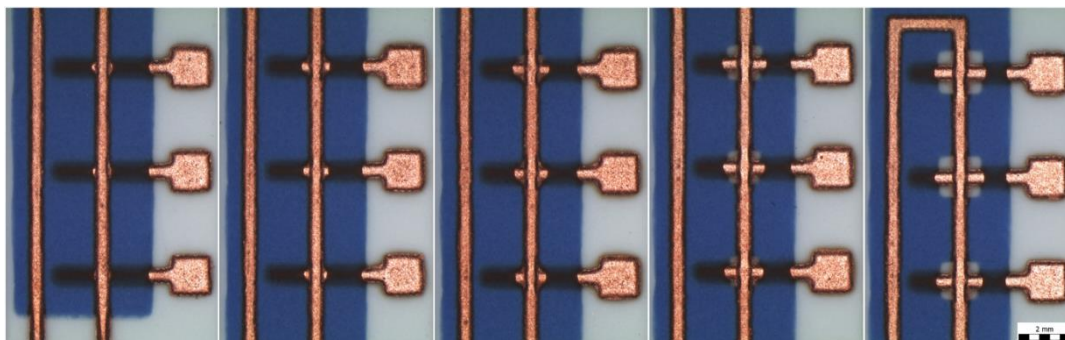
dielektrickou plošku o rozměrech minimálně 1,2×1,2 mm. V případě menších dielektrických plošek docházelo u některých vzorků ke zkratům mezi měděnými vrstvami.

Testovací motiv E (Obr. 41) slouží pro testování kontinuity horní měděné vrstvy při tisku do prohlubní v dielektriku o různé velikosti (patnáct čtvercových otvorů v dielektriku s rozměry od 0,6×0,6 mm do 2×2 mm s krokem 0,1 mm) natištěného přes spodní měděnou vrstvu (propojení vodičů skrz otvory v dielektriku). Detaily jednotlivých propojení jsou zobrazeny na Obr. 42. Kvůli ověření dobrého spojení měděných vrstev skrz otvory v dielektriku byl realizován metalografický výbrus (Obr. 43).

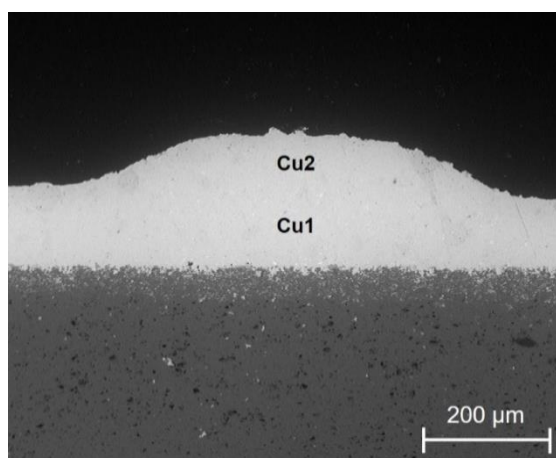
I v případě tohoto motivu byla kontinuita horní měděné vrstvy zachována při tisku do všech prohlubní v dielektriku a ve všech případech byly měděné vrstvy elektricky propojeny.



Obr. 41: Realizovaný testovací motiv E – tisk do prohlubní v dielektriku o různé velikosti.



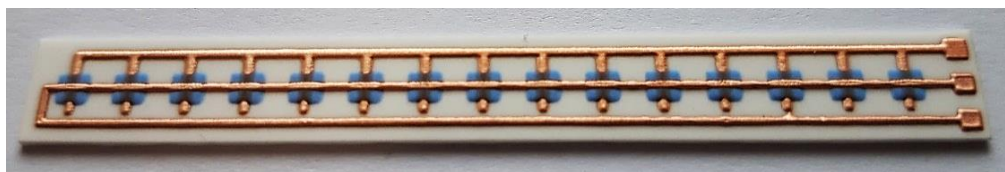
Obr. 42: Detail pohled na jednotlivá propojení skrz otvory v dielektriku.



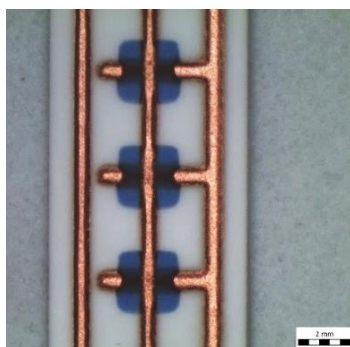
Obr. 43: Metalografický výbrus spojení měděných vrstev skrz otvor v dielektriku.

Testovací motiv F (Obr. 44) byl navržen pro testování kontinuity horní měděné vrstvy při přetisku opakovaných vyvýšených částí dielektrika (patnáct čtvercových plošek s rozměry 2×2 mm) natištěných přes spodní měděnou vrstvu (opět křížení vodičů). Detail vybraných křížení je zobrazen na Obr. 45. Na tomto motivu byly opět testovány i zkraty mezi horní a spodní měděnou vrstvou.

Kontinuita horní měděné vrstvy byla stejně jako na motivu D zachována při přetisku všech vyvýšených míst a mezi měděnými vrstvami nebyly zjištěny žádné zkraty.



Obr. 44: Realizovaný testovací motiv F – přetisk opakovaných vyvýšených částí dielektrika.



Obr. 45: Detailní pohled na křížení na testovacím motivu F.

Na jednotlivých testovacích motivech byly čtyřbodovou metodou změřeny i odpory měděných vodivých cest (horní vrstva mědi) a porovnány s normálovým motivem G (Tab. 14). Největší změna odporu vodivé cesty nastala při tisku do prohlubní v dielektrické vrstvě.

Tab. 14: Odpor vodivých cest na jednotlivých testovacích motivech.

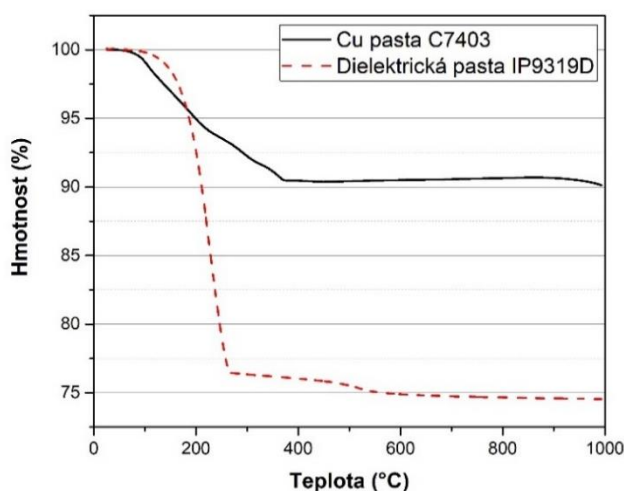
Vzorek	Odpor vodivé cesty (mΩ)
Motiv D	48,9
Motiv E	68,4
Motiv F	57,1
Motiv G (normálový)	52,4

Pomocí laserového konfokálního mikroskopu byly změřeny výškové profily jednotlivých křížení na výše uvedených testovacích motivech a bylo ověřeno, že lze vytvářet vícevrstvé struktury s výškovými nerovnostmi až 200 μm.

4.5 Společný výpal vrstev

Standardní proces výroby vícevrstvých TPC struktur (substrátů) je založen na výpalu každé měděné nebo dielektrické vrstvy samostatně. Tento proces je časově i ekonomicky náročný (kvůli nutnosti výpalu v ochranné dusíkové atmosféře). Proto byla provedena série experimentů, při kterých byla ověřena možnost společného výpalu vrstev.

Nejprve byla provedena termogravimetrická analýza (TGA) měděné pasty C7403 a dielektrické pasty IP9319D (Obr. 46) pro ověření možnosti společného výpalu těchto past. TGA analýza prokázala, že organická složka obsažená v obou pastách vyhořívá při stejných teplotách a je zde tedy předpoklad, že mohou být tyto pasty vypalovány společně.

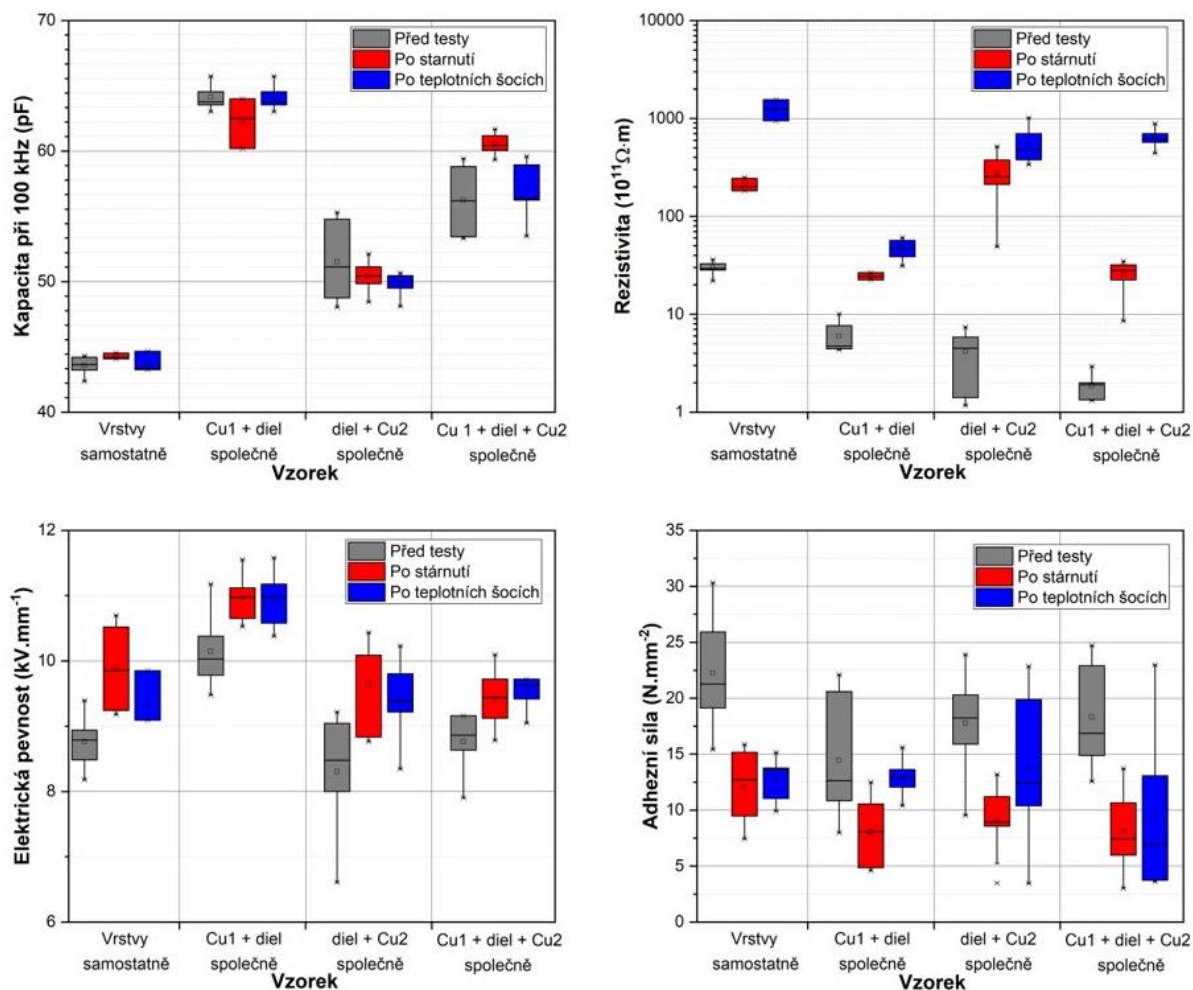


Obr. 46: TGA analýza past C7403 a IP9319D.

Následně byly vyrobeny tři skupiny vzorků s různými kombinacemi společně vypálených vrstev (stejný profil výpalu jako v kapitole 4.3). První skupina vzorků měla společně vypálenou spodní vrstvu mědi (Cu1) a dielektrickou vrstvu. U druhé skupiny vzorků byly společně vypáleny dielektrická vrstva a horní vrstva mědi (Cu2). U třetí skupiny vzorků byly společně vypáleny všechny tři vrstvy. Jako reference pro porovnání parametrů byly použity vzorky se samostatně vypálenými vrstvami, jejichž parametry jsou shrnuty v Tab. 12 a Tab. 13 a vnitřní struktura je zobrazena na Obr. 35.

Elektrické parametry a adhezní síla vzorků byly změřeny stejným způsobem popsaným v kapitolách 4.4.2 a 4.4.3. Tyto parametry byly rovněž změřeny i po zrychleném stárnutí suchým teplem (155 °C, 1000 hodin, dle normy ČSN EN 60068-2-2) a po teplotní šokové cyklické zkoušce (1000 cyklů v rozmezí teplot od -40 °C do 125 °C, 10 min setrvání na každé teplotě, dle normy ČSN EN 60068-2-14). Všechny parametry vzorků s různými kombinacemi současně vypálených vrstev jsou shrnuty v Tab. 15 (průměrné hodnoty ze šesti vzorků u elektrických parametrů a z deseti vzorků u měření adhezní síly) a vybrané parametry i

v grafech na Obr. 47. Pro porovnání jednotlivých parametrů jsou v Tab. 15 a na Obr. 47 uvedeny i parametry vzorků s vrstvami vypálenými samostatně.



Obr. 47: Statistické výsledky měření elektrických parametrů a adheze.

Tab. 15: Parametry vícevrstevných TPC struktur s vrstvami vypálenými společně.

Vzorek		Kapacita při 100 kHz (pF)	Relativní permitivita při 100 kHz (-)	Rezistivita ($10^{12} \Omega \cdot m$)	Průrazné napětí (kV)	Elektrická pevnost ($kV \cdot mm^{-1}$)	Adhezní síla ($N \cdot mm^{-2}$)
Vrstvy samostatně	Před testy	43,56	5,08	2,89	0,58	8,76	22,26
	Po stárnutí	44,27	5,16	20,97	0,65	9,89	12,01
	Po TŠ	43,75	5,10	125,23	0,62	9,34	12,76
Cu1 + diel společně	Před testy	63,70	5,63	0,55	0,51	10,14	14,46
	Po stárnutí	62,51	5,53	2,42	0,55	10,97	8,01
	Po TŠ	64,12	5,67	4,69	0,55	10,94	12,89
Diel + Cu2 společně	Před testy	51,52	5,23	0,37	0,48	8,30	17,78
	Po stárnutí	50,40	5,12	27,65	0,55	9,64	9,05
	Po TŠ	50,09	5,09	53,60	0,54	9,39	13,78
Cu1 + diel + Cu2 společně	Před testy	56,22	5,31	0,18	0,58	8,76	18,33
	Po stárnutí	60,52	5,71	2,56	0,65	9,89	12,01
	Po TŠ	56,92	5,38	62,53	0,51	9,53	9,52

TŠ – teplotní šoky

Vnitřní struktura vzorků byla opět pozorována na metalografických výbrusech pomocí SEM mikroskopu (Obr. 48). SEM mikroskopem byla na výbrusech změřena i tloušťka dielektrické vrstvy jednotlivých vzorků (vrstvy samostatně - 66 μm , Cu1 + diel společně - 50 μm , Diel + Cu2 společně - 57,5 μm , Cu1 + diel + Cu2 společně - 53,5 μm). Na realizovaných výbrusech je patrné, že dielektrická vrstva všech vzorků je porézní. Prvková analýza (EDS) prokázala, že póry u vzorků se společně vypálenými vrstvami jsou částečně vyplněny skelnou fází. Tato skelná fáze zatéká do dielektrické vrstvy z měděné pasty během společného výpalu a v porovnání s plynem uzavřeným v pórech má vyšší relativní permitivitu, vyšší elektrickou pevnost a nižší rezistivitu. Proto mají vzorky s homogenní distribucí skelné fáze v dielektrické vrstvě vyšší relativní permitivitu (o 3-11 %), vyšší elektrickou pevnost (o 1-16 %), ale naopak nižší rezistivitu (o 81-94 %) v porovnání se vzorky s vrstvami vypálenými samostatně.

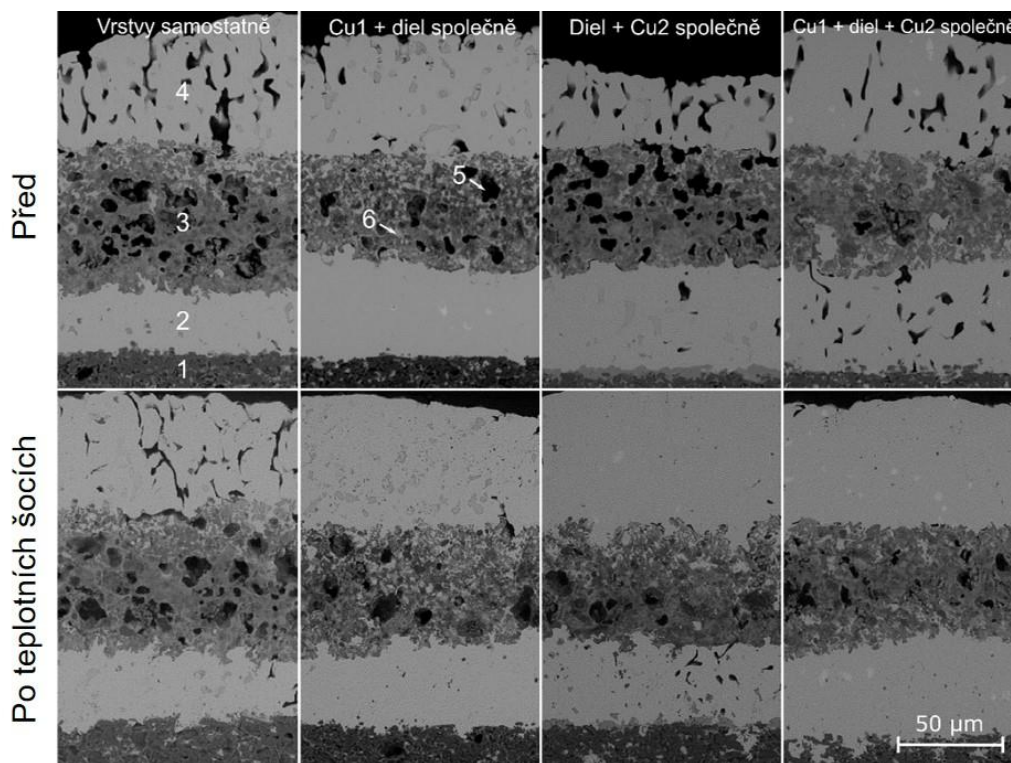
Po klimatických testech došlo u všech skupin vzorků ke zvýšení rezistivity a elektrické pevnosti. Z tohoto důvodu byly realizovány metalografické výbrusy vzorků po testu teplotními šoky (Obr. 48) a porovnány s výbrusy před tímto testem, aby bylo ověřeno, zda nedošlo ke strukturálním změnám ve vícevrstvé TPC struktuře. Na realizovaných výbrusech nejsou viditelné žádné známky delaminace nebo vzniku oxidických mezivrstev během teplotních šoků. Zvýšení rezistivity a elektrické pevnosti bylo pravděpodobně způsobeno postupným odstraněním vlhkosti z dielektrické vrstvy nebo změnou vnitřní struktury dielektrické vrstvy během klimatických testů. Ostatní elektrické parametry (kapacita, relativní permitivita) se po klimatických testech výrazně nezměnily. Ztrátový činitel všech vzorků před a po klimatických testech se pohyboval v rozmezí 0,005-0,008 (při frekvenci 100 kHz).

