

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Karel Hromadka

**Substráty pro výkonové aplikace v
elektrotechnice**

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

Datum státní doktorské zkoušky: 12. listopadu 2013

Datum odevzdání práce: 31. srpna 2015

V Plzni, 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne 31. 8. 2015

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat především svému školiteli doc. Ing. Aleši Hamáčkovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování a v neposlední řadě za přátelský přístup při mentorování mé osoby po celou dobu mého doktorského studia. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. a Ing. Janu Johanovi za odbornou pomoc při vypracování této práce.

Mé poděkování patří i všem kolegům z Katedry technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni. Spolupráce s nimi mi dovolila růst jak po odborné, tak i po lidské stránce.

Tato disertační práce vznikla s podporou projektu LF14029 „ASES – Chytrý solární alternativní zdroj elektrické energie o vysoké účinnosti“, a Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Anotace

Disertační práce se zabývá novými technologiemi pro výrobu substrátů, které jsou vhodné pro výkonové aplikace. Je zde porovnávána zejména technologie tlustých vrstev a technologie přímého spojování mědi s keramikou. Práce obsahuje metodiku testování, která byla navržena pro ověření substrátů, které se používají ve výkonových aplikacích. Výkonové substráty byly touto metodikou otestovány a výsledky těchto experimentů jsou obsaženy v hlavní části práce.

Klíčová slova

Keramika, měď, DBC, tlustá vrstva, substrát.

Annotation

This paper mainly deals with the manufacturing technologies of substrates that are used in high power applications. The thick film technology and direct bonded copper technology are compared and described in detail. This paper includes also testing methodology that was designed to test substrates for power applications. Power electronic substrates were tested by this methodology and results of these experiments are included in the main part of this work.

Keywords

Ceramic, copper, DBC, thick film, substrate.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Úvod	11
1 Současný stav problematiky	12
1.1 Substráty pro výkonové aplikace	12
1.1.1 Organické a kompozitní substráty	13
1.1.2 Keramické substráty	14
1.1.3 Kovové substráty	17
1.2 Technologie spojení keramika – kov	17
1.2.1 Chemicko – galvanické pokovení keramického materiálu	18
1.2.2 Spojení kovu s keramickým materiálem prostřednictvím mezivrstvy	18
1.2.3 Přímé spojení keramika – kov	18
1.2.4 Spojení keramického materiálu s kovem prostřednictvím organometalické pasty ..	19
1.2.5 Technologie tlustých vrstev pro vytváření vodivé vrstvy na keramickém substrátu	20
2 Cíle disertační práce	21
3 Vodivé sítě z mědi na korundu vytvářené technologií přímého spojení mědi s keramikou	22
3.1 Výroba substrátu keramika – měď technologií DBC	24
3.2 Úprava měděného povrchu korundového substrátu pokoveného technologií DBC	27
4 Vodivé sítě z mědi na korundu vytvářené technologií tlustých vrstev	29
4.1 Pasty na bázi mědi	29
4.1.1 Měď	30
4.1.2 Oxid měďný Cu_2O	30
4.1.3 Oxid měďnatý CuO	31
4.1.4 Nitrid mědi	31
4.2 Charakteristika past pro sítotisk	31
4.3 Realizace tiskového procesu	32
4.4 Výpal	33