Během měření adhezni síly docházelo k odtržení vždy mezi spodní vrstvou mědi a dielektrickou vrstvou. Vzorky se samostatně vypálenými vrstvami vykazují vyšší adhezni sílu, adhezni síla vzorků se společně vypálenými vrstvami byla o 18-35 % nižší. Adhezni síla všech skupin vzorků je dostatečná pro spolehlivou funkci vícevrstvého TPC substrátů. Po klimatických testech došlo ke značnému poklesu adhezni síly (o 43-56 %).

Vzorky se společně vypálenou dielektrickou vrstvou a horní vrstvou mědi (diel + Cu2 společně) mají podobné elektrické i mechanické parametry jako vrstvy vypálené samostatně a představují slibnou výrobní variantu, která umožňuje ušetřit jeden výpal. Použitelné jsou i vzorky se společně vypálenou dielektrickou vrstvou a spodní vrstvou mědi (Cu1 + diel společně), které mají ještě vyšší elektrickou pevnost.

Tímto experimentem bylo prokázáno, že jednotlivé vrstvy vícevrstvého TPC substrátů mohou být vypalovány společně. Elektrické i mechanické parametry takto realizovaných

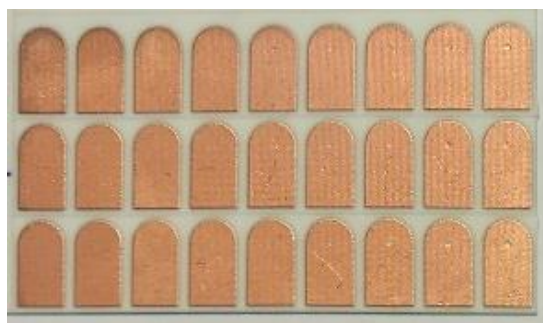
obvodů jsou dostatečné pro použití ve výkonové elektronice, zejména při realizaci inteligentních výkonových modulů. Výsledky popsané v této kapitole byly publikovány v [A2].



Obr. 48: Metalografické výbrusy vícevrstevných TPC struktur se společně vypálenými vrstvami před a po teplotních cyklech – 1: Al₂O₃ podložka, 2: spodní měděné vrstva (Cu1), 3: dielektrická vrstva, 4: horní měděná vrstva (Cu2), 5: pór, 6: pór vyplněný skelnou fází.

4.6 Pokovené otvory (vertikální propojení)

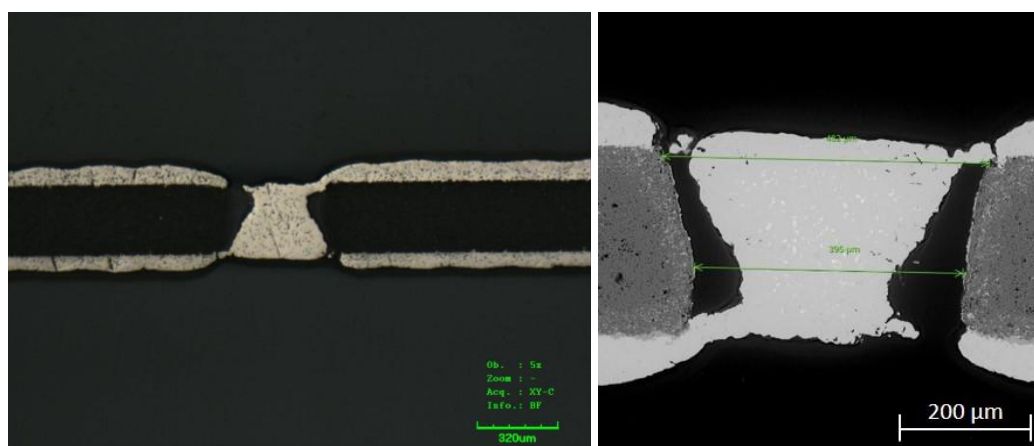
Pokovené otvory mohou být použity pro propojení měděných vrstev skrz keramickou podložku nebo jako tepelné můstky pro zlepšení odvodu ztrátového tepla. Technologické možnosti realizace a vlastnosti pokovených otvorů byly testovány na motivu A (Obr. 49). Tento motiv obsahuje pole propojovacích otvorů s průměrem od 100 μm do 500 μm s krokem 50 μm skrz keramickou (Al₂O₃) podložku. Otvory v Al₂O₃ podložce byly vytvořeny pomocí CO₂ laseru a vyplněny měděnou pastou Heraeus C7403.



Obr. 49: Realizovaný testovací motiv A.

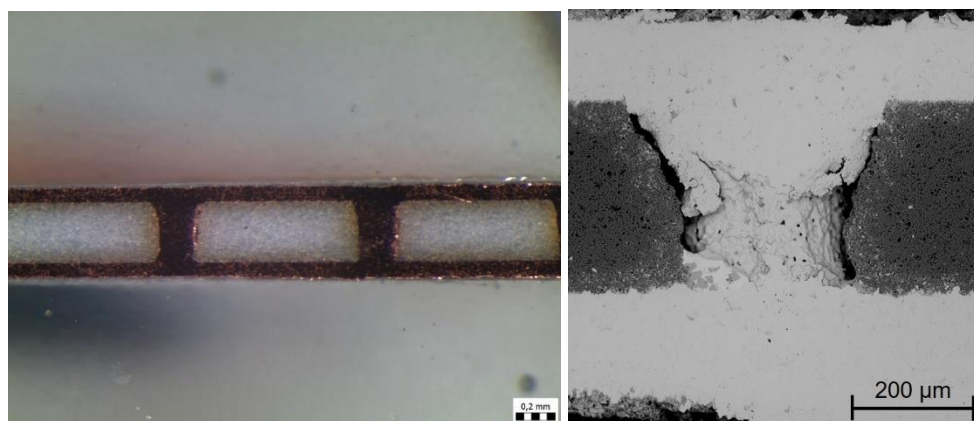
4.6.1 Realizace pokovených otvorů

Při prvním experimentu byla do otvorů v Al_2O_3 podložce (tloušťka 0,3 mm) natištěna sítotiskem měděná pasta za působení podtlaku z opačné strany podložky. Pasta v otvorech byla poté zasušena a vypálena. Dalším krokem byl přetisk vyplněných otvorů měděnými ploškami, jejich vysušení a vypálení. Při tomto způsobu realizace pokovených otvorů vznikaly trhliny mezi měděnými ploškami a mědí v otvoru a otvory v Al_2O_3 podložce nebyly rovnoměrně vyplněny (Obr. 50). Nicméně odpor (měřen čtyřbodovou metodou) takto realizovaných pokovených otvorů se pohyboval pod hranicí 10 m Ω a pokovené otvory byly funkční i po teplotní šokové cyklické zkoušce (1000 cyklů v rozmezí teplot od -40 °C do 125 °C, dle normy ČSN EN 60068-2-14).



Obr. 50: Metallografický výbrus pokoveného otvoru – měď v otvoru a měděná vrstva vypáleny odděleně.

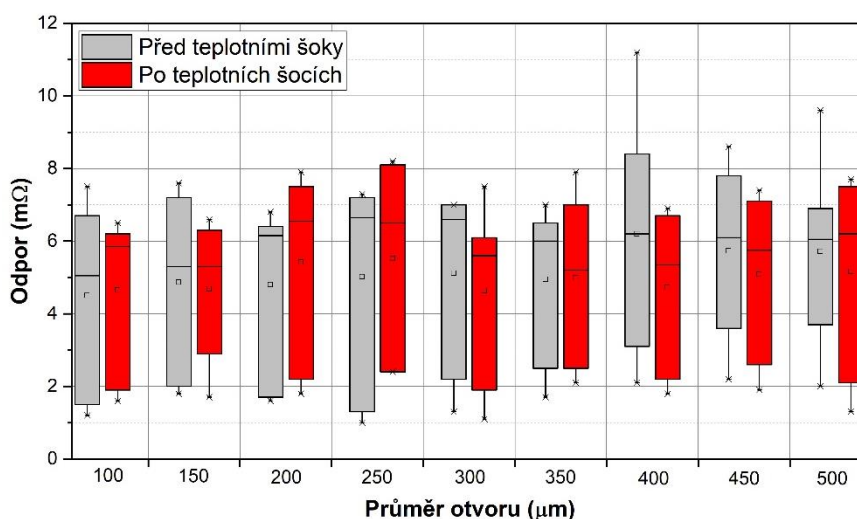
Na základě předchozího experimentu byl ověřen odlišný způsob realizace pokovených otvorů založený na společném výpalu mědi v otvorech a přetištěných měděných plošek. Stejně jako v předchozím případě dochází během výpalu ke smrštění měděné pasty v otvoru, ale při tomto způsobu realizace jsou otvory v Al_2O_3 podložce rovnoměrněji vyplněny a nedochází ke vzniku trhlin mezi mědí v otvorech a přetištěnými ploškami (Obr. 51).



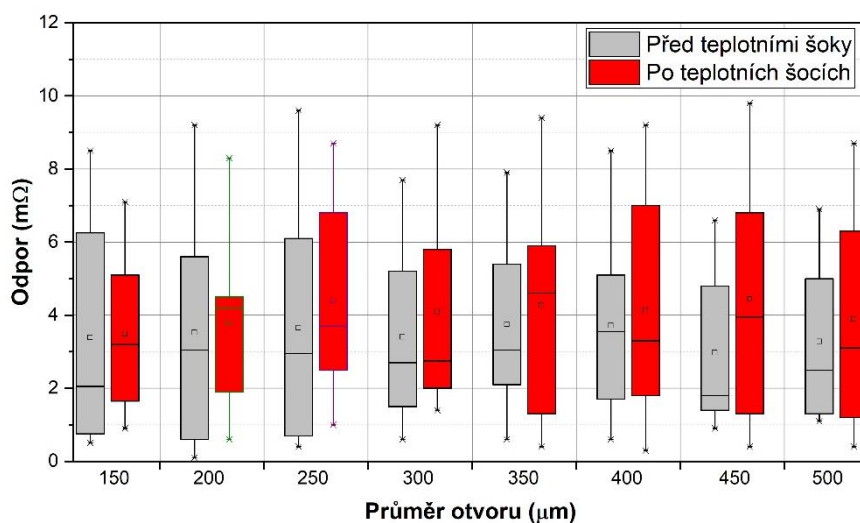
Obr. 51: Metallografický výbrus pokoveného otvoru – měď v otvoru a měděná vrstva vypáleny společně.

Výše popsaným způsobem byly realizovány pokovené otvory na podložkách o tloušťce 0,3 a 0,6 mm. U těchto vzorků byl čtyřbodovou metodou změřen odpor pokovených otvorů před a po teplotních šocích (Obr. 52 a Obr. 53). Hodnoty odporů pokovených otvorů se i po absolvování testu teplotními šoky pohybují pod hranicí 10 mΩ a během testu nedošlo k porušení žádného z testovaných pokovených otvorů. U podložky o tloušťce 0,6 mm byly již před testy nefunkční pokovené otvory s průměrem 100 μm.

Mezi jednotlivými pokovenými otvory byly jen minimální rozdíly hodnot odporu. Podle teoretických předpokladů by měl odpor se vzrůstajícím průměrem otvoru klesat. Změřené odpory jsou tedy dány převážně vzdáleností měřících hrotů od pokovených otvorů (odporem měděných vrstev přetištěných přes pokovený otvor) a samotný pokovený otvor má zanedbatelný odpor, který se v celkové změřené hodnotě odporu neprojeví.

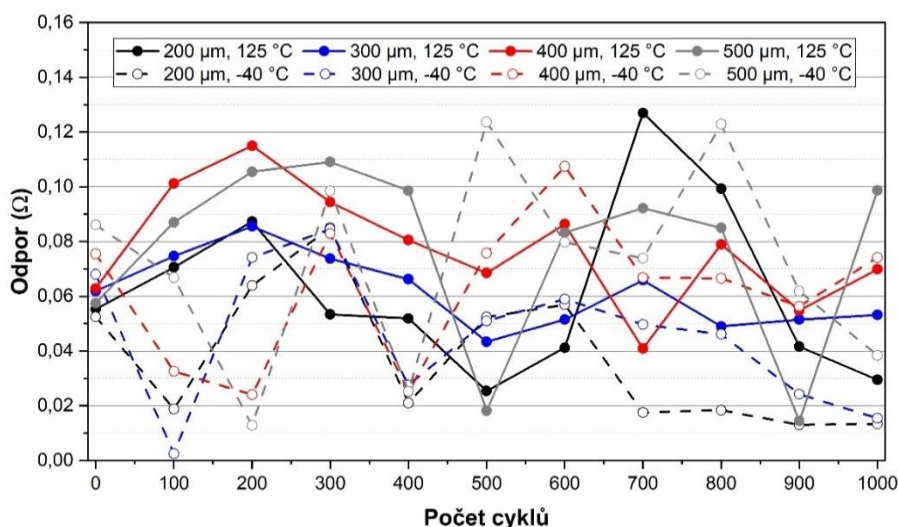


Obr. 52: Odpor pokovených otvorů – Al₂O₃ podložka o tloušťce 0,3 mm.



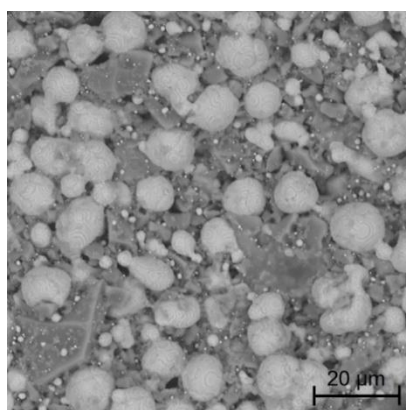
Obr. 53: Odpor pokovených otvorů – Al₂O₃ podložka o tloušťce 0,6 mm.

Odpor pokovených otvorů na podložce o tloušťce 0,6 mm byl čtyřbodovou metodou měřen i během teplotních šoků (online) z důvodu ověření, zda během změn teplot nedochází k přerušení pokovení v otvorech vlivem teplotní roztažnosti mědi. Měření odporu po teplotních šocích by tyto problémy neodhalilo. Měření během teplotních šoků prokázalo, že při změnách teplot nedochází k přerušení pokovení v otvorech v Al₂O₃ podložce (Obr. 54). Rozdíl mezi hodnotami odporů měřenými během teplotních šoků a po teplotních šocích (Obr. 53) byl způsoben rychlou frekvencí vzorkování měřicího přístroje a vlivem kontaktování měřených vzorků v šokové komoře.



Obr. 54: Odpor pokovených otvorů měřený během teplotních šoků – Al₂O₃ podložka o tloušťce 0,6 mm.

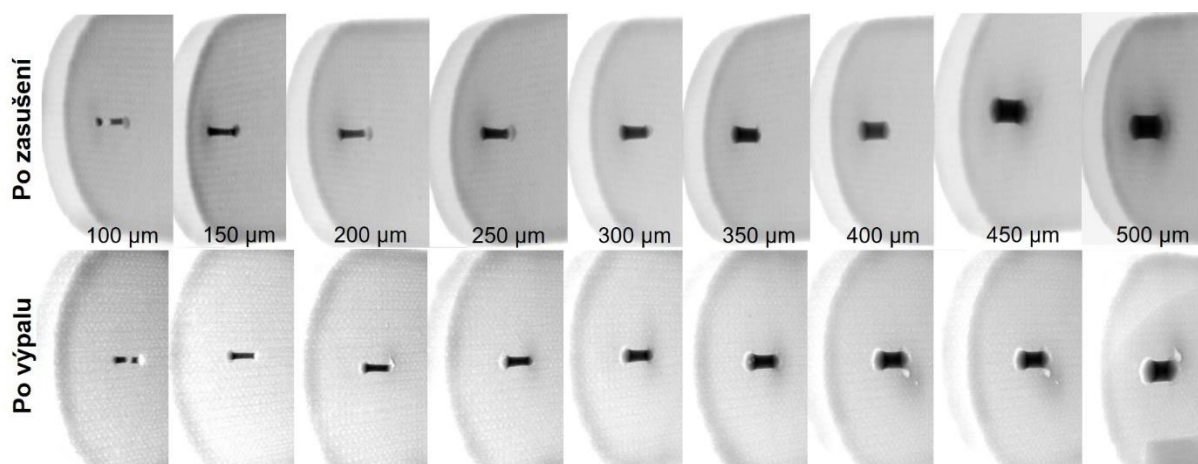
Při dalším experimentu byla pro realizaci pokovených otvorů v Al₂O₃ podložce použita měděná pasta Heraeus C7463LV. Navzdory tomu, že je tato pasta dle doporučení výrobce přímo určena k vyplňování otvorů, nepodařilo se touto pastou vytvořit funkční pokovené otvory, a to hlavně z důvodu, že tato pasta obsahuje velké množství skelné fáze a během výpalu špatně slinuje. Velké množství skelné fáze a špatné slinutí této pasty po výpalu je viditelné na SEM snímku na Obr. 55.



Obr. 55: SEM snímek vypálené měděné pasty C7463LV určené pro vyplnění pokovených otvorů.

4.6.2 Rentgenové snímky pokovených otvorů

V případě pokovených otvorů na podložce o tloušťce 0,6 mm byla provedena diagnostika zasušených a vypálených pokovených otvorů pomocí rentgenu (Obr. 56). Na rentgenových snímcích je patrné, že pokovení v otvoru o průměru 100 μm bylo přerušeno již po zasušení a nevzniklo během výpalu. Toto přerušení bylo způsobeno technologickými omezeními při tisku do hlubokých otvorů s malým průměrem.



Obr. 56: Rentgenové snímky zasušených a vypálených pokovených otvorů – Al_2O_3 podložka o tloušťce 0,6 mm.

Provedenými experimenty bylo prokázáno, že technologií TPC je možné realizovat spolehlivé a dobře elektricky i tepelně vodivé propojovací otvory skrz keramickou podložku, přičemž v průmyslovém měřítku je vhodné realizovat otvory s průměrem od 300 do 500 μm .

Budoucí vývoj v oblasti vícevrstevných TPC struktur by mohl směřovat k realizaci pokročilých výkonových modulů v sendvičovém uspořádání, ve kterých budou výkonové a řídicí obvody propojeny pomocí pokovených otvorů a řídicí obvody budou obsahovat několik vzájemně oddělených měděných vrstev.

5 TPC metalizace na podložkách z nitridu hlinitého

V současné době jsou na výkonové substráty a součástky kladeny stále větší nároky zejména v důsledku miniaturizace a s tím spojenými problémy s odvodem ztrátového tepla. Z tohoto důvodu se pro výrobu výkonových substrátů používají keramické podložky. Nejběžněji používaným keramickým materiálem je 96% oxid hlinitý (Al_2O_3) díky dobré tepelné vodivosti ($24,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), nízkému součiniteli teplotní roztažnosti ($8,2\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a nízké ceně [2]. Nicméně tepelná vodivost Al_2O_3 podložek může být nedostatečná pro použití v aplikacích s vysokým výkonovým zatížením. Z tohoto důvodu je potřeba použít keramický materiál s vyšší tepelnou vodivostí, kterým je například nitrid hlinitý (AlN). Podložky z nitridu hlinitého disponují vysokou tepelnou vodivostí (typicky $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a nízkým součinitelem teplotní roztažnosti ($4,4\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [8].

V této kapitole je nejprve popsán vliv natištěných měděných vrstev na elektrické parametry Al_2O_3 podložek. Další část kapitoly je již věnována TPC metalizaci na podložkách z nitridu hlinitého a porovnání odlišných mechanismů adheze TPC vrstev na Al_2O_3 a AlN.