4.4.1	Vypalování v plynotěsné retortě	33
4.4.2	Vypalování ve vakuové peci	37
5	Metodika testování	39
6	Testování vzorků	46
6.1	Metalografické výbrusy a snímky povrchu vzorků	46
6.1.1	Výpaly v plynotěsné retortě	46
6.1.2	Výpaly ve vakuové peci	49
6.1.3	Výpal v průběžné peci Heraeus.....	50
6.2	Elektronová mikroskopie.....	51
6.3	Strukturální termická analýza měděné pasty	60
6.4	Tloušťka měděné vrstvy před výpalem a po výpalu.....	61
6.5	Hustota vypálené měděné vrstvy	62
6.6	Měrný elektrický odpor vypálené měděné vrstvy	63
6.7	Měrná tepelná kapacita vypálené měděné vrstvy	64
6.8	Tepelná vodivost vypálené měděné vrstvy.....	65
6.9	Přestup tepla korundového substrátu s tlustou vrstvou mědi.....	65
6.9.1	Přestup tepla na motivech ve tvaru proužku	65
6.9.2	Simulace přestupu tepla na čtvercových motivech	68
6.9.3	Porovnání přestupu tepla na čtvercových motivech.....	70
6.10	Měření adheze spojení korund - měď	78
6.10.1	Zkouška tahem	78
6.10.2	Zkouška odlupováním	80
6.11	Pájitelnost vodivých vrstev.....	81
6.11.1	Zkouška ponořením do pájky	81
6.11.2	Zkouška roztékavosti pájky.....	82
7	Optimální proces výroby výkonových substrátů	84
7.1	Optimální proces výroby výkonových substrátů v retortě.....	84
7.2	Optimální proces výroby výkonových substrátů ve vakuové peci	86

7.3 Finalizace povrchu výkonových substrátů.....	87
7.3.1 Povrchová úprava dvojrstvou ENIG	87
7.3.2 Tištěná vrstva Ag – Pd	90
8 Praktické využití substrátů pro výkonové aplikace	91
8.1 Výkonové LED moduly.....	91
8.2 Výkonové moduly pro koncentrovanou fotovoltaiku.....	92
8.3 Výkonové inteligentní moduly	94
8.4 Zavedení technologie ve společnosti ELCERAM.....	94
9 Závěr.....	95
Splnění cílů disertační práce.....	97
10 Literatura	98
Seznam publikací autora	104
Přílohy	I

Seznam použitých zkratk a symbolů

ASES	Mezinárodní projekt v programu EUREKA s názvem „Chytrý solární alternativní zdroj elektrické energie o vysoké účinnosti“
BSE	Back – scattered electron detector – Zobrazení povrchu vzorku zpětně odraženými elektrony
BT	Bismaleimide – Triazine
CPV	Concentrated photovoltaics – fotovoltaika s optickým koncentrátorem
DBC	Direct bonded copper – přímé spojování mědi s keramikou
DPS	Deska plošného spoje
DRAM	Dynamic random access memory – druh počítačové paměti
EDS	Energo Disperzní Spektrometrie; Energo Disperzní Spektrometr
ENIG	Electroless nickel immersion gold – dvojvrstva niklu a zlata používaná jako ochranná vrstva před vlivem prostředí u desek plošných spojů
FR4	Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí
HTCC	High temperature cofired ceramic – spojené vrstvy keramiky vypalované společně při vysokých teplotách
IMS	Insulated Metal Substrate – izolovaný kovový substrát
LED	Light – Emitting Diode – dioda emitující světlo
LTCC	Low temperature cofired ceramic – spojené zpravidla pokovené vrstvy keramiky vypalované společně při nízkých teplotách
PTFE	Polytetrafluorethylen
RP	Relativní poměr fází v eutektiku (%)
SEM	Scanning Electron Microscopy – Rastrovací elektronový mikroskop
TPC	Thick printed copper – tištěná tlustá vrstva mědi
C_p	Tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
CL	Množství pevné fáze při zvolené teplotě (at. %)
CS	Obsahu kyslíku v mědi při zvolené teplotě (at. %)
E_p	Dielektrická pevnost ($V \cdot m^{-1}$)
L	Teplota tání ($^{\circ}C$)

l	Délka vodivé dráhy (m)
LS	Obsahu kyslíku v mědi při zvolené teplotě (at. %)
L_c	Konstanta označovaná jako Lorentzovo číslo ($W \cdot \Omega \cdot K^{-2}$)
R	Změřený odpor vodivé dráhy (Ω)
RP	Relativní podíl fází (%)
S	Průměrný průřez vodivé dráhy změřený mikroskopem (m^2)
α	Teplotní roztažnost (K^{-1})
δ	Hustota ($kg \cdot m^{-3}$)
ϵ_r	Relativní permitivita (-)
λ	Tepelná vodivost ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
ρ	Rezistivita ($\Omega \cdot m$)
σ	Měrná elektrická vodivost ($S \cdot m^{-1}$)