5.1 Interakce TPC vrstev s podložkami z oxidu hlinitého

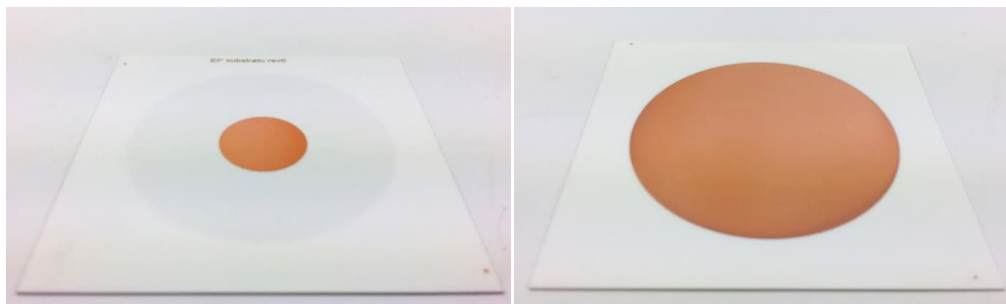
Spojení (adheze) natištěných TPC vrstev s Al_2O_3 podložkou je realizováno prostřednictvím pojivové složky (skelné fáze) obsažené v pastě. Skelná fáze během vypalovacího procesu proniká do podložky a společně se sklem obsaženým v substrátu vytváří spojení mezi natištěnou vrstvou a podložkou. Toto spojení je klíčové pro dosažení vysoké spolehlivosti, životnosti a funkčnosti výsledného zařízení.

Pronikání skelné fáze do podložky vytváří dobré spojení s podložkou, ale zároveň ovlivňuje i jeho elektrické vlastnosti [2, 8]. S každým tiskem a výpalem dalších vrstev může skelná fáze z pasty pronikat hlouběji do podložky. Hloubka pronikání skelné fáze do podložky může mít vliv zejména na elektrickou pevnost, která je velmi důležitým parametrem výkonových substrátů.

Vliv natištěných měděných vrstev (TPC) na elektrické parametry podložky byl testován na vzorcích s různým počtem natištěných vrstev a s různým počtem výpalů. Stejně vzorky byly realizovány i se stříbrnými vrstvami. Cílem bylo porovnání nové technologie TPC se zavedenou a v hybridní elektronice dlouhodobě používanou technologií tlustých vrstev stříbra.

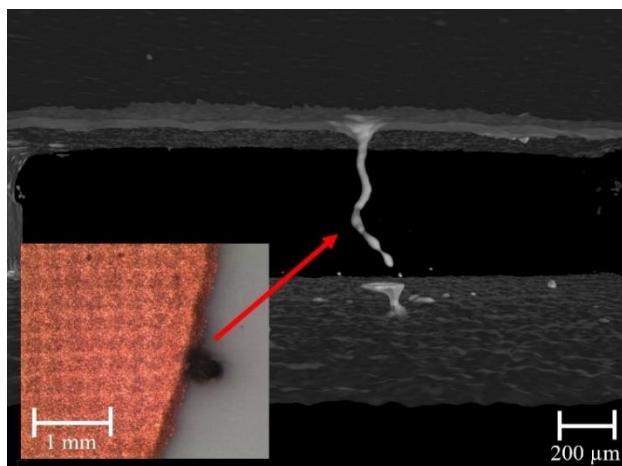
Vliv natištěných vrstev na elektrické parametry byl testován na dvou skupinách vzorků (Cu a Ag vrstvy) s různou tloušťkou vrstev a různým počtem výpalů. Jako podložka byl použit 96% Al_2O_3 o tloušťce 0,6 mm. Rozměry a tvar vzorků byly navrženy podle normy ČSN EN

60243-1 pro měření elektrické pevnosti izolačních materiálů. Na horní straně keramické podložky byl natištěn kruhový motiv o průměru 25 mm a na spodní straně podložky kruhový motiv o průměru 75 mm (Obr. 57). Tyto rozměry odpovídají rozměrům měřících elektrod dle výše uvedené normy.



Obr. 57: Vzorky pro měření elektrických parametrů – líc (vlevo) a rub (vpravo).

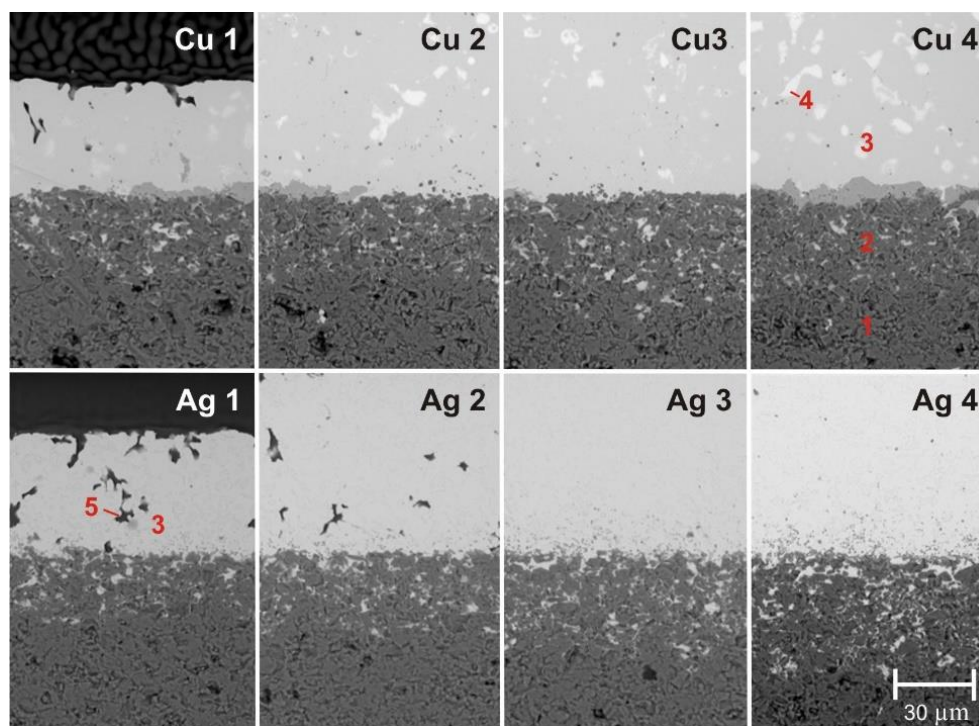
První skupina vzorků (Cu 1-Cu 4) byla natištěna technologií TPC pastou Heraeus C7403 (označení výrobce C7403C, adhezní pasta – obsahuje větší množství skelné fáze). Druhá skupina vzorků (Ag 1-Ag 4) byla natištěna standardní technologií tlustých vrstev stříbra pastou Heraeus C2030 (3:1 Ag-Pd). Čísla vzorků značí i počet absolvovaných výpalů. Vzorky s měděnými vrstvami byly vypáleny v retortové peci s ochrannou dusíkovou atmosférou podle stejného vypalovacího profilu jako v kapitole 4.3. Vzorky se stříbrnými vrstvami byly vypáleny v průběžné peci při teplotě 850 °C. Pro porovnání výsledků byly otestovány i nepotištěné podložky.



Obr. 58: CT snímek elektrického průrazu Al_2O_3 podložky.

U výše uvedených vzorků byly změřeny elektrické parametry (elektrická pevnost, relativní permitivita a rezistivita). Hlavní pozornost byla věnována měření elektrické pevnosti, která byla měřena v olejové lázni podle normy ČSN EN 60243-1 s použitím vysokonapěťového zdroje s frekvencí 50 Hz a nárůstem napětí 1 kV/s. K elektrickému průrazu docházelo vždy

na okraji natištěné Cu nebo Ag vrstvy (Obr. 58). Dále byla na metalografických výbrusech (Obr. 59) pomocí SEM mikroskopu změřena i tloušťka natištěných vrstev a hloubka pronikání skelné fáze z pasty do podložky.



Obr. 59: Metalografické výbrusy vzorků – 1: Al_2O_3 podložka, 2: Al_2O_3 podložka + skelná fáze, 3: natištěná Cu nebo Ag vrstva, 4: skelná fáze, 5: póry).

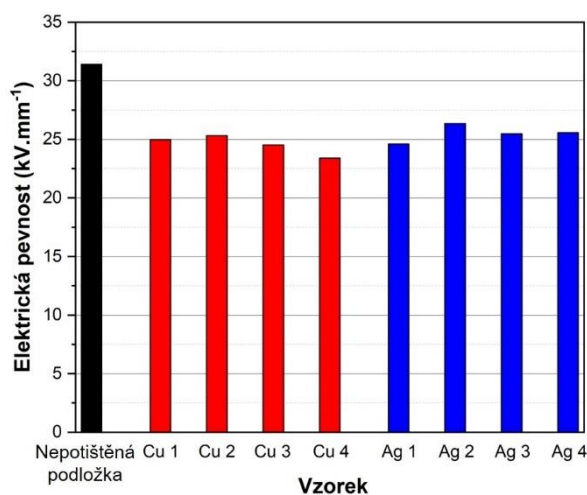
Kompletní výsledky měření elektrických parametrů, tloušťky natištěných Cu a Ag vrstev a hloubky pronikání skelné fáze jsou uvedeny v Tab. 16. Natištěné tlusté vrstvy výrazně ovlivňují elektrické parametry keramických podložek, zejména pokud jde o elektrickou pevnost. V případě elektrické pevnosti došlo k poklesu o 19-25 % v závislosti na počtu výpalů Cu a Ag vrstev v porovnání s nepotištěnou podložkou (Obr. 60). Největší pokles je způsoben tiskem a výpalem první Cu nebo Ag vrstvy (pokles přibližně o 22 %). Tisk a výpal dalších vrstev nezpůsobuje další výrazné snížení elektrické pevnosti (snížení přibližně o 4 %).

Celková hloubka (hloubka pronikání skelné fáze na horní i spodní straně podložky) pronikání skelné fáze s rostoucí tloušťkou natištěných vrstev mírně narůstá u Cu i Ag vzorků (Obr. 61). Nárůst této hloubky ale není lineární a během postupných výpalů je pronikání skelné fáze omezeno na hloubku přibližně 40 μm (pro natištěnou Ag nebo Cu vrstvu na jedné straně substrátu). Další pronikání skelné fáze je limitováno interakcí se skelnou fází obsaženou v podložce [4]. Jedná se o pozitivní zjištění, které umožňuje realizaci tlustovrstvých měděných motivů s vícenásobným počtem výpalů.

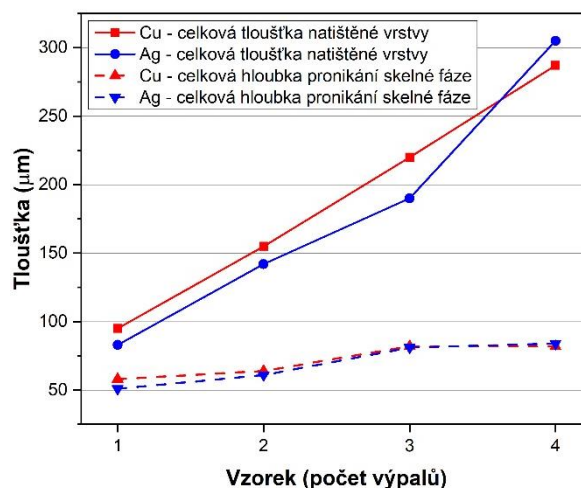
Rezistivita a relativní permitivita nebyly výrazně ovlivněny a nemění se ani s nárůstem tloušťky Cu nebo Ag vrstev. Výsledky popsané v této kapitole byly publikovány v [A1].

Tab. 16: Výsledky měření elektrických parametrů a hloubky pronikání skelné fáze (průměrné hodnoty ze 4 vzorků).

Vzorek	Počet výpalů	Tloušťka natištěné vrstvy líc/rub (μm)	Hloubka pronikání skelné fáze líc/rub (μm)	Rezistivita ($10^{13} \Omega \cdot \text{m}$)	Relativní permitivita při 1 MHz (-)	Elektrická pevnost ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)
Cu 1	1	41/54	29/29	2,54	10,42	24,98
Cu 2	2	80/75	32/32	2,55	10,41	25,31
Cu 3	3	109/111	41/41	2,56	10,48	24,53
Cu 4	4	140/147	38/44	2,56	10,43	23,41
Ag 1	1	46/37	25/26	2,56	10,35	24,60
Ag 2	2	71/71	29/32	2,55	10,45	26,34
Ag 3	3	90/100	40/41	2,57	10,40	25,48
Ag 4	4	145/160	43/41	2,57	10,51	25,58
Nepotištěná podložka	-	-/-	-/-	2,50	9,50	31,42



Obr. 60: Výsledky měření elektrické pevnosti.

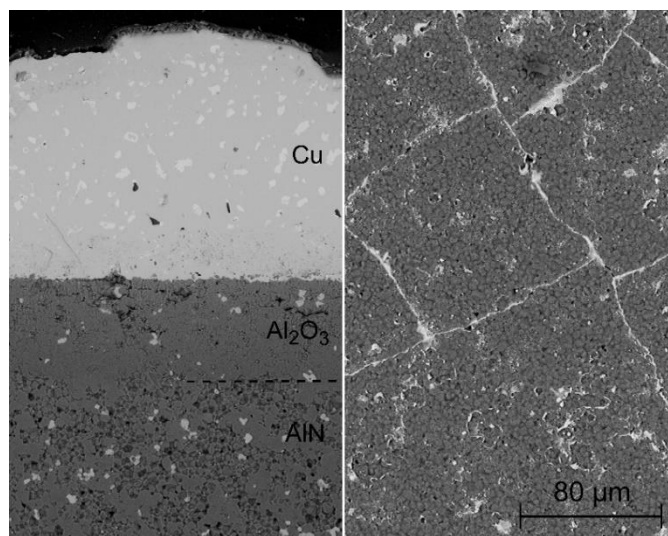


Obr. 61: Závislost celkové hloubky pronikání skelné fáze na celkové tloušťce natištěné vrstvy (rub + líc).

5.2 Interakce TPC vrstev s podložkami z nitridu hlinitého

Podložky z nitridu hlinitého (AlN) obsahují minimální množství skla a jejich struktura je více celistvá. Z tohoto důvodu pasty založené na mechanismu adheze prostřednictvím skelné fáze (sklotvorných oxidů) vykazují na AlN podložkách velmi nízkou adhezi a způsobují problémy se vznikem bublin a trhlin v natištěných vrstvách. V předchozí kapitole byl popsán mechanismus adheze TPC vrstev na Al_2O_3 podložkách a zatékání skelné fáze do substrátu na vzorcích natištěných měděnou pastou Heraeus C7403 (označení výrobce C7403C). Tato pasta je primárně určena pro tisk vrstev na Al_2O_3 podložky a její adheze na AlN je velmi nízká.

Adhezi této pasty na AlN lze zlepšit vytvořením tenké vrstvy Al_2O_3 na povrchu AlN podložky (preoxidace AlN při teplotě $1250\text{ }^\circ\text{C}$). Tento způsob TPC metalizace byl experimentálně ověřen. Metalografický výbrus TPC vrstvy na preoxidované AlN podložce je zobrazen na Obr. 62. TPC vrstvy natištěné na preoxidované AlN podložce mají poměrně nízkou adhezní sílu ($8\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, měřeno stejným způsobem popsaném v kapitole 4.4.3) a navíc preoxidace AlN přináší problémy se vznikem mikrotrhlin ve vrstvě Al_2O_3 na AlN. Tyto mikrotrhliny vznikají během chlazení po preoxidaci AlN podložky v důsledku rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti obou keramických materiálů. Po odloupení měděné vrstvy jsou tyto mikrotrhliny vyplněny skelnou fází z měděné pasty, která do nich zatéká během výpalu (Obr. 62). Potištěné preoxidované AlN podložky byly podrobeny teplotní šokové cyklické zkoušce (1000 cyklů v rozmezí teplot od $-40\text{ }^\circ\text{C}$ do $125\text{ }^\circ\text{C}$, dle normy ČSN EN 60068-2-14) a bylo ověřeno, že během teplotních šoků nedochází ke zvětšování trhlin a adhezní síla měděné vrstvy se výrazně nesnižuje. Velkou nevýhodou tohoto způsobu TPC metalizace na AlN je snížení tepelné vodivosti celé AlN podložky způsobené tenkou vrstvou Al_2O_3 a rovněž přítomnost mikrotrhlin je nežádoucí.



Obr. 62: Metalografický výbrus preoxidované AlN podložky (vlevo) a mikrotrhliny v Al_2O_3 vrstvě na AlN podložce (vpravo).

Problémy související s preoxidací AlN podložek řeší nová měděná pasta Heraeus C7403 (jedná se o adhezní pastu ve dvou pastovém systému pro technologii TPC), která byla představena v roce 2018 a je určena pro tisk adhezních vrstev jak na Al_2O_3 , tak na AlN podložky. Tato pasta obsahuje 82,5-86,5 hm. % měděných částic, 1-5 hm. % skelné fáze (55-60 % Bi_2O_3 , 35-40 % SiO_2 , 5-10 % B_2O_3), 3 hm. % adhezních oxidů (Cu_2O , Bi_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 atd.) a 9,5 hm. % organické složky [46].

Měděná pasta C7403 byla použita pro realizaci vzorků s TPC vrstvami na AlN podložkách od firmy CeramTec o tloušťce 0,6 mm (vzorky s označením N1 a N2) a 1 mm (vzorky s označením N3 a N4). Rozměry tištěných motivů jsou stejné jako při experimentu popsáném v kapitole 5.1 (opět odpovídají rozměrům měřících elektrod dle normy ČSN EN 60243-1). Stejným způsobem byly novou pastou C7403 natištěny motivy i na Al₂O₃ podložky (96 % Al₂O₃) se stejnou tloušťkou (0,6 a 1 mm) a tyto vzorky sloužily k porovnání odlišného chování a mechanismů adheze měděných vrstev na Al₂O₃ a AlN. Všechny vzorky byly vypáleny při stejném teplotním profilu, který je popsán v kapitole 4.3. Nepotištěné Al₂O₃ a AlN podložky byly použity pro porovnání parametrů s potištěnými variantami. Kompletní popis vzorků a výsledky měření elektrických parametrů jsou uvedeny v Tab. 17 (včetně počtu výpalů, který odpovídá počtu TPC vrstev).

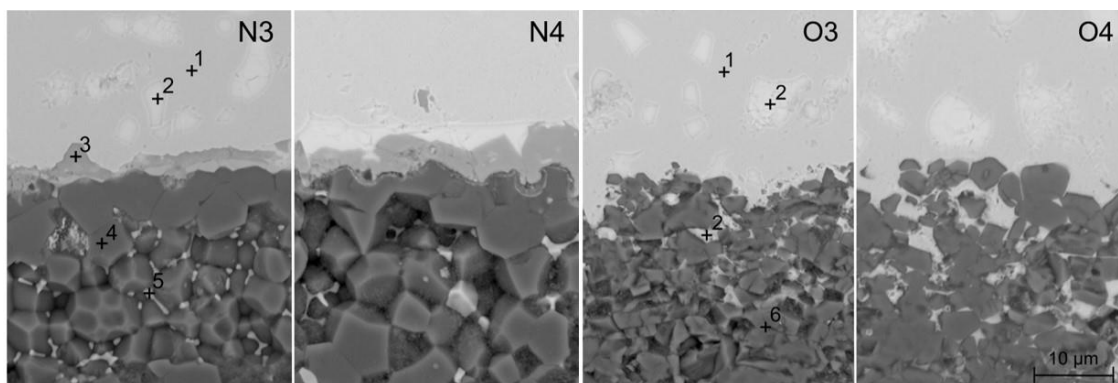
Tab. 17: Popis testovaných vzorků a výsledky měření elektrických parametrů (průměrné hodnoty ze 3 vzorků).