Úvod

Mezi nejčastěji používané substráty v elektrotechnice patří lamináty ze skelných tkanin, které jsou syceny epoxidovými pryskyřicemi. Tyto materiály, označované jako FR4, jsou plátovány tenkou vrstvou mědi, jejíž tloušťka se pohybuje nejčastěji v řádu několika desítek mikrometrů. Lamináty ze skelných tkanin se často používají i pro konstrukci výkonových modulů.

Současným trendem v oblasti výkonových modulů je jejich miniaturizace, která však přináší mimo jiné problémy s odvodem tepla. Klasické sklo – epoxidové lamináty svými vlastnostmi v této oblasti použití již nevyhovují. Pro aplikace, kde je požadována vysoká spolehlivost, dobré mechanické vlastnosti a všude, kde se pracuje s vysokými výkony, se často používají keramické substráty nebo substráty s kovovým jádrem. Tyto substráty nacházejí uplatnění například ve výkonových aplikacích pro trakci, osvětlovací techniku, solární články nebo v automobilovém průmyslu. Keramické substráty mají vodivé motivy vytvářené nejčastěji technologií tlustých vrstev s tloušťkou vrstev maximálně v řádu desítek mikrometrů nebo technologií technologie přímého spojování keramiky s mědí (DBC) s tloušťkou vrstev v řádu stovek mikrometrů.

V poslední době se do popředí zájmu dostává nová technologie tlustých vrstev, která umožňuje vytvářet tloušťky vodivých vrstev v řádu až stovek mikrometrů podobně jako u technologie DBC. To je výhodné pro zajištění přenosu velkých proudů a lepší distribuci tepla z výkonových součástek. Aktuálnost této problematiky je možné ilustrovat velkým zájmem světových výrobců past, jako například Heraeus nebo ESL ElectroScience, o tuto oblast.

Předložená práce se problematice substrátů pro výkonové aplikace věnuje z pohledu používaných technologií a diagnostiky parametrů substrátů, které jsou touto technologií vyrobeny. V první části práce je popsán současný stav problematiky výkonových substrátů, zdůrazněny jsou hlavní požadavky, které jsou kladeny na tyto substráty a uvedeny jsou základní technologické postupy pro jejich výrobu. Kapitoly 3 a 4 se věnují praktické realizaci výkonových substrátů technologií DBC a technologií tlustých vrstev. Kapitoly 5 a 6 obsahují návrh metodiky testování výkonových substrátů a několik nejdůležitějších výsledků těchto testů. V Kapitole 7 je uveden optimální proces výroby těchto substrátů, které jsou vypalovány v plynotěsné retortě a vakuové peci. Kapitola 8 obsahuje praktické využití substrátů. V 9. kapitole jsou shrnuty výsledky celé práce.

1 Současný stav problematiky

V současné době je výkonová elektronika používána ve velkém množství aplikací v oblasti spotřební elektroniky, zařízeních pro domácnost, napájecích zdrojů, řízení výkonu spotřebičů i v oblasti přenosu a distribuce elektrické energie. Hlavními trendy v oblasti elektroniky jsou miniaturizace, snižování hmotnosti, zlepšování spolehlivosti a především neustálá snaha o snižování výrobních nákladů. Stejná tendence je možné sledovat i ve výkonové elektronice. Miniaturizace obvodů a součástek s sebou přináší celou řadu problémů. Jedním z nich je odvod tepla zahříváných součástek, a je tedy nutné hledat optimální možnosti chlazení. [1][2]

Největší rozvoj v oblasti výkonových aplikací je možné sledovat zejména v součástkové základně, především v polovodičových součástkách. Mezi součástky pro výkonové aplikace lze zařadit například výkonové diody, měniče, tranzistory, tyristory nebo čipy pro fotovoltaiku s optickým koncentrátorem (CPV).