Vzorek	Materiál podložky	Tloušťka podložky (mm)	Počet výpalů (-)	Rezistivita (10 ¹² Ω·m)	Relativní permitivita při 1 MHz (-)	Ztrátový činitel při 1 MHz (-)	Elektrická pevnost (kV·mm ⁻¹)
N1	AlN	0,6	1	1,92	9,57	0,0008	22,69
N2			2	1,92	9,53	0,0005	25,43
Nepotištěná podložka			-	1,89	8,95	0,0005	21,74
N3		1,0	1	1,22	9,48	0,0006	17,43
N4			2	1,19	9,41	0,0005	18,84
Nepotištěná podložka			-	1,18	8,92	0,0005	16,35
O1	Al ₂ O ₃	0,6	1	1,92	10,61	0,0006	18,52
O2			2	1,91	10,66	0,0006	18,53
Nepotištěná podložka			-	1,91	9,50	0,0004	19,58
O3		1,0	1	1,20	11,14	0,0004	16,29
O4			2	1,20	11,15	0,0004	16,88
Nepotištěná podložka			-	1,21	9,58	0,0004	17,80

Elektrická pevnost Al₂O₃ podložek potištěných TPC vrstvami se snižuje vlivem pronikání skelné fáze z měděné pasty do podložky během vypalovacího procesu. Pronikání skelné fáze do podložky je viditelné na metalografických výbrusech na Obr. 63 (vzorky O3 a O4). Chování nové měděné pasty C7403 je v případě Al₂O₃ podložek stejné jako chování pasty C7403C, které bylo popsáno v kapitole 5.1. Rozdíl mezi těmito dvěma pastami je v množství skelné fáze (pojivové složky). Měděná pasta C7403 obsahuje menší množství skelné fáze a během vypalovacího procesu skelná fáze neproniká do tak velké hloubky jako v případě pasty C7403C (~20 μm hloubka pronikání pro vzorky O1 a O3 absolvující jeden výpal a ~25 μm pro vzorky

O2 a O4 absolvující dva výpaly) a dochází k menšímu poklesu elektrické pevnosti (pokles o 5,3-8,5 % v porovnání s nepotištěnými podložkami).

V případě AlN podložek nedochází během výpalu k žádnému pronikání skelné fáze do podložky (Obr. 63 - vzorky N3 a N4). Naopak na rozhraní mezi měděnou vrstvou a AlN podložkou se formuje vrstva oxidu měďného (Cu_2O) a tloušťka této vrstvy se opakovanými výpaly měděné vrstvy zvyšuje ($\sim 2\text{-}3\ \mu\text{m}$ tloušťka Cu_2O vrstvy po jednom výpalu a $\sim 5\ \mu\text{m}$ tloušťka Cu_2O vrstvy po dvou výpalech). Bylo prokázáno, že elektrická pevnost se díky absenci pronikání skelné fáze do AlN podložky nesnižuje, ale mírně narůstá (v porovnání s nepotištěnými AlN podložkami). Zvýšení elektrické pevnosti je pravděpodobně způsobeno formováním vrstvy oxidu měďného na povrchu AlN podložky. Tento jev byl ověřen měřeními elektrické pevnosti podložek se zoxidovanými a nezoxidovanými TPC vrstvami. V porovnání s nepotištěnými podložkami se elektrická pevnost vzorků N1 a N3, které absolvovaly jeden výpal, zvýšila o 4,4-6,6 % a o 15,2-17 % u vzorků N2 a N4, které absolvovaly dva výpaly. Tyto hodnoty jsou v souladu s postupným nárůstem tloušťky vrstvy oxidu měďného na rozhraní mezi AlN podložkou a TPC vrstvou.

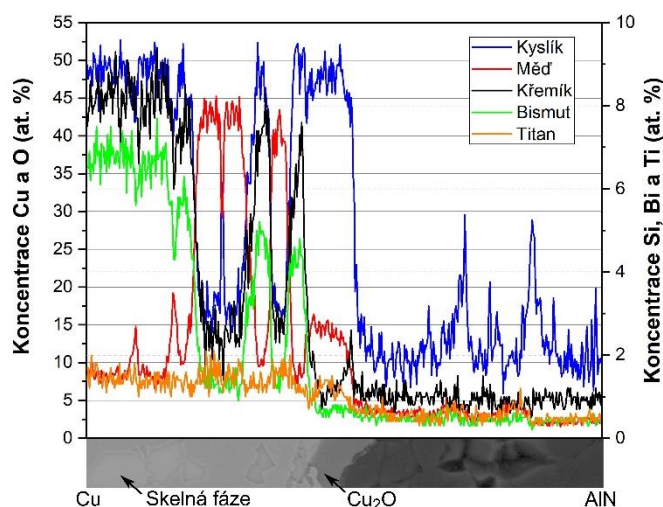


Obr. 63: Metalografické výbrusy testovaných vzorků – 1: měď, 2: skelná fáze, 3: Cu_2O , 4: AlN, 5: Y_2O_3 , 6: Al_2O_3 .

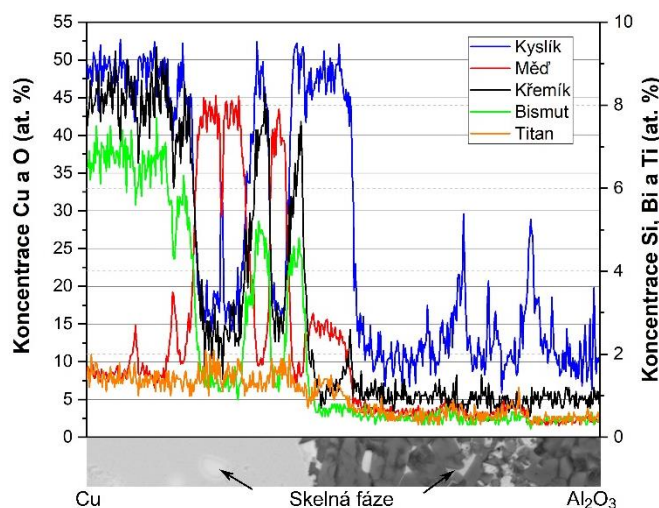
Relativní permitivita se ve srovnání s nepotištěnými podložkami zvýšila o 5,5-6,9 % v případě AlN a o 11,7-16,4 % v případě Al_2O_3 . Zvýšení relativní permitivity je způsobeno tím, že natištěná měděná vrstva lépe kopíruje všechny nerovnosti a póry na podložce (Obr. 63) než měřící elektrody v případě nepotištěných podložek.

Dále byla provedena prvková analýza (EDS) rozložení prvků v metalografických výbrusech (Obr. 64 a Obr. 65). Prvková analýza prokázala, že v případě AlN skelná fáze z měděné pasty do podložky neproniká. Během výpalu pasty vzniká na rozhraní měděné vrstvy a AlN podložky vrstva oxidu měďného. Rovněž bylo prokázáno, že vypálená měděná vrstva obsahuje kromě skelné fáze (SiO_2 , Bi_2O_3) i adhezní oxidy (Cu_2O , TiO_2). Skelná fáze, která

neproniká do podložky, zůstává v měděné vrstvě ve formě ohraničených oblastí s vysokou koncentrací SiO_2 a Bi_2O_3 (~24 at. % SiO_2 a ~17 at. % Bi_2O_3). TiO_2 je v měděné vrstvě rozložen rovnoměrně s koncentrací ~1,5 at. %.



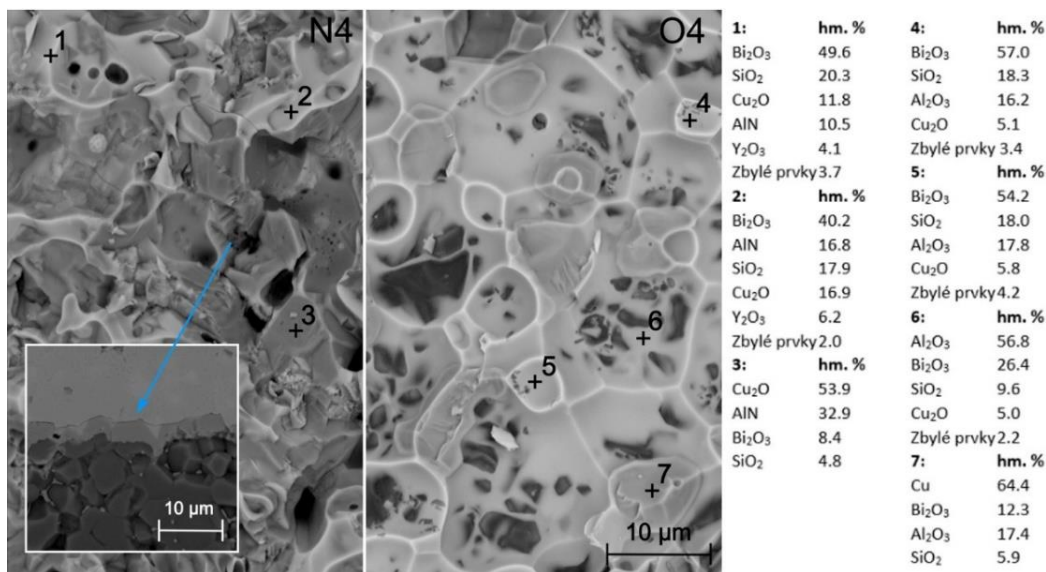
Obr. 64: EDS analýza rozložení prvků v metalografickém výbrusu TPC vrstvy na AlN podložce (vzorek N4).



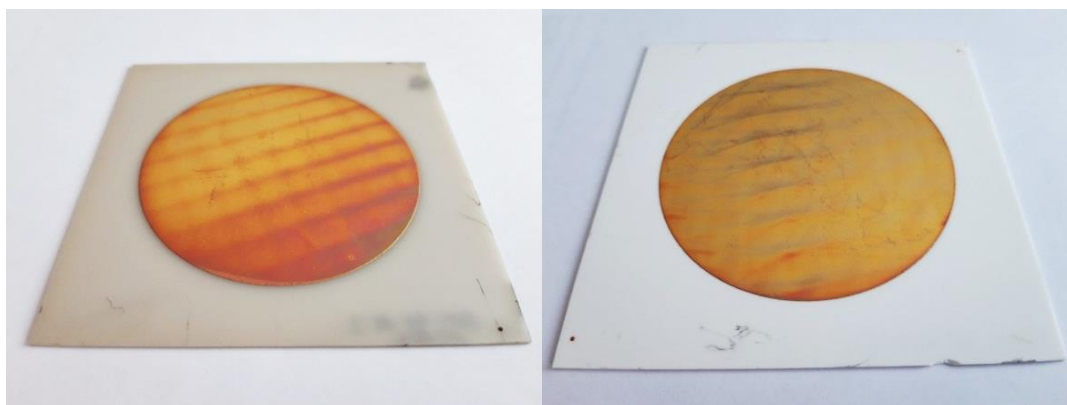
Obr. 65: EDS analýza rozložení prvků v metalografickém výbrusu TPC vrstvy na Al_2O_3 podložce (vzorek O4).

Na Obr. 66 jsou znázorněny povrchy obou typů podložek po odloupení měděné vrstvy. V případě Al_2O_3 podložky došlo k odloupení na rozhraní mezi měděnou vrstvou a skelnou fází z pasty proniklou během výpalu do podložky, zatímco u AlN substrátu došlo k odloupení ve vrstvě Cu_2O , která vzniká během výpalu mezi měděnou vrstvou a povrchem AlN podložky.

Vzorky s natištěnými měděnými vrstvami byly rovněž podrobeny teplotní šokové cyklické zkoušce (1000 cyklů v rozmezí teplot od $-40\text{ }^\circ\text{C}$ do $125\text{ }^\circ\text{C}$, dle normy ČSN EN 60068-2-14). Po této zkoušce nebyly na vzorcích žádné viditelné známky delaminace měděných vrstev (Obr. 67) a lze tedy konstatovat, že oba typy podložek s TPC metalizací (nová pasta C7403) jsou velmi odolné proti teplotním šokům.

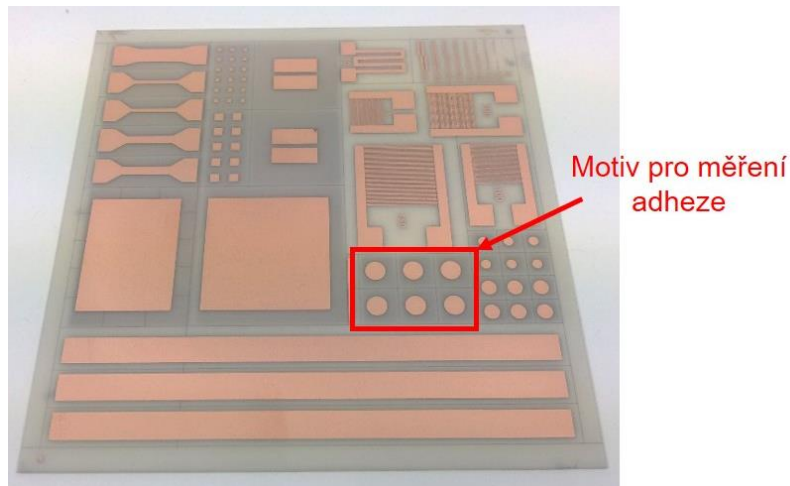


Obr. 66: Povrch AlN (vlevo) a Al₂O₃ (uprostřed) podložek po odloupení měděné vrstvy a chemické složení jednotlivých bodů vypočtené z EDS analýzy (vpravo) – 1 a 2: zbytky skelné fáze na vrstvě Cu₂O, 3: vrstva Cu₂O na AlN podložce, 4 a 5: skelná fáze, 6: skelná fáze proniká do Al₂O₃ podložky, 7: zrno mědi ve skelné fázi.



Obr. 67: Vzorky po testu teplotními šoky – AlN podložka (vlevo), Al₂O₃ podložka (vpravo).

Novou měděnou pastou C7403 byl dále realizován testovací motiv na AlN podložce, který obsahoval motivy pro měření rezistivity, proudové zatížitelnost, adhezní síly atd. (Obr. 68). Rezistivita měděné vrstvy na AlN a z ní vypočtená konduktivita a tepelná vodivost, stejně jako proudová zatížitelnost, je srovnatelná jako v případě měděných vrstev na Al₂O₃ podložkách v kapitole 4.1. Pozornost byla tedy věnována pouze měření adhezní síly měděné vrstvy na AlN (měřeno stejným způsobem jako v kapitole 4.4.3). Navzdory tomu, že adheze měděných vrstev na Al₂O₃ a AlN je založena na rozdílných mechanismech, bylo ověřeno, že adhezní síla těchto vrstev natištěných pastou C7403 je na obou typech podložek srovnatelná (~20 N·mm⁻²). Při srovnání s adhezní silou měděné vrstvy na preoxidovaných AlN podložkách (8 N·mm⁻²) se jedná o výrazný progres.



Obr. 68: Testovací měděný motiv na AlN substrátu.

Provedenými experimenty bylo prokázáno, že adheze měděné pasty na Al_2O_3 a AlN je dosaženo rozdílnými adhezními mechanismy. V případě AlN je adheze dosaženo pomocí vrstvy Cu_2O vznikající na povrchu AlN podložky, zatímco v případě Al_2O_3 je adheze zajištěna pomocí skelné fáze pronikající do podložky. Díky absenci pronikání skelné fáze do AlN nedochází ke snížení elektrické pevnosti podložky jako v případě Al_2O_3 . Vysoká odolnost proti teplotní šokům, dostatečná adheze měděných vrstev na AlN a široké technologické možnosti TPC technologie umožňují realizaci pokročilých substrátů pro aplikace s vysokým výkonovým zatížením. Výsledky popsané v této kapitole byly publikovány v [A4].

Budoucí vývoj v této oblasti by mohl směřovat k realizaci měděných struktur přímo na chladičích z nitridu hlinitého, které mohou být doplněny například vodním chlazením.

6 Technologie odporových sítí s vodivým systémem z mědi vytvořeným technologií TPC

Technologie TPC rovněž umožňuje realizaci pasivních součástek jako jsou rezistory, senzory teploty atd. Rezistory patří mezi nejpoužívanější pasivní součástky ve výkonové elektronice. Tyto rezistory mohou být použity jako ochrana obvodů, pro regulaci výkonu nebo pro měření různých veličin. Ve výkonové elektronice se standardně používají drátové rezistory i rezistory realizované technologií tlustých vrstev, jejichž vývody jsou zpravidla natištěny vrstvami stříbra (kapitola 2.3.1.2).

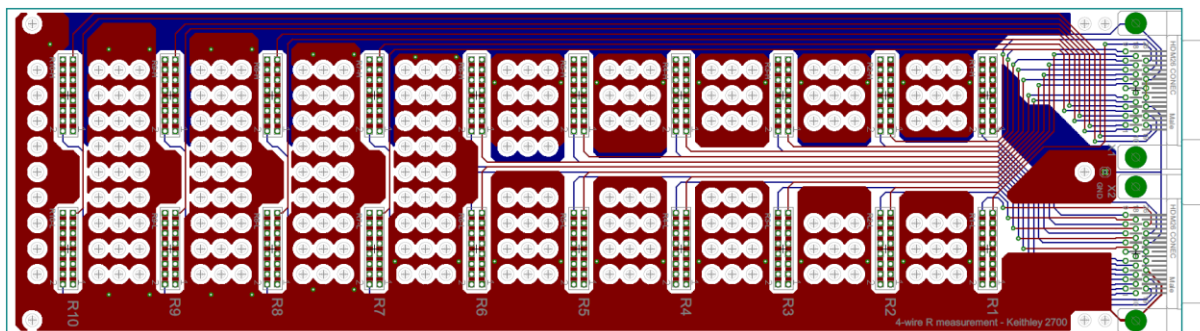
Současným trendem ve výkonové elektronice je neustálá miniaturizace a zvyšování hustoty výkonu. Důsledkem tohoto trendu jsou zvýšené nároky na výkonové součástky. Hlavním problémem je zejména odvod ztrátového tepla ze zatížených součástek. Výkonové rezistory s měděnými (TPC) vývody představují zajímavé řešení pro miniaturizaci. Tyto rezistory mají řadu výhod a v některých aplikacích by mohly nahradit standardní drátové výkonové rezistory. Mezi hlavní výhody patří dobrý přestup tepla do keramické podložky a nízká tloušťka v porovnání s drátovými rezistory. Výhodou je rovněž nižší cena mědi v porovnání se stříbrem, a to zejména při realizaci výkonových rezistorů vyžadujících robustní vývody. Rezistory na bázi TPC mohou být realizovány jak v diskrétní, tak v integrované podobě přímo na TPC substrátu.

V této kapitole jsou popsány experimenty zaměřené na realizaci tištěných rezistorů kompatibilních s technologií TPC. Tyto rezistory byly realizovány dvěma způsoby – standardní odporovou pastou a speciálním CuNi nanočásticovým inkoustem.

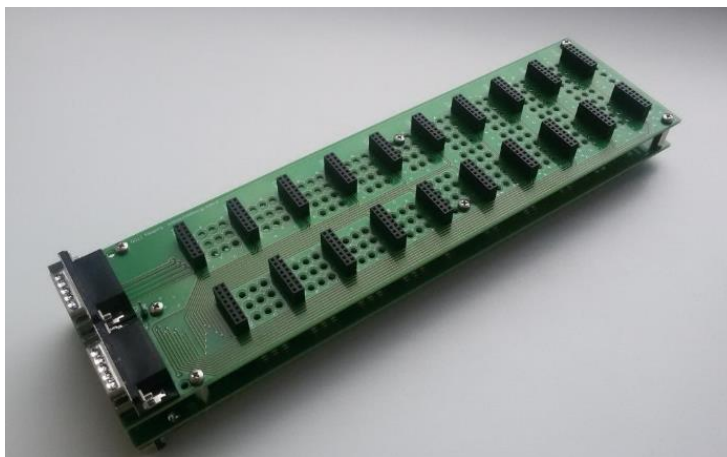
6.1 Návrh přípravku pro testování rezistorů

Při testování rezistorů je nutné přesně opakovatelné a vícekanálové měření. Proto byl navržen a realizován přípravek pro hromadné opakovatelné měření teplotní závislosti odporu a teplotního součinitele odporu (TCR) tištěných rezistorů v termostatické lázni.

Přípravek umožňuje měření až dvaceti kusů rezistorů variabilních rozměrů čtyřbodovou metodou. Velkou výhodou přípravku je možnost rychlé výměny rezistorů. Teplotní závislosti odporu rezistorů popsaných dále v této kapitole byly měřeny pomocí tohoto přípravku. Návrh plošného spoje přípravku je zobrazen na Obr. 69. Na Obr. 70 je vyfocen realizovaný měřicí přípravek. Otvory v měřicím přípravku umožňují rovnoměrné proudění silikonového oleje v okolí testovaných rezistorů v termostatické lázni.



Obr. 69: Návrh DPS měřícího přípravku.

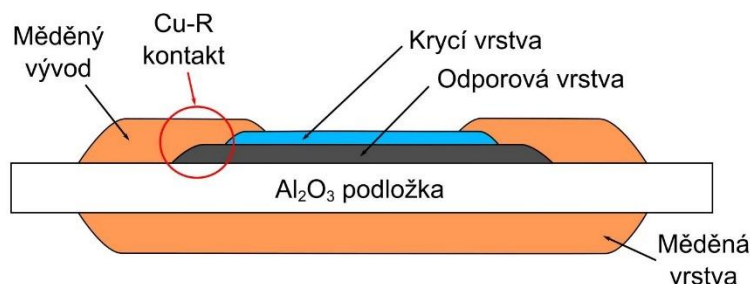


Obr. 70: Měřící přípravek.

6.2 Rezistory realizované standardní odporovou pastou

Postup realizace výkonových rezistorů s měděnými (TPC) vývody je odlišný od postupu realizace standardních tlustovrstvých rezistorů (kapitola 2.3.1.2). Měděné vývody musejí být vypalovány v ochranné dusíkové atmosféře, zatímco odporová vrstva je určena pro výpal v oxidační atmosféře. Výpal měděných vývodů v dusíku je nutný z důvodu ochrany mědi proti oxidaci. Naopak výpal odporové vrstvy v dusíku způsobuje její nevratné změny. Proto musel být upraven postup realizace těchto rezistorů oproti standardním.

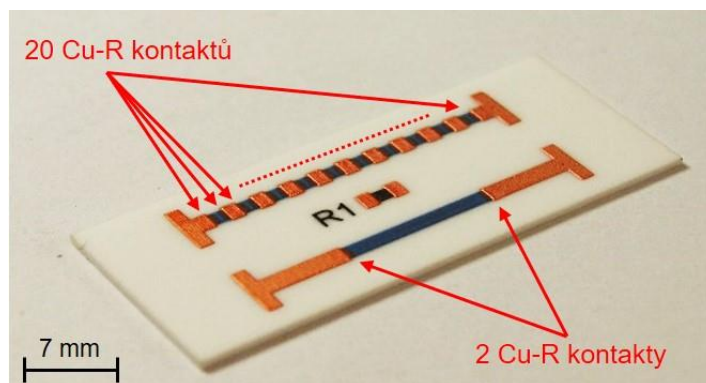
Pro realizaci vzorků rezistorů byla použita Al_2O_3 podložka o tloušťce 0,6 mm. Odporová vrstva byla natištěna pastou Heraeus R8921 (plošný odpor $100 \Omega/\square$). Po výpalu v průběžné peci v oxidační atmosféře ($850 \text{ }^\circ\text{C}$) byla odporová vrstva zakryta krycí pastou DuPont 5704 a opět vypálena v průběžné peci v oxidační atmosféře. Krycí pasta 5704 byla zvolena kvůli její vyšší teplotě výpalu ($850 \text{ }^\circ\text{C}$). Zakrytí odporové vrstvy (kromě konců vrstvy) je nezbytné kvůli následnému výpalu měděných vývodů v dusíkové atmosféře. Přes nezakryté konce odporové vrstvy byly následně natištěny měděné vývody (měděná pasta Heraeus C7403) a vypáleny v retortové peci s ochrannou dusíkovou atmosférou (stejný profil výpalu jako v kapitole 4.3). Struktura tištěného rezistoru s měděnými vývody je znázorněna na Obr. 71.



Obr. 71: Struktura tištěného rezistoru s měděnými vývody.

6.2.1 Ověření funkčnosti rezistorů

Funkčnost, stabilita a chování rezistorů s měděnými vývody byly zkoumány na motivu, jehož realizovaný vzorek je zobrazen na Obr. 72. Jedná se o tzv. Intermittent Resistor Pattern (IRP), který slouží ke stanovení kontaktního odporu vznikajícího mezi měděnými vývody a odporovou vrstvou. IRP obsahuje vždy dva odporové motivy. První motiv je tvořen deseti-čtvercovou odporovou strukturou a dvěma kontakty mezi měděnými vývody a odporovou vrstvou (2 Cu-R kontakty). Druhý motiv obsahuje deset jedno-čtvercových odporových struktur a dvacet kontaktů mezi měděnými vývody a odporovou vrstvou (20 Cu-R kontaktů). V případě ideálního kontaktu mezi odporovou vrstvou a měděnými vývody by měly mít oba motivy stejnou hodnotu odporu. Pokud tomu tak není, lze kontaktní odpor určit jako desetinu rozdílu odporů obou motivů. Výše popsané motivy byly realizovány i standardním způsobem se stříbrnými vývody (Ag-Pd pasta Heraeus C2030) a tyto vzorky byly použity jako reference.



Obr. 72: Realizovaný vzorek IRP.

U realizovaných vzorků byly změřeny teplotní závislosti odporu v rozmezí teplot od 0 °C do 100 °C s krokem 10 °C (ustálení na každé teplotě po dobu 10 min) před a po zrychleném stárnutí suchým teplem (155 °C po dobu 1000 hodin dle normy ČSN EN 60068-2-2) v termostatické lázni Lauda P JL 12 se silikonovým olejem. Teplotní závislost odporu byla změřena i v průběhu zrychleného stárnutí suchým teplem (po 100, 200 a 500 hodinách). Odpor

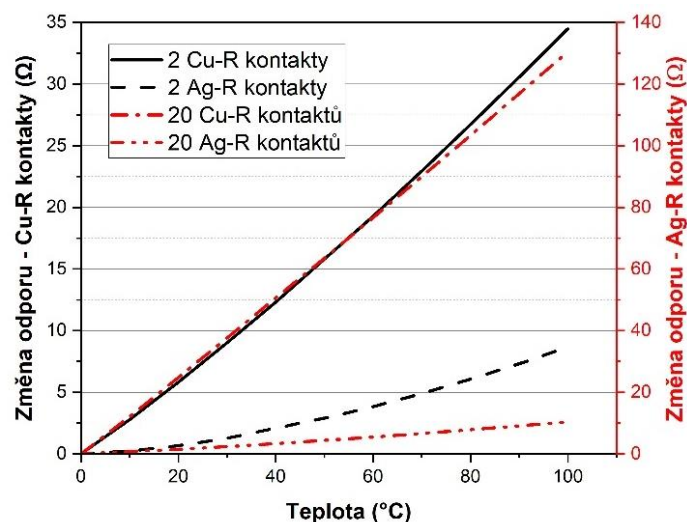
vzorků byly měřeny čtyřbodovou metodou a změřených hodnot byl vypočten teplotní součinitel odporu (TCR) podle vzorce

$$TCR = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot 10^6, \tag{6.1}$$

kde R je počáteční hodnota odporu, ΔR je rozdíl odporů (při 0 °C a 100 °C) a ΔT je rozdíl teplot (100 °C). Měření bylo provedeno pro šest vzorků rezistorů s měděnými vývody a tři referenční vzorky rezistorů se stříbrnými vývody. Na Obr. 73 je zobrazen graf změn odporu jednotlivých vzorků v závislosti na teplotě vztažených k teplotě 0 °C. Průměrné hodnoty a TCR měřených vzorků jsou shrnuty v Tab. 18. Navržená délka každého rezistoru je deset čtverců. Skutečná délka rezistorů se však kvůli smršťování pasty během výpalu může lišit. Proto byla pomocí mikroskopu změřena skutečná délka rezistorů a hodnoty odporů byly přepočteny na délku rezistorů deset čtverců (Tab. 18). Dále byly vypočteny změny hodnot odporu (Obr. 74) a TCR (v %) po stárnutí.

Tab. 18: Výsledky testování rezistorů s měděnými a stříbrnými vývody (motiv IRP).

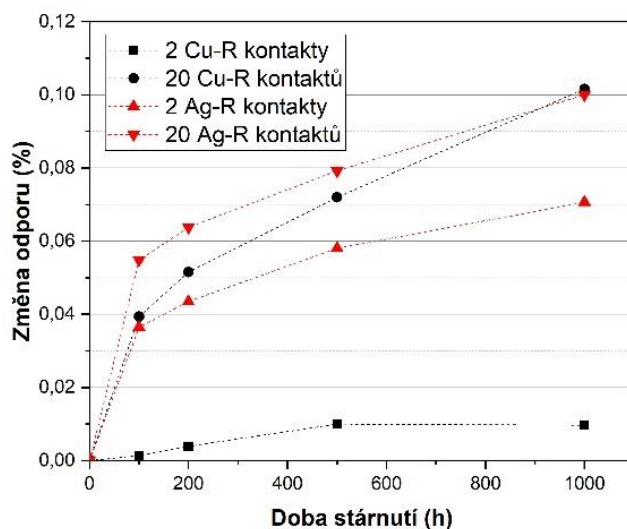
Vzorek	TCR (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Odpor (Ω)	Skutečný počet čtverců	Přepočtený odpor na délku rezistoru 10 čtverců (Ω)	Změna odporu po stárnutí (%)	Změna TCR po stárnutí (%)
2 Cu-R kontakty	±166	2080	9,83	2116	±0,01	±0,33
20 Cu-R kontaktů	±305	4794	9,83	4877	±0,10	±0,10
2 Ag-R kontakty	±57	1517	9,85	1540	±0,07	±3,89
20 Ag-R kontaktů	±110	941	9,62	978	±0,10	±1,35



Obr. 73: Změny odporu vzorků v závislosti na teplotě (vztažené k 0 °C).

Hodnoty odporu vzorků se dvěma kontakty jsou v případě rezistorů s měděnými vývody o 27 % nižší než u rezistorů se stříbrnými vývody. Hodnoty odporu vzorků s dvaceti kontakty vyšly u rezistorů s měděnými vývody zhruba pětikrát vyšší než u stejných vzorků se stříbrnými

vývody. Vysoké hodnoty odporu vzorků s měděnými vývody jsou způsobeny vyšším kontaktním odporem mezi odporovou vrstvou a měděnými vývody. Dalším důvodem je i vícenásobný výpal odporové vrstvy a delší vypalovací proces.



Obr. 74: Změna odporu vzorků IRP po stárnutí.

Hodnoty odporu vzorků se dvěma kontakty jsou v případě rezistorů s měděnými vývody o 27 % nižší než u rezistorů se stříbrnými vývody. Hodnoty odporu vzorků s dvaceti kontakty vyšly u rezistorů s měděnými vývody zhruba pětkrát vyšší než u stejných vzorků se stříbrnými vývody. Vysoké hodnoty odporu vzorků s měděnými vývody jsou způsobeny vyšším kontaktním odporem mezi odporovou vrstvou a měděnými vývody. Dalším důvodem je i vícenásobný výpal odporové vrstvy a delší vypalovací proces.

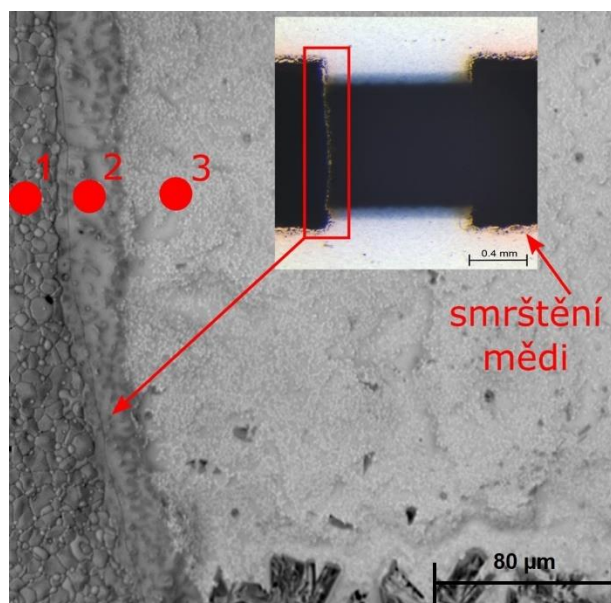
Rozdíl hodnot odporů mezi vzorky se dvěma a dvaceti kontakty se stříbrnými vývody je opačný. Tento jev může být způsoben difuzí stříbra z vývodů do odporové vrstvy (založené na oxidech ruthenia). Naopak v případě rezistorů s měděnými vývody se tento jev neprojevil. Dle údajů výrobce odporové pasty má na hodnoty odporu a TCR vliv i délka rezistoru. Proto mají vzorky se stříbrnými vývody vyšší hodnoty odporu a nižší hodnoty TCR pro více čtvercové struktury (vzorky se dvěma kontakty) Toto tvrzení odpovídá naměřeným hodnotám v Tab. 18.

Vzorky s měděnými vývody (se dvěma i dvaceti kontakty) vykazují přibližně třikrát vyšší hodnoty TCR v porovnání se vzorky se stříbrnými vývody (Tab. 18). Po zrychleném stárnutí suchým teplem došlo u vzorků s měděnými vývody (se dvěma kontakty) k nižším změnám odporu i TCR než v případě stejných vzorků se stříbrnými vývody. Výsledky obou variant vzorků s dvaceti kontakty jsou porovnatelné (Tab. 18).

Z výsledků provedených testů je zřejmé, že rezistory s měděnými vývody jsou více stabilní. Vyšší stabilita těchto rezistorů je způsobena rozdílným postupem výroby, při kterém

je vícenásobně vypálena odporová vrstva (výpal odporové vrstvy v oxidační atmosféře, výpal krycí vrstvy v oxidační atmosféře a výpal měděných vývodů v dusíkové atmosféře). Nicméně vícenásobný výpal odporové vrstvy má za následek vyšší hodnoty odporu i TCR ve srovnání s rezistory se stříbrnými vývody.

Důležitým faktorem, který významně ovlivňuje spolehlivost rozhraní mezi odporovou vrstvou a měděným vývodem je velikost překrytí měděného vývodu přes odporovou vrstvu a zároveň překrytí měděného vývodu a krycí vrstvy (Obr. 71). Při výpalu měděných vývodů může docházet k jejich smršťování. Pokud by překrytí měděného vývodu přes odporovou a krycí vrstvu bylo nedostatečné, rozhraní by bylo vystaveno působení ochranné dusíkové atmosféry a mohlo by během výpalu reagovat s redukčními činidly z měděné pasty. Důsledkem mohou být nevratné změny ve struktuře odporové vrstvy v nezakryté oblasti. Typický příklad tohoto jevu je viditelný na Obr. 75. EDS analýza prokázala, že nezakrytá oblast kontaktu vystavená působení ochranné dusíkové atmosféry v retortové peci obsahuje významně nižší množství mědi a ruthenia.



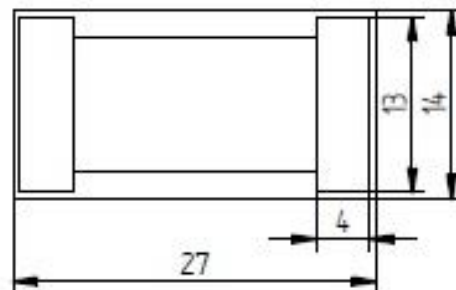
Obr. 75: SEM snímek rozhraní mezi měděným vývodem a odporovou vrstvou – 1: měděný vývod (měď, oxidy mědi a bismutu podél hranic zrn), 2: rozhraní (malé množství mědi, oxidy křemíku a bismutu, žádný oxid rutheničitý), 3: odporová vrstva (oxidy křemíku a ruthenia).

6.2.2 Návrh a realizace motivu výkonového rezistoru

Na základě ověření funkčnosti a stability vzorků IRP byly navrženy a realizovány vzorky výkonových rezistorů (Obr. 76). Tyto vzorky jsou tvořeny dvou-čtvercovou odporovou strukturou na Al_2O_3 podložce a jejich rozměry jsou uvedeny na Obr. 77.



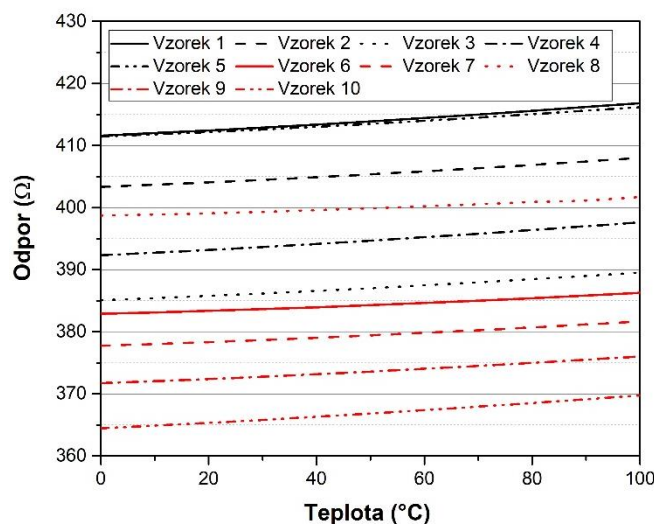
Obr. 76: Realizovaný vzorek rezistoru s měděnými vývody.



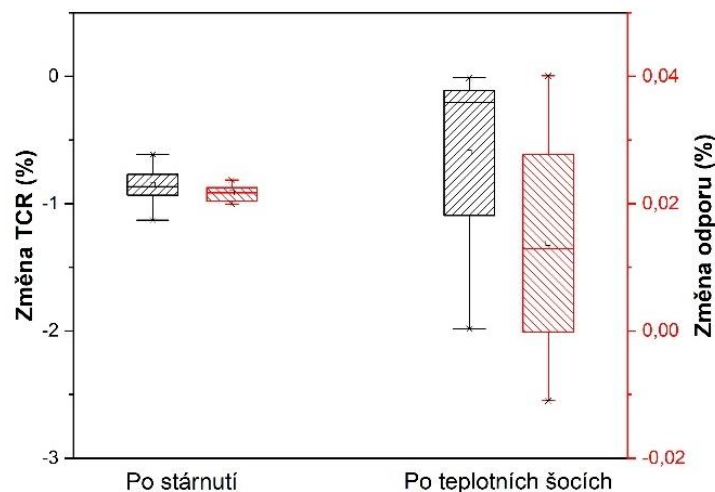
Obr. 77: Rozměry rezistoru.