Masově rozšířené začínají být v poslední době osvětlovací systémy složené z výkonových LED. Vzhledem k výkonovým ztrátám na těchto součástkách dochází k jejich mnohdy nadměrnému zahřívání. Aby nedošlo k jejich zničení, je nezbytné zajistit efektivní odvod tepla. Výrobci přecházejí z plastových čoček a pouzder na skleněné čočky a keramická pouzdra především kvůli lepšímu odvodu tepla ze součástky. Z keramického pouzdra je poté nezbytné odvádět ztrátové teplo a zabezpečit tak dostatečné chlazení LED. Vhodným řešením je volba substrátů s dobrým odvodem tepla, jako jsou například substráty keramické nebo kovové. [1][3][4] Tyto substráty najdou také uplatnění v oblasti výroby elektrické energie ze slunečního záření například ve formě CPV modulů. U CPV modulů dochází ke koncentrování slunečního záření na velmi malou plochu, což klade zvýšené nároky na odvod tepla z čipu a také na následné aktivní nebo pasivní chlazení.

1.1 Substráty pro výkonové aplikace

Výkonové aplikace kladou na použité substráty množství požadavků. Mezi nejdůležitější z nich patří zejména tepelná vodivost, teplotní odolnost, chemická odolnost, elektrická rezistivita, mechanické vlastnosti a dielektrická pevnost. Aby byl substrát konkurence schopný, je také důležité držet nízké výrobní náklady.

Tepelná vodivost udává množství tepla, které přejde z jedné části látky do druhé. Přestup tepla je zprostředkován pohybem volných nosičů náboje a prostřednictvím kmitů mřížky. [5]

Tento parametr je velmi důležitý v oblasti výkonových aplikací. Vysoká tepelná vodivost substrátu umožňuje lépe odvádět ztrátové teplo ze součástek a tím prodlužuje jejich životnost, zvyšuje spolehlivost celého systému a umožňuje miniaturizaci elektronických zařízení. U nekovových materiálů je tepelná vodivost omezena nedostatečným množstvím volných nosičů náboje.

U výkonových aplikací dochází často k velkým teplotním změnám. Je proto nezbytné, aby substráty pro výkonové aplikace měly dostatečnou teplotní odolnost, která umožní spolehlivý provoz celého systému. Substráty by také měly být schopny odolat vysokým teplotám v závislosti na jejich použití a na dalších technologických operacích vyžadující vysoké teploty jako je například pájení. [5][6]

Dále je také důležité, aby byl substrát dostatečně chemicky odolný a nepodléhal tak změnám působením rozpouštědel, tavidel a jiných chemických vlivů při procesu výroby i následnému provozu. [5]

Abyste bylo možné vytvářet vodivé motivy na substrátu, je nezbytné, aby měl substrát vysokou elektrickou rezistivitu. Pro zajištění vysoké elektrické rezistivity v široké škále klimatických podmínek je důležité, aby nasákavost substrátu byla nízká. [5][7]

Dielektrická pevnost vyjadřuje odolnost materiálů vůči namáhání elektrickým polem a udává velikost průrazného napětí v závislosti na tloušťce dielektrika. U výkonových aplikací, které pracují s vysokým napětím, je hodnota dielektrické pevnosti jedním z klíčových parametrů.

Mechanické vlastnosti určují oblasti použití výkonových substrátů. Klíčové parametry jsou především mez pevnosti v ohybu a rozměrová stabilita.

Mezi nejdůležitější parametry výkonových substrátů patří v neposlední řadě také výrobní náklady, které ovlivňují cenu konečného produktu. [1]

Nejrozšířenějším substrátem v elektronice je sklo – epoxidový laminát označovaný jako FR4. Tento substrát však není možné použít vždy a pro některé aplikace, především výkonové, je tedy nutné hledat jiná řešení.

Stručný přehled dostupných substrátů je uveden v následujících podkapitolách. [8][5]

1.1.1 Organické a kompozitní substráty

Neohebné desky plošných spojů (DPS) se skládají nejčastěji z organické pryskyřice (termosetu) a výztuže. Pro ohebné DPS je jako pojivo použito termoplast. Výztuž určuje mechanické vlastnosti substrátu a mezi nejrozšířenější patří skleněná, křemenná a uhlíková

vlákna nebo tvrzený papír. Jako pojivo je použita např. epoxidová, polyesterová, BT nebo polyimidová pryskyřice. Mezi používané termoplasty pro výrobu ohebných DPS je možné zařadit například polyimid (označovaný jako Kapton) nebo PTFE.

Vzhledem nízké tepelné vodivosti má použití těchto substrátů pro výkonové aplikace svá omezení. Tepelná vodivost sklo – epoxidového substrátu FR4 je cca $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [8][9] Zlepšení tepelné vodivosti substrátu je možné dosáhnout například použitím tepelných mostů. Tepelnou vodivost kompozitních substrátů je také možné částečně zvýšit přidáním keramického nebo křemičitého prášku.

1.1.2 Keramické substráty

Keramické materiály existují převážně jako oxidy, nitridy, karbidy a silicidy. Vyznačují se vysokou žáruvzdorností. Relativně nízká je naproti tomu odolnost vůči náhlým změnám teplot. Keramika je velmi chemicky i teplotně stabilní. Teplota tání se u těchto materiálů pohybuje v řádu tisíců stupňů Celsia. Teplota tání korundové keramiky je cca $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, keramiky z nitridu boru až cca $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. Keramické materiály jsou v naprosté většině elektrickými izolanty, i když mohou existovat materiály s polovodivými vlastnostmi. Dielektrická pevnost se pohybuje od $10 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$ do $40 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$. [10] Oproti ostatním izolantům se keramika vyznačuje výbornou tepelnou vodivostí, kterou je možné srovnat i s některými kovy. Tepelná vodivost korundové keramiky je v řádu desítek $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a u některých keramických materiálů je dokonce i vyšší než $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro srovnání měď, jako jeden z nejlepších tepelných vodičů, má tepelnou vodivost $395 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Teplotní vodivost železa je $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. [5]

Obecně jsou keramické materiály tvrdé a relativně křehké. Mají menší pevnost v ohybu a v tahu než v tlaku. [10]

Pod pojem keramika jsou obecně řazeny látky vyrobené tzv. keramickou technologií. Proces výroby obsahuje míchání semletých surovin, přípravu vhodného tvaru a vypálení na slinovací teplotu. Vzniklá keramická látka je zvláštním případem polykrystalických látek. Struktura keramiky obsahuje zpravidla krystalickou a skelnou fázi, přičemž u většiny keramik tvoří skelná fáze pouhý zlomek hmotnosti. Keramické substráty je možné vyrábět např. litím, lisováním nebo tažením. [5][10][11][12]

Nejrozšířenější keramické materiály

Mezi nejvíce rozšířené keramické materiály používané v elektronických aplikacích patří oxid hliníku (Al_2O_3), který je označován jako korundová keramika, oxid beryllia (BeO) nebo zirkonu (ZrO_2), nitrid hliníku (AlN), bóru (BN) nebo křemíku (Si_3N_4) a karbid křemíku (SiC). [5][13]

K těmto materiálům bývá někdy řazen také diamant, který má vybrané vlastnosti podobné jako výše uvedené materiály. Keramika z oxidu beryllia se vyznačuje výbornou tepelnou vodivostí, ale kvůli toxicitě se v současnosti téměř nepoužívá. Tato keramika může být nahrazena keramikou na bázi nitridu hlinitého, která má podobné vlastnosti, ale není toxická. [5][13] Porovnání vybraných keramických materiálů je uvedeno v tab. 1.