U realizovaných vzorků byly změřeny základní elektrické parametry (TCR, změna TCR a odporu po zrychleném stárnutí suchým teplem a po teplotní šokové cyklické zkoušce, izolační odpor, jmenovitý výkon atd.). Měření těchto parametrů bylo provedeno podle norem ČSN EN 60115-1 a ČSN EN 140200. Dále byly stejným způsobem jako u vzorků IRP změřena teplotní závislost odporu (Obr. 78) a vypočteny hodnoty TCR. Teplotní závislost odporu byla opět změřena i po zrychleném stárnutí suchým teplem a po teplotní šokové cyklické zkoušce. Změny odporu a TCR v % po těchto testech jsou uvedeny v grafu na Obr. 79. Během teplotních šoků nedošlo k žádné delaminaci měděných vývodů ani odporové vrstvy. Parametry realizovaných výkonových rezistorů s měděnými vývody jsou shrnuty v

Tab. 19 (průměrné hodnoty z deseti vzorků).



Obr. 78: Teplotní charakteristiky vzorků výkonových rezistorů.



Obr. 79: Změny TCR a odporu vzorků výkonových rezistorů po stárnutí a teplotních šocích.

Tab. 19: Parametry výkonových rezistorů s měděnými vývody.

Parametr	Hodnota
Odpor (Ω)	390
Tolerance odporu (%)	± 10 (bez trimování)
TCR (10^{-6} K^{-1})	± 120
Jmenovitý výkon (W)	1,5
Průrazné napětí (kV)	10 (skrz podložku)
Izolační odpor ($\text{G}\Omega$)	> 1
Změna odporu po stárnutí – 155 °C, 1000 h (%)	$\pm 0,05$
Změna odporu po teplotních šocích – 1000 cyklů od -50° do 150 °C (%)	$\pm 0,05$
Změna TCR po stárnutí – 155 °C, 1000 h (%)	± 1
Změna TCR po teplotních šocích – 1000 cyklů od -50° do 150 °C (%)	± 2

Provedenými experimenty bylo prokázáno, že vývody tlustovrstvých výkonových rezistorů mohou být realizovány technologií TPC. Realizované vzorky výkonových rezistorů mají odpor 390Ω a $\text{TCR } \pm 120 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a tyto hodnoty jsou stabilní po zrychleném stárnutí suchým teplem i po teplotních šocích. Rozptyl hodnot odporu po výpalu je $\pm 10 \%$ a přesnějších hodnot odporů lze dosáhnout pomocí laserového trimování. Výsledky popsané v této kapitole byly publikovány v [A3].

Při použití standardní odporové pasty určené pro výpal v oxidační atmosféře v kombinaci s TPC vývody je potřeba kombinovat výpaly v oxidační a ochranné dusíkové atmosféře a zejména při realizaci složitějších propojení obsahující vícevrstvé struktury vyžadujících vícenásobný výpal v dusíkové atmosféře může být kombinace výpalů problematická. Během výpalu měděných vývodů (vrstev) v dusíkové atmosféře, při kterém je již natištěná odporová vrstva v této atmosféře opětovně přepálena, dochází k nárůstu odporu na rozhraní mezi odporovou vrstvou a měděnými vývody. Proto je touto metodou obtížné realizovat

nízkoohmové výkonové rezistory. Nelze použít ani nízkoohmové pasty, které kromě oxidů ruthenia obsahují i značné množství stříbra, které může difundovat do mědi a vytvářet slitiny. Řešením těchto problémů by mohlo být použití odporového materiálu na bázi konstantanu (slitina mědi a niklu) umožňujícího výpal v dusíkové atmosféře.

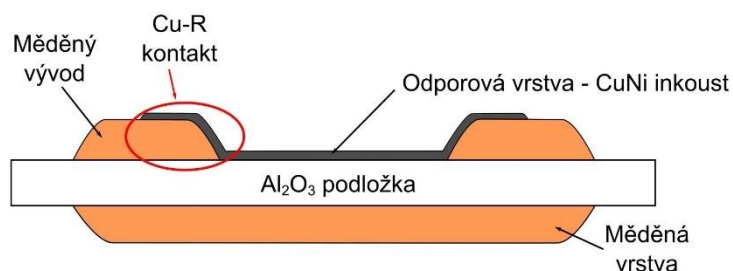
6.3 Rezistory realizované odporovým inkoustem

Použití konstantanové (slitina Cu:Ni v poměru 55:45) odporové vrstvy umožňuje realizovat rezistory s nízkými hodnotami odporu a nízkým teplotním součinitelem odporu (TCR). Problémem je, že odporové pasty na bázi konstantanu určené pro tisk na keramické podložky nejsou v současné době komerčně dostupné. Na základě průzkumu trhu v oblasti tisknutelných odporových materiálů byl proto pro další experimenty zvolen komerčně dostupný odporový inkoust CuNi-OC5050 od výrobce Applied Nanotech. Tento inkoust obsahuje CuNi nanočástice a je určen pro aditivní nanášení technologiemi InkJet nebo AerosolJet (AJ). Vlastnosti inkoustu udávané výrobcem jsou uvedeny v Tab. 20. Inkoust lze vypalovat v ochranné dusíkové atmosféře při teplotách vyšších než 350 °C a je zde tedy předpoklad dobré kompatibility s technologií TPC.

Tab. 20: Vlastnosti odporového inkoustu CuNi-OC5050.

Parametr	Hodnota
Poměr Cu:Ni	50:50
Velikost částic (nm)	20-40
Plošný odpor ($m\Omega/\square$)	200-300 při tloušťce vrstvy 2 μm
Obsah pevných částic (hm. %)	50
Viskozita (cP)	8-18

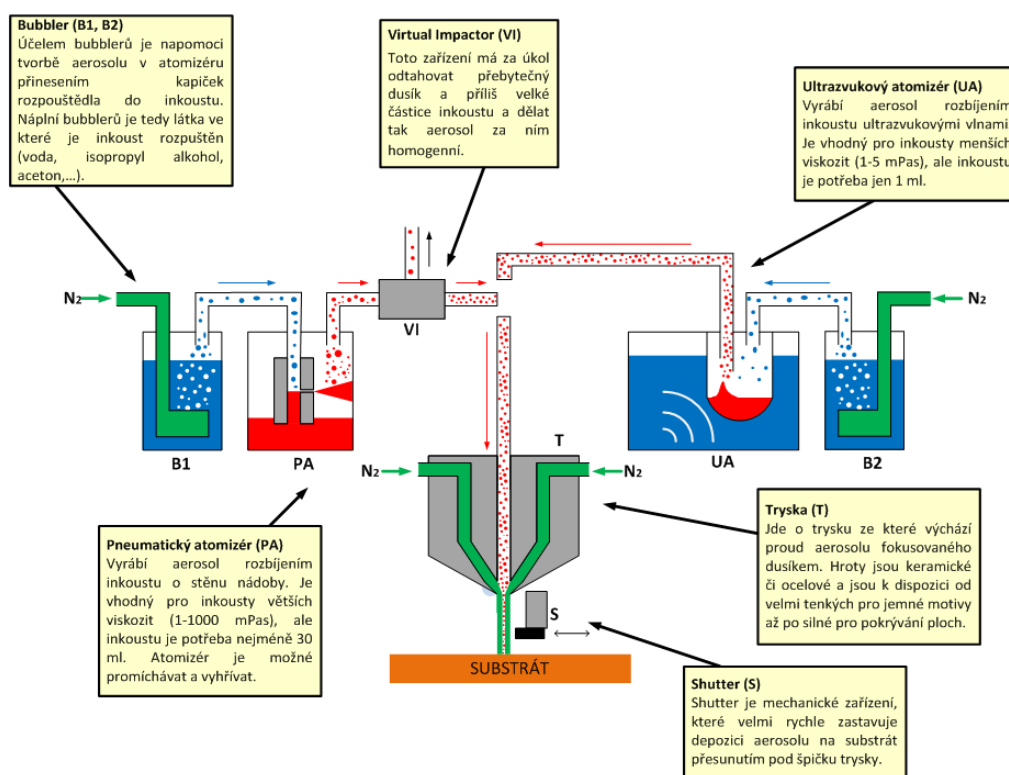
Kromě odporové vrstvy byly použité materiály stejné jako v kapitole 6.2 (keramická podložka z 96% Al_2O_3 a měděné vývody natištěné pastou Heraeus C7403). Rozdíl spočíval v jednotlivých krocích realizace rezistoru, kdy v tomto případě byly na keramickou podložku nejprve natištěny a vypáleny měděné vývody (stejný vypalovací profil jako v kapitole 4.3) a až poté byla natištěna odporová vrstva. Struktura tištěného rezistoru s měděnými vývody s CuNi odporovou vrstvou je znázorněna na Obr. 80.



Obr. 80: Struktura tištěného rezistoru s měděnými vývody s CuNi odporovou vrstvou.

6.3.1 Technologie AerosolJet

Aerosol Jet (AJ) je unikátní aditivní depoziční technologie od americké společnosti Optomec. Tato technologie umožňuje selektivní depozici široké škály materiálů ve formě inkoustu. Selektivní depozice je dosaženo pomocí proudu nosného plynu (dusíku), který soustředí aerosol deponovaného materiálu na požadovanou plochu substrátu. Na Obr. 81 je znázorněn princip technologie AJ a stručný popis jednotlivých částí AJ zařízení. Z deponovaného materiálu je nejprve pomocí ultrazvukového nebo pneumatického atomizéru vytvořen aerosol. Aerosol je následně proudem dusíku přiveden do depoziční hlavy. Depoziční hlava obsahuje ještě další přívod dusíku, který zaostruje tok aerosolu v trysce a umožňuje depozici velmi jemných (s šířkou dráhy od 8 μm) a přesných motivů. [47][48]

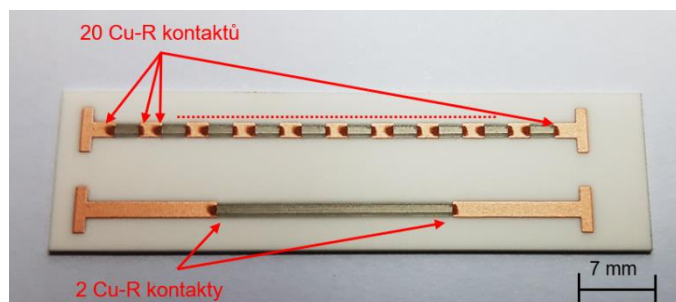


Obr. 81: Princip a části zařízení Aerosol Jet Printing [47].

6.3.2 Realizace vzorků rezistorů

Pro realizaci vzorků CuNi rezistorů byl použit opět motiv IRP (kapitola 6.2), s tím rozdílem, že v případě rezistorů s CuNi odporovou vrstvou byl zvolen IRP motiv s dvoučtvercovými strukturami (Obr. 82). IRP opět obsahoval dva odporové motivy. První motiv byl tvořen dvacetičtvercovou odporovou strukturou a dvěma kontakty mezi měděnými vývody a CuNi odporovou vrstvou (2 Cu-R kontakty). Druhý motiv obsahoval deset dvoučtvercových odporových struktur a dvacet kontaktů mezi měděnými vývody a CuNi odporovou vrstvou (20 Cu-R kontaktů). IRP s dvoučtvercovými strukturami byl zvolen z důvodu jednodušší

depozice odporové vrstvy AJ zařízením, protože při realizaci IRP s jedno-čtvercovými odporovými strukturami docházelo na motivu s 20 Cu-R kontakty ke spojování odporových motivů na Cu vývodech.

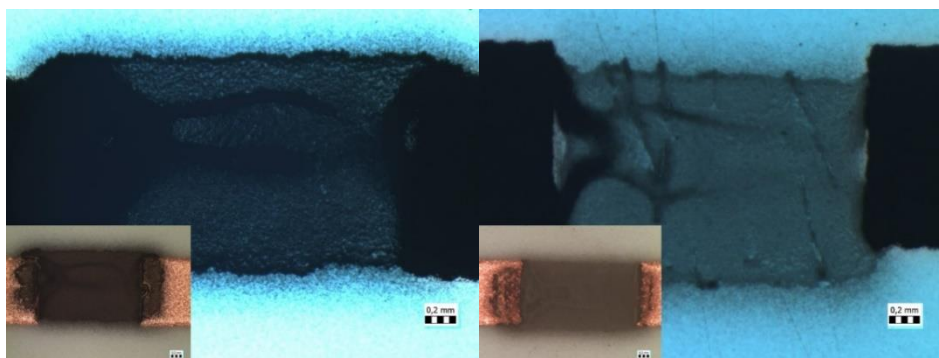


Obr. 82: Realizovaný vzorek IRP – CuNi odporová vrstva.

Při prvním experimentu byly realizovány vzorky s jednou vrstvou CuNi inkoustu. Po tisku AJ zařízením byla vrstva vysušena (120 °C, 30 min). Následně byly provedeny zkušební výpaly v retortové peci s ochrannou dusíkovou atmosférou při dvou různých teplotách (420 °C a 960 °C – stejná teplota a profil výpalu jako v případě TPC vrstev). Při realizaci těchto vzorků byly rovněž optimalizovány parametry tisku pomocí AJ zařízení (Tab. 21).

Tab. 21: Parametry tisku odporové vrstvy – zařízení Optomec AerosolJet 300-UP.

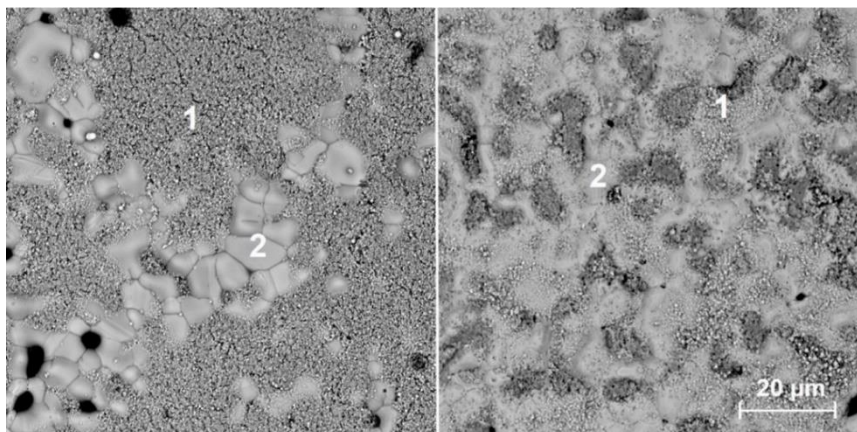
Parametr	Hodnota
Tisková hlava	Wide nozzle head
Tisková tryska	Ø 0,75 mm
Atomizér	Pneumatiký
Atomizér	1200 sccm
Průtoky dusíku	Exhaust
Exhaust	1000 sccm
Sheath gas	80 sccm
Rychlost tisku	4 mm·s ⁻¹
Vyhřívání substrátu	80 °C



Obr. 83: CuNi vrstva vypálená při 420 °C (vlevo) a při 960 °C (vpravo).

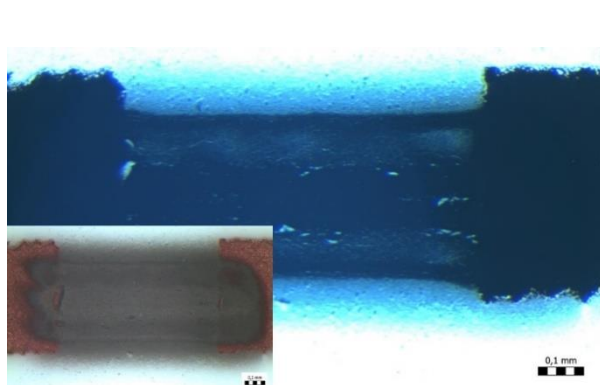
CuNi vrstva na vzorcích po zkušebních výpalech byla tenká a porézní (Obr. 83). Vzorky vypálené při 420 °C byly funkční, ale jejich odpor se pohyboval v řádech kΩ a MΩ a CuNi

vrstva byla špatně slinutá a nesoudržná (Obr. 84). Naopak vzorky vypálené při 960 °C měly lépe slinutou CuNi vrstvu (Obr. 84), ale kvůli její malé tloušťce byly nefunkční. Při dalších experimentech budou CuNi vrstvy vypalovány při teplotě 960 °C, při které lépe slinují a jedná se o stejnou teplotu výpalu jako v případě technologie TPC.

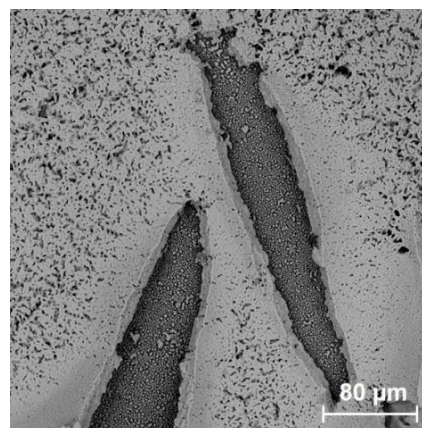


Obr. 84: SEM snímky rozhraní CuNi vrstvy a Cu vývodů – výpal při 420 °C (vlevo) a při 960 °C (vpravo) – 1: CuNi vrstva, 2: zrna Cu (Cu vývod).

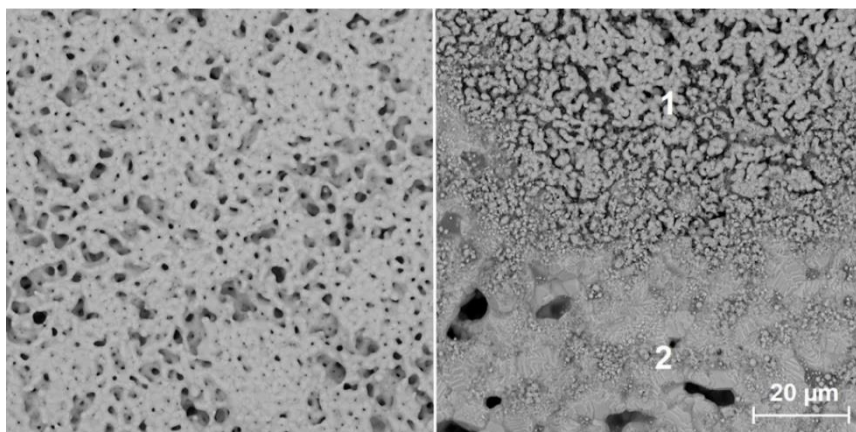
Na základě předchozích výsledků byly dále realizovány vzorky se čtyřmi vrstvami CuNi inkoustu (opět motiv IRP). V průběhu depozice byly substráty umístěny na stolku vyhřívaném na 80 °C (stolek je součástí AJ zařízení). Tímto způsobem lze realizovat vzorky s větším počtem vrstev a jednotlivé vrstvy jsou postupně přímo během depozice vysušeny. Následně byly vzorky rezistorů s CuNi vrstvami ještě vysušeny v peci (120 °C, 30 min) a vypáleny. Tloušťka vypálené CuNi vrstvy (Obr. 85) byla větší než u předchozích vzorků a během výpalu došlo ke kvalitnímu slinutí CuNi částic (Obr. 87). Při výpalu však vznikaly v CuNi vrstvě drobné trhliny (Obr. 86), které byly způsobeny tiskem dvou částečně se překrývajících drah z CuNi inkoustu. V místě překryvu vznikla příliš velká tloušťka CuNi vrstvy, ve které došlo během výpalu ke vzniku trhlin.



Obr. 85: Čtyři vrstvy CuNi inkoustu po výpalu.



Obr. 86: SEM snímek trhlin v CuNi vrstvě.



Obr. 87: SEM snímky CuNi vrstvy (vlevo) a rozhraní CuNi vrstvy a Cu vývodů (vpravo) – 4 vrstvy inkoustu – 1: CuNi vrstva, 2: Cu vrstva (Cu vývod).

Teplotní závislost odporu vzorků byla změřena stejnou metodou popsanou v kapitole 6.2. Hodnoty odporu a TCR jsou shrnuty v Tab. 22 (průměrné hodnoty ze tří vzorků).

Tab. 22: Výsledky testování rezistorů s CuNi odporovou vrstvou.

	Vzorek	Počet CuNi vrstev	TCR (10^{-6} K^{-1})	Odpor (Ω)
IRP	2 Cu-R kontakty	4	$\pm 186,8$	1,97
	20 Cu-R kontaktů		$\pm 201,3$	2,54

Zejména kvůli relativně vysokým hodnotám teplotního součinitele odporu byla provedena prvková analýza (EDS) vypálené CuNi vrstvy pro ověření, zda obsahuje měď a nikl v poměru 50:50, jak deklaruje výrobce inkoustu. Podíl jednotlivých prvků v CuNi vrstvě je uveden v Tab. 23. Poměr mědi a niklu v dodaném inkoustu byl jiný, než udává výrobce. Z tohoto důvodu byla ve spolupráci s výrobcem inkoustu řešena úprava složení a příprava nového inkoustu s ideálním poměrem mědi a niklu 55:45 (konstantan). Upravená verze inkoustu již obsahovala přibližně požadovaný poměr mědi a niklu (Tab. 23).

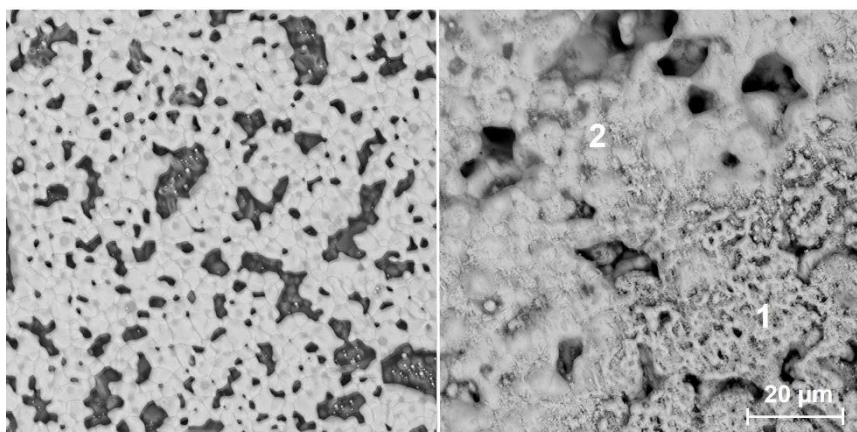
Tab. 23: Prvkové složení CuNi vrstvy.

Prvek	Původní složení inkoustu		Upravené složení inkoustu	
	At. %	Hm. %	At. %	Hm. %
Cu	70,73	77,34	56,95	58,89
Ni	29,27	22,66	43,05	41,11

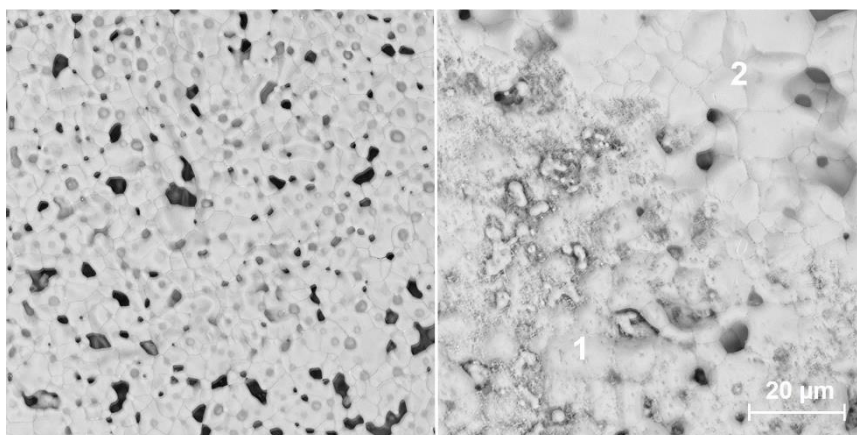
6.3.3 Realizace vzorků rezistorů – upravené složení inkoustu

Inkoust s upraveným poměrem Cu a Ni měl vyšší viskozitu. Díky vyšší viskozitě inkoustu bylo možné realizovat rezistory s jednou CuNi vrstvou, které s původním inkoustem nebyly funkční. Naopak nebylo možné realizovat rezistory s více než dvěma CuNi vrstvami vypálenými současně. Při depozici více vrstev vypálených současně byla výsledná tloušťka

CuNi vrstvy příliš vysoká a docházelo k jejímu odlupování. Rezistory s jednou CuNi vrstvou měly poměrně vysoké hodnoty odporu ($\sim 3\Omega/\square$) a proto bylo potřeba navýšit tloušťku CuNi vrstvy postupnými depozicemi a výpaly. Tímto způsobem byly vyrobeny vzorky rezistorů se šesti CuNi vrstvami (postupná depozice jedné CuNi vrstvy, výpal, depozice dvou CuNi vrstev, výpal, depozice tří CuNi vrstev a výpal). CuNi vrstva byla u obou variant vzorků dobře slinutá (Obr. 88 a Obr. 89).



Obr. 88: SEM snímky CuNi vrstvy (vlevo) a rozhraní CuNi vrstvy a Cu vývodů (vpravo) – 1 vrstva inkoustu s upraveným složením – 1: CuNi vrstva, 2: Cu vrstva (Cu vývod).



Obr. 89: SEM snímky CuNi vrstvy (vlevo) a rozhraní CuNi vrstvy a Cu vývodů (vpravo) – 6 vrstev inkoustu s upraveným složením – 1: CuNi vrstva, 2: Cu vrstva (Cu vývod).

U obou variant vzorků (1 a 6 CuNi vrstev) byla změřena teplotní závislost odporu a TCR. Teplotní závislost odporu a TCR byly změřeny i po zrychleném stárnutí suchým teplem (155 °C po dobu 1000 hodin dle normy ČSN EN 60068-2-2). Výsledky testování včetně změn hodnot odporu a TCR po zrychleném stárnutí jsou shrnuty v Tab. 24 (vždy průměrné hodnoty ze tří vzorků).

Tab. 24: Výsledky testování rezistorů s CuNi odporovou vrstvou – upravené složení inkoustu.

Vzorek	Počet CuNi vrstev	Počet výpalů	Celková tloušťka CuNi vrstvy (μm)	TCR (10^{-6} K^{-1})	Odpor (Ω)	Změna odporu po stárnutí (%)	Změna TCR po stárnutí (%)
IRP	2 Cu-R kontakty	1	~2	$\pm 101,0$	60,18	$\pm 4,31$	$\pm 5,31$
	20 Cu-R kontaktů			$\pm 102,8$	78,93	$\pm 6,03$	$\pm 9,39$
IRP	2 Cu-R kontakty	6	~10	$\pm 102,5$	20,33	$\pm 27,87$	$\pm 18,40$
	20 Cu-R kontaktů			$\pm 100,9$	24,99	$\pm 33,14$	$\pm 8,60$

Obě varianty vzorků měly přijatelné hodnoty TCR (o polovinu nižší než s původním inkoustem) a hodnoty TCR se neměnily ani s nárůstem tloušťky CuNi vrstvy ani po vícenásobném výpalu. Postupným navyšováním tloušťky CuNi vrstvy došlo ke snížení odporu o 66 % u vzorků se dvěma Cu-R kontakty ($\sim 1 \Omega/\square$). Rozdíl mezi hodnotami odporu vzorků se dvěma a dvaceti Cu-R kontakty nebyl tak výrazný jako v případě rezistorů s odporovou vrstvou natištěnou standardní odporovou pastou (kapitola 6.2.1), která byla přepálena v ochranné dusíkové atmosféře. To znamená, že při použití CuNi odporové vrstvy, která je kompatibilní s technologií TPC a umožňuje výpal v ochranné dusíkové atmosféře, není kontaktní odpor tak vysoký jako při použití standardní odporové pasty.

Po stárnutí suchým teplem došlo k výrazným změnám hodnot odporu i TCR. K takto výrazným změnám došlo z důvodu, že CuNi vrstva realizovaných vzorků nebyla zakryta. Stabilitu rezistorů lze zvýšit zakrytím krycí pastou, která by ochránila CuNi vrstvu před působením vnějších vlivů.

Realizované vzorky byly rovněž otestovány v šokové komoře (1000 cyklů v rozmezí teplot od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $125 \text{ }^\circ\text{C}$ dle normy ČSN EN 60068-2-14) a po tomto testu nedošlo k žádné delaminaci vrstev.

Provedenými experimenty bylo ověřeno, že odpory na bázi CuNi realizované kombinací sítotisku a AJ jsou funkční. Realizované rezistory mají TCR $\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a odpor $\sim 20 \Omega$ (vzorky se šesti CuNi vrstvami a dvaceti-čtvercovou odporovou strukturou, tj. $\sim 1 \Omega/\square$). Nižších hodnot odporu lze dosáhnout postupným navyšováním tloušťky CuNi vrstvy nebo realizací podčtvercových struktur.

Budoucí vývoj v této oblasti bude směřovat k vývoji vlastní CuNi pasty, díky které bude možná rychlejší a produktivnější realizace těchto rezistorů pouze sítotiskem (odpadne realizace kombinací sítotisku a AJ). Dalším krokem by mohla být realizace celých rezistorových řad a přímá integrace těchto rezistorů na TPC substráty.

Závěr

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku výkonových substrátů a zejména na výkonové substráty realizovaných technologií tlustých vrstev. V práci je shrnut současný stav poznání v této oblasti.

V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti a způsoby výroby keramických materiálů, které se používají jako nosné podložky při výrobě výkonových substrátů. Dále je zde uveden přehled používaných výkonových substrátů, jejich parametry a způsoby připojení (nanesení) vodivé vrstvy na keramickou nebo kovovou nosnou podložku. Teoretická část obsahuje i popis technologie tlustých vrstev včetně současného stavu poznání v oblasti výkonových substrátů realizovaných technologií TPC. Z rešeršní činnosti realizované v této oblasti vyplynulo, že konvenční technologie výroby výkonových substrátů neumožňují realizovat substráty s komplexními propojovacími strukturami obsahujícími například pokovené otvory, vícevrstvé struktury nebo integrované pasivní součástky. Technologie TPC ze své podstaty umožňuje realizaci substrátů obsahující výše popsané prvky, nicméně tato problematika dosud nebyla v literatuře popsána, a právě v oblasti pokročilých výkonových substrátů realizovaných technologií TPC byl prostor pro další výzkum.

Na základě rešeršní činnosti a současného stavu poznání byly stanoveny cíle disertační práce, jejichž splnění jsou věnovány experimenty v experimentální části práce.

Splnění cílů disertační práce

1. Technologie pro realizaci vícevrstevných TPC substrátů [A2].

Pro splnění tohoto cíle byl navržen vícevrstvý TPC testovací motiv obsahující horizontální i vertikální (pokovené otvory) propojovací struktury. Tento testovací motiv byl určen pro otestování fyzikálních vlastností (elektrických i mechanických) vícevrstevných TPC struktur (substrátů). Následně byl při sérii naplánovaných experimentů postupně optimalizován proces realizace vícevrstevných TPC substrátů a byly průběžně testovány dosažené vlastnosti, které byly posléze porovnány s vlastnostmi jednovrstevných substrátů. Bylo prokázáno, že elektrické parametry vícevrstevných TPC struktur jsou plně vyhovující pro realizaci propojovacích struktur řídicích obvodů přímo integrovaných na substrátech výkonových modulů. Zejména vzhledem k nižší elektrické pevnosti dielektrických vrstev v porovnání s jednovrstevnými strukturami nejsou tyto struktury určeny pro realizaci vysokonapěťových výkonových

obvodů. U vícevrstvých TPC struktur bylo v případě měděných vrstev natištěných na dielektrické vrstvě dosaženo srovnatelné adheze s adhezí měděných vrstev natištěných přímo na Al_2O_3 podložce ($\sim 20 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$). Dále byly ověřeny technologické možnosti a optimalizován proces tisku při realizaci vícevrstvých TPC struktur s cílem přetisku co největších výškových nerovností mezi jednotlivými vrstvami. Bylo dosaženo přetisku výškových nerovností o velikosti až $200 \mu\text{m}$. Řada experimentů byla věnována zefektivnění procesu realizace vícevrstvých TPC substrátů pomocí společného výpalu vrstev (měděných a dielektrických). Těmito experimenty bylo prokázáno, že jednotlivé vrstvy mohou být vypalovány společně při zachování vyhovujících elektrických i mechanických parametrů. Společný výpal vrstev umožňuje snížit ekonomické náklady i časovou náročnost výroby. Série experimentů byla věnována i realizaci vertikálních propojení (pokovených otvorů). Byl ověřen způsob realizace pokovených otvorů a bylo prokázáno, že technologií TPC lze realizovat spolehlivé a dobře elektricky i tepelně vodivé pokovené otvory skrz keramickou podložku (o průměru $300\text{-}500 \mu\text{m}$).

2. Realizace vodivých motivů vytvořených technologií TPC na podložkách z nitridu hlinitého [A1].

Pro splnění tohoto cíle disertační práce bylo realizováno několik experimentů týkající se TPC metalizace na nitridu hlinitém. První experimenty byly věnovány TPC metalizaci na preoxidovaných (termicky vytvořená tenká vrstva Al_2O_3) AlN podložkách. Tento způsob se ukázal jako nevhodný z důvodu nízké adheze TPC vrstev a vzniku mikrotrhlin ve vrstvě Al_2O_3 na AlN . Pokrok v této oblasti přineslo použití nové měděné pasty Heraeus C7403, která je určena pro TPC metalizaci jak na AlN tak na Al_2O_3 podložkách. Pomocí této pasty byly realizovány testovací motivy na obou typech podložek (AlN i Al_2O_3) a otestovány jejich elektrické parametry a adheze měděných vrstev na těchto podložkách. Na základě provedené studie bylo prokázáno, že adheze měděné pasty na AlN a Al_2O_3 podložkách je dosaženo rozdílnými adhezními mechanismy (v případě AlN pomocí Cu_2O vrstvy na povrchu a v případě Al_2O_3 pomocí skelné fáze pronikající do podložky). Navzdory rozdílným adhezním mechanismům byla adheze na obou typech podložek srovnatelná. Provedenými experimenty v této oblasti bylo prokázáno, že technologií TPC lze na AlN podložkách realizovat měděné vrstvy s dostatečnou adhezí. Kombinace předností AlN podložek a širokých

technologických možností TPC technologie umožňuje realizaci pokročilých substrátů pro aplikace s vysokým výkonovým zatížením.

3. Technologie odporových sítí s vodivým systémem z mědi vytvořeným technologií TPC [A3].

Při prvních experimentech týkající se realizace výkonových tištěných rezistorů s měděnými (TPC) vývody byla pro tisk odporové vrstvy použita standardní odporová pasta určená pro výpal v oxidační atmosféře. Realizace těchto rezistorů pak vyžaduje kombinaci výpalů v oxidační a ochranné dusíkové atmosféře (kvůli měděným vývodům). Touto metodou byly realizovány rezistory s dostatečně nízkými hodnotami teplotního součinitele odporu ($\pm 120 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), které byly stabilní i po klimatických testech. Nicméně kombinace výpalů v oxidační a ochranné dusíkové atmosféře způsobovala problémy s nárůstem odporu na rozhraní mezi odporovou vrstvou a měděnými vývody. Z tohoto důvodu bylo touto metodou obtížné realizovat nízkoohmové výkonové rezistory. Proto byla ověřena další metoda, při které byl použit odporový inkoust na bázi konstantanu. Ten umožňuje výpal přímo v ochranné dusíkové atmosféře, která je používána pro výpal měděných vrstev. Po sérii experimentů zaměřených na optimalizaci technologie tisku a složení inkoustu (poměru Cu a Ni) bylo touto metodou možné realizovat tištěné výkonové rezistory s měděnými vývody s nízkými hodnotami odporu a dostatečně nízkými hodnotami teplotního součinitele odporu ($\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Technologie dosažené v rámci této disertační práce umožní realizaci pokročilých výkonových substrátů nebo celých výkonových modulů. Tyto moduly mohou být realizovány například v tzv. sendvičovém uspořádání, ve kterém jsou výkonové součástky (čipy) umístěny zpravidla mezi dvěma TPC substráty. Použitím sendvičového uspořádání odpadne nutnost bondování výkonových čipů a bude umožněno realizovat výkonové moduly s minimální tloušťkou. Výkonové moduly realizované technologií TPC mohou kromě výkonových obvodů obsahovat i obvody řídicí, umístěné například na horní straně vrchního substrátu v sendvičové struktuře. Řídicí obvody a výkonové obvody mohou být propojeny pomocí pokovených otvorů v keramické podložce a mohou obsahovat několik vzájemně oddělených vodivých vrstev. Při realizaci těchto modulů mohou být použity i přímo integrované tištěné rezistory vyvinuté v rámci této disertační práce. Přímá integrace rezistorů zvýší celkovou spolehlivost modulů. Pro realizaci výkonových modulů pomocí technologie TPC lze využít i keramické podložky

z nitridu hlinitého, na kterých bylo v rámci této disertační práce dosaženo spolehlivého spojení s mědí. Použití podložek z nitridu hlinitého umožní realizaci modulů s vysokým výkonovým zatížením.

Kombinací známých výhod technologie TPC a jejích dalších technologických možností popsaných v této disertační práci bude tedy možné realizovat komplexní a spolehlivé výkonové moduly, které nelze realizovat pomocí zavedených konvenčních technologií.

Další výzkum v oblasti tištěných výkonových substrátů bude směřovat k realizaci výkonových modulů obsahujících horizontální a vertikální propojení, např. modulů výkonových regulátorů. Perspektivní oblastí pro další výzkum je i kontaktování výkonových čipů na substráty pomocí technologie sintrování, která umožňuje vytvoření spoje s vyšší tepelnou vodivostí, a tudíž i s lepším odvodem ztrátového tepla, které není možné dosáhnout pomocí pájení. V oblasti tištěných výkonových rezistorů kompatibilních s technologií TPC bude další vývoj směřovat k vývoji vlastní CuNi pasty a následně k realizaci diskrétních rezistorů i rezistorů přímo integrovaných na substrátech výkonových modulů.

Shrnutí

Tato disertační práce se zabývá problematikou výkonových substrátů, zejména výkonovými substráty realizovanými technologií tlustých vrstev (technologií TPC). V teoretické části práce je shrnut současný stav problematiky v oblasti výkonových substrátů. Jsou zde popsány vlastnosti a způsoby výroby keramických materiálů používaných jako nosné podložky pro výrobu výkonových substrátů. Teoretická část práce dále obsahuje přehled konvenčních výkonových substrátů, jejich výrobu a vlastnosti. Dále je zde popsána technologie tlustých vrstev, včetně jednotlivých typů past a technologie TPC, která umožňuje realizaci výkonových substrátů.

Experimentální část práce je věnována experimentům v oblasti pokročilých výkonových substrátů realizovaných technologií TPC. Jsou zde popsány experimenty týkající se realizace vícevrstevných TPC struktur obsahujících vertikální a horizontální propojení. Další experimenty byly zaměřeny na TPC metalizaci na podložkách z nitridu hlinitého. Práce dále obsahuje i experimenty týkající se tištěných výkonových rezistorů s měděnými vývody realizovanými technologií TPC.

Experimenty provedenými v této disertační práci bylo prokázáno, že technologií TPC lze realizovat vícevrstvé struktury s vyhovujícími elektrickými i mechanickými parametry, vodivé motivy s dostatečnou adhezí na podložkách z nitridu hlinitého a také plně tištěné tlustovrstvé rezistory s měděnými (TPC) vývody.

Summary

This thesis deals with problematics of power electronics substrates, especially with power electronics substrates realized by thick film technology (TPC technology). The current state of problematics in the field of power electronics substrates is summarized in the theoretical part of the thesis. Properties and manufacturing methods of ceramics materials which are used as bearing pads for power electronics substrates manufacturing are described in this part. Theoretical part also contains an overview of conventional power electronics substrates, their manufacturing and properties. Thick film technology including the type of thick film pastes and TPC technology is also described in this part of the thesis.

The experimental part of the thesis is focused on experiments in the field of advanced power electronics substrates realized by TPC technology. Experiments related to the realization of multilayer TPC structures containing vertical and horizontal interconnections are described in this part. Next experiments were focused on TPC metallization on aluminum nitride. The thesis also contains experiments deal with printed power resistors with copper terminals which are realized by TPC technology.

Experiments performed in this thesis proved that TPC technology enables the realization of multilayer structures with satisfactory electrical and mechanical parameters, conductive patterns with sufficient adhesion on aluminum nitride and also fully printed thick film resistors with copper (TPC) terminals.

Zusammenfassung

Diese Dissertationsarbeit beschäftigt sich mit der Problematik von ausführenden Substraten, besonders mit denen ausführenden Substraten, die durch die Technologie der dicken Schichten (Technologie TPC). Im theoretischen Teil der Arbeit ist der gegenwärtige Zustand der Problematik in der Breite des ausführenden Substrates zusammengefasst. Beschrieben sind hier die Eigenschaften und Arten der Herstellung von Keramischen Materialien, die man als Träger von konventionell ausführenden Substrates benutzt. Theoretischer Teil der Arbeit beinhaltet weiter ein Überblick von der Technologie der dicken Schichten, inbegriffen der einzelnen Pastentypen und der Technologie TPC, die Realisierung des ausführenden Substraten ermöglicht.

Der Experimenteller Teil der Arbeit ist gewidmet den Experimenten im Rahmen der fortschrittlicheren ausführenden mehrschichtigen TPC Strukturen, die Vertikal und Horizontal verbunden sind. Weitere Experimente waren auf TPC Metalisierung auf der Unterlage von Aluminiumnitrid fokussiert. Die Arbeit beinhaltet weiter auch Experimente betreffend gedruckten ausführenden Resistoren mit Kupferausgängen, die durch die Technologie TPC realisiert sind.

Durch die in diese Dissertationsarbeit durchgeführte Experimente wurde bewiesen, daß durch die Technologie TPC wird ermöglicht die Realisierung mehrschichtigen Strukturen mit dazu entsprechenden elektrischen und mechanischen Parameters die leitende Motive mit entsprechend genügende Adhäsion auf Unterlage von Aluminiumnitrid und auch vollgedruckten Resistoren mit Kupfer (TPC) Ausgängen.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] BARLOW, Fred D. a Aicha. ELSHABINI. *Ceramic interconnect technology handbook*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2007. ISBN 978-0-8493-3557-0.
- [2] GUPTA, Tapan K. *Handbook of Thick- and Thin-Film Hybrid Microelectronics*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-27229-9.
- [3] GIRAŠEK, Tomáš. Substráty pre výkonovú elektroniku [online]. 2015, **8**(8) [vid. 2019-02-13]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=18118&output=pdf>
- [4] KUROMITSU, Yoshirou, Hideaki YOSHIDA, Hiromichi TAKEBE a Kenji MORINAGA. Interaction between Alumina and Binary Glasses. *J. Am. Ceramic. Soc* [online]. 1997, **80**(6), 1583–87. ISSN 0002-7820. Dostupné z: doi:10.1111/j.1151-2916.1997.tb03020.x
- [5] ELCERAM A.S. *Technologie bílých substrátů* [online]. [vid. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-bilych-substratu.html>
- [6] HARPER, Charles A. *High performance printed circuit boards*. New York: McGraw Hill, 2000. ISBN 0-07-0267-13-8.
- [7] MATNET. *Nitrid hliníka (AlN)* [online]. [vid. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=235>
- [8] SERGENT, Jerry E. a Charles A. HARPER. *Hybrid microelectronics handbook*. New York: McGraw-Hill, 1995. ISBN 0-07-026691-3.
- [9] MATNET. *Nitrid kremíka (Si3N4)* [online]. [vid. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=166>
- [10] AMERICAN BERYLLIA. *Beryllium Oxide* [online]. [vid. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://www.americanberyllia.com/beryllium-oxide#thermal>
- [11] MATNET. *Karbid kremíka (SiC)* [online]. [vid. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=239>
- [12] PECHT, Michael. *Handbook of electronic package design*. New York: CRC Press, 1991. ISBN 0-8247-7921-5.
- [13] HE, Hong, Renli FU, Deliu WANG, Xiufeng SONG a Min JING. A new method for preparation of direct bonding copper substrate on Al₂O₃. *Materials Letters* [online]. 2007, **61**(19–20), 4131–4133. ISSN 0167-577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2007.01.036
- [14] HOPKINS, Douglas C. *Excerpt - Direct Bonded Copper* [online]. 2003 [vid. 2019-02-

- 25]. Dostupné z: http://www.dchopkins.com/professional/open_seminars/DirectBondedCopper.pdf
- [15] LIU, Yong. *Power electronic packaging: design, assembly process, reliability and modeling*. New York: Springer, 2012. ISBN 978-1-4614-1052-2.
- [16] SCHULZ-HARDER, Jürgen. Advantages and new development of direct bonded copper substrates. *Microelectronics Reliability* [online]. 2003, **43**(3), 359–365. ISSN 0026-2714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(02)00343-8
- [17] DUPONT, Laurent, Zoubir KHATIR, Stéphane LEFEBVRE a Serge BONTEMPS. Effects of metallization thickness of ceramic substrates on the reliability of power assemblies under high temperature cycling. *Microelectronics Reliability* [online]. 2006, **46**(9–11), 1766–1771. ISSN 0026-2714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2006.07.057
- [18] HAMILTON, Dean, Liam MILLS, James BOWE, Michael JENNINGS a Philip MAWBY. High temperature reliability of power module substrates. *Proceeding of PCIM Europe 2015* [online]. 2015, 19–21. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7149166>
- [19] ROGERS CORPORATION. *Active Metal Brazing* [online]. [vid. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.rogerscorp.com/pes/technology/1/active-metal-brazing.aspx>
- [20] WALKER, C. A. a V. C. HODGES. Comparing metal-ceramic brazing method. *Welding Journal* [online]. 2008, **87**(10), 43–50. Dostupné z: https://app.aws.org/bsmc/wj200810_43.pdf
- [21] MIRIC, Anton a Peter DIETRICH. *Inorganic Substrates for Power Electronics Applications* [online]. nedatováno [vid. 2019-03-03]. Dostupné z: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/metal_ceramic_substrates_documents/Inorganic_Substrates_for_Power_Electronics_2015-3_AMiric-PDietrich_V8.pdf
- [22] TSAI, Mingyi, Pushan HUANG, C.H. LIN, C.T. WU a Sungcheng HU. Mechanical design and analysis of direct-plated-copper aluminum nitride substrates for enhancing thermal reliability. *Microelectronics Reliability* [online]. 2015, **55**(12), 2589–2595. ISSN 0026-2714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2015.08.010
- [23] RU, Heinz, Vincent WEI, Thompson JIANG a Mike CHIU. Direct plated copper technology for high brightness LED packaging. *Proceedings of Technical Papers - International Microsystems, Packaging, Assembly, and Circuits Technology*

- Conference, IMPACT* [online]. 2011, 311–314. ISSN 21505934. Dostupné z: doi:10.1109/IMPACT.2011.6117219
- [24] DOWA METALTECH CO., Ltd. *Metal Substrates* [online]. [vid. 2019-02-13]. Dostupné z: http://www.dowa.co.jp/metaltech/en/products_m_substrates.html
- [25] LIN, Hsuan-Tien, Andrew A. WERESZCZAK, Michael L. SANTELLA a Gopalan MURALIDHARAN. *Low-Cost Direct Bonded Aluminum (DBA) Substrates* [online]. 2011 [vid. 2019-03-18]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f11/pm036_lin_2011_p.pdf
- [26] KUROMITSU, Yoshirou, Yoshiyuki NAGATOMO, Hiroshi TONOMURA a Kazuhiro AKIYAMA. Direct bonded aluminum on aluminum nitride substrates via a transient liquid phase and its application. *2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*. 2010, 1–5.
- [27] LINDEMANN, Andreas a Gerhard STRAUCH. Properties of direct aluminium bonded substrates for power semiconductor components. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2007, s. 384–391. ISSN 1941-0107. Dostupné z: doi:10.1109/TPEL.2006.889898
- [28] GUANGYIN LEI, Thomas., Jesus N. CALATA, Khai D.T. NGO a GUO-QUAN LU. Effects of Large-Temperature Cycling Range on Direct Bond Aluminum Substrate. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* [online]. 2009, 9(4), 563–568. ISSN 1530-4388. Dostupné z: doi:10.1109/TDMR.2009.2033668
- [29] MATWEB. *Aluminum 5052-H32* [online]. [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028
- [30] ASM MATERIAL DATA SHEET. *Aluminum 6061-T6* [online]. [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>
- [31] WÜRTH ELEKTRONIK. *Insulated Metal Substrate (IMS)* [online]. [vid. 2019-03-13]. Dostupné z: https://www.we-online.com/web/en/leiterplatten/produkte_/waermemangement/ims/ims.php
- [32] NCAB GROUP. *Insulated Metal Substrate* [online]. nedatováno [vid. 2019-03-13]. Dostupné z: https://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2015/10/07-NCAB_Group_Seminars_IMS_2_0_150930.pdf
- [33] TECHNOBOARDS KRONACH. *IMS (Insulated Metal Substrate)* [online]. [vid. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.technoboards-kc.com/en/products-services/techno>

- logies/ims-insulated-metal-substrate.html
- [34] IDC TECHNOLOGIES. *Thick film technology* [online]. nedatováno [vid. 2019-04-11]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Thick_film_technology.pdf
- [35] IPCI. *Thick Film Materials and the Firing Process* [online]. [vid. 2019-04-11]. Dostupné z: http://81.161.252.57/ipci/courses/thickfilm/index_25.htm
- [36] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice : pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [37] PRUDENZIATI, Maria a Jacob HORMADALY. *Printed films*. 1st vyd. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-1-84569-988-8.
- [38] BLANK, Thomas, Benjamin LEYRER, T. MAURER, M. MEISSER, M. BRUNS a Marc WEBER. Copper thick-film substrates for power electronic applications. *Proceedings of the 5th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2014* [online]. 2014, 4–9. Dostupné z: doi:10.1109/ESTC.2014.6962860
- [39] REBOUN, Jan, Karel HROMADKA, Vojtech HERMANŠKY a Jan JOHAN. Properties of power electronic substrates based on thick printed copper technology. *Microelectronic Engineering* [online]. 2017, **167**, 58–62. ISSN 0167-9317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2016.10.019
- [40] HERAEUS ELECTRONICS. *Heraeus Thick Copper Conductor Pastes* [online]. nedatováno [vid. 2019-04-27]. Dostupné z: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/Brochure_Heraeus_Thick_Copper_Conductor_Pastes.pdf
- [41] HROMADKA, Karel. *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [42] ROTMAN, F., David NAVARRO a S. MELLUL. Optimised Nitrogen-based Atmospheres for Copper Thick Film Manufacture: Part 1: Monitoring of Oxygen Doping in Nitrogen. *Microelectronics International: An International Journal* [online]. 1991, **8**(2), 5–15. ISSN 1356-5362. Dostupné z: doi:10.1108/eb044442
- [43] MELLUL, S., David NAVARRO a F. ROTMAN. Optimised Nitrogen-based Atmospheres for Copper Thick Film Manufacture : Part 2: A Comparison of the Effects of Different Gaseous Dopants. *Microelectronics International: An International Journal* [online]. 1992, **9**(1), 14–20. ISSN 1356-5362. Dostupné z: doi:10.1108/eb044464

-
- [44] GUNDEL, Paul, Torsten NOWAK, Melanie BAWOHL, Mark CHALLINGSWORTH, Christoph CZWICKLA, Virginia GARCIA, Ilias NIKOLAIDIS, Christina MODES, Ryan PERSONS, Jessica REITZ a Caitlin SHAHBAZI. Thermal Performance and Reliability of Copper Thick Film Substrates. *International Conference on Integrated Power Electronics Systems*. 2016, 1–6.
- [45] *Thermal Conductivity and the Wiedemann-Franz Law* [online]. [vid. 2019-11-27]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/thercond.html>
- [46] HERAEUS PRECIOUS METALS. Thick print copper pastes for aluminum nitride substrates [online]. 2014. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20140363681>
- [47] VYVOJ.HW.CZ. *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. [vid. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [48] OPTOMECH INC. *3D Printed Electronics - Aerosol Jet Technology* [online]. [vid. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://optomech.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>

Seznam publikací a výstupů studenta vztahující se k předmětu disertační práce

Publikace v časopisech s impakt faktorem

- [A1] ŘEBOUN, J., HLÍNA, J., TOTZAUER, P., HAMÁČEK, A. Effect of copper- and silver-based films on alumina substrate electrical properties. *Ceramics International*, 2018, roč. 44, č. 3, s. 3497-3500. ISSN: 0272-8842. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.107.
- [A2] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HEŘMANSKÝ, V., ŠIMONOVSKÝ, M., JOHAN, J., HAMÁČEK, A. Study of co-fired multilayer structures based on Thick Printed Copper technology. *Materials Letters*, 2019, roč. 238, č. 1, s. 313-316. ISSN 0167-577x. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.12.040.
- [A3] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., JOHAN, J., ŠIMONOVSKÝ, M., HAMÁČEK, A. Reliability of printed power resistor with thick-film copper terminals. *Microelectronic Engineering*, 2019, roč. 216, s. 1-8. ISSN 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2019.111095.
- [A4] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Study of copper thick film metallization on aluminum nitride. *Scripta Materialia*, 2020, roč. 176, s. 23-27. ISSN 1359-6462. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.09.029.

Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [A5] HLÍNA, J., HROMADKA, K., ŘEBOUN, J., HIRMAN, M., HAMÁČEK, A. Adhesion improvement of thick printed copper film on alumina substrates by controlling of oxygen level in furnace. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016, s. 22-26. ISBN 978-1-5090-1389-0.
- [A6] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HIRMAN, M., HAMÁČEK, A. Comparison of copper and silver thick film on alumina substrates properties. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017, s. 1-5. ISBN 978-1-5386-0582-0.
- [A7] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., JOHAN, J., ŠTĚPÁN, L., HAMÁČEK, A. Thick film power resistor with thick printed copper terminals. *PCNS Passive Components Networking Days Proceedings*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017, s. 137-141. ISBN 978-80-905768-8-9.
- [A8] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Multilayer thick printed copper structures. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018)*. Piscataway: IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-1-5386-5732-4.

- [A9] ŘEBOUN, J., HLÍNA, J., SOUKUP, R., JOHAN, J. Printed thick copper films for power applications. *7th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC 2018): proceedings*. Piscataway: IEEE, 2018, s. 1-5. ISBN 978-1-5386-6813-9.
- [A10] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Properties of Thick Printed Copper films on alumina substrates. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2019)*. Piscataway: IEEE, 2019, s. 1-5. ISBN 978-1-72811-874-1.
- [A11] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., JOHAN, J., HAMÁČEK, A. Advanced application capabilities of thick printed copper technology. *Proceedings of the 22nd Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2019)*. Pavia: IMAPS Italian Chapter, 2019, s. 1-5. ISBN 978-0-9568086-5-3.

Publikace ve sbornících doktorandských konferencí

- [A12] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Adheze a pájitelnost TPC substrátů v závislosti na koncentraci kyslíku ve vypalovacím procesu. *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016, s. 27-30. ISBN 978-80-261-0516-9.
- [A13] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Vlastnosti měděných a stříbrných tlustých vrstev na keramických substrátech. *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, s. 15-18. ISBN 978-80-261-0712-5.
- [A14] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Vlastnosti vícevrstevných TPC struktur. *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018, s. 29-32. ISBN 978-80-261-0785-9.

Funkční vzorky

- [A15] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., HLÍNA, J., JOHAN, J., HEŘMANSKÝ, V., FIALA, R., ŠIMONOVSKÝ, M., ŠTĚPÁN, L. *Výkonový modul s chladičem*. 2016.
- [A16] ŘEBOUN, J., HLÍNA, J., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., JOHAN, J., ŠTĚPÁN, L., ŠIMONOVSKÝ, M. *Modul výkonového regulátoru pro 3f bezkartáčové ss motory s horizontálním a vertikálním propojením realizovaný technologií TPC*. 2018.
- [A17] ŘEBOUN, J., HLÍNA, J., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., JOHAN, J., ŠTĚPÁN, L., ŠIMONOVSKÝ, M. *Obvod s odporovou sítí s Cu kontakty a dielektrickou ochrannou vrstvou kompatibilní s technologií TPC*. 2019.

Ověřené technologie

- [A18] ŘEBOUN, J., JOHAN, J., HEŘMANSKÝ, V., ŠIMONOVSKÝ, M., ŠTĚPÁN, L., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., **HLÍNA, J.** *Výroba CPV přijímačů*. 2017.
- [A19] ŘEBOUN, J., JOHAN, J., HEŘMANSKÝ, V., ŠIMONOVSKÝ, M., ŠTĚPÁN, L., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., **HLÍNA, J.** *Odporové sítě s vodivými drahami z TPC a povrchovou ochranou dielektrika vypalovaného v dusíkové atmosféře*. 2019.

Užitné vzory

- [A20] ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A., **HLÍNA, J.**, SOUKUP, R., JOHAN, J., ŠTĚPÁN, L., ŠIMONOVSKÝ, M., HEŘMANSKÝ, V. *Výkonový elektronický modul s integrovaným senzorem teploty*. Praha, 2019.

Ostatní publikace a výstupy studenta**Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí**

- [B1] ŘEBOUN, J., PRETL, S., NAVRÁTIL, J., **HLÍNA, J.** Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016, s. 184-188. ISBN 978-1-5090-1389-0.

Publikace ve sbornících doktorandských konferencí

- [B2] **HLÍNA, J.** Měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru. *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 153-156. ISBN 978-80-261-0514-5.