Mezi perspektivní keramické materiály patří LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic), což jsou zpravidla pokovené vrstvy keramiky vypalované společně při nízkých teplotách (např. kolem $850\text{ }^\circ\text{C}$). Složení keramické hmoty se liší podle výrobce a účelu použití. Může být složena např. ze 40 % Al_2O_3 , ze 45 % SiO_2 a 15 % představuje organická složka. [12] Výhodou LTCC keramiky je nízká vypalovací teplota a možnost vytvářet vícevrstvé substráty s využitím běžné technologie tlustých vrstev (sítotisku). Pro výrobu elektronických obvodů je používána kromě LTCC keramiky také keramika HTCC, která se od LTCC odlišuje mimo jiné vysokou teplotou vypalování. [12] Technologie LTCC a HTCC může být využita pro výrobu planárních součástek, cívek, kondenzátorů, v aplikacích, kde jsou vysoké teploty (až $1200\text{ }^\circ\text{C}$ u HTCC keramiky) a vysoká vlhkost, v oblasti mikrovlnné techniky, rádiové techniky nebo u lambda sond do automobilů. [14][15]

Tab. 1 Porovnání vlastností vybraných keramických materiálů [10][16][17]

	Al_2O_3		AlN	ZrO_2
	96%	99,5%		
Barva	bílá	bílá	šedá	bílá
Hustota δ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3,72	3,85	3,30	6,40
Tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	22,3	29,5	160 až 190	2,4
Teplotní roztažnost α ($10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$)	8,0	8,2	4,6	10
Dielektrická pevnost E_p ($\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$)	14	18	14	-
Relativní permitivita ϵ_r při 1 MHz (-)	9,5	9,8	8,7	29
Rezistivita ρ ($\Omega\cdot\text{m}$)	$>10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^8$	10^{11}
Pevnost v ohybu ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	350	500	450	-

Existují také speciální typy keramických materiálů, které jsou unikátní v některé ze svých vlastností. Příklad takových materiálů a jejich použití je uveden v tab. 2. [18]

Tab. 2 Speciální keramické materiály [7]

Materiál	Použití
$\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$	Rezistory vytvářené technologií tlustých vrstev
$(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$	Paměti typu DRAM
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Nahrávací pásy
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Permanentní magnety u reproduktorů
Dopovaný SiO_2	Optická vlákna
Dopovaný ZrSiO_4	Keramické barvy
Diamant	Obráběcí nástroje

Výroba keramických substrátů

Kvůli vysoké teplotě tání je velmi obtížné vyrobit substrát ze 100% keramiky. Proto je surová keramika obvykle míchána s tavidly a pojivovými skly. Tyto přídatné látky se vyznačují nižší teplotou tání, což vede k usnadnění procesu výroby. Čistota běžně dostupné korundové keramiky, která je tvořena především oxidem hlinitým, se pohybuje od 90 % do 99,95 %. Velmi čistý korund se používá v náročných aplikacích, jako je například výroba korundových trubiček pro sodíkové výbojky. Čím vyšší je čistota korundové keramiky, tím vyšší je její tepelná vodivost a pevnost v ohybu i tlaku. [18] Keramické materiály, které obsahují více, než 99 % oxidu hlinitého, se slinují s přísadou 0,1 hmotn. % až 0,5 hmotn. % MgO nebo jiných hořečnatých sloučenin, které se při výpalu rozloží na MgO. Tato přísada blokuje růst nežádoucích velkých krystalů na úkor malých. [19] Korundová keramika zde slinuje vlivem vysoké povrchové energie velmi jemnozrnných korundových částic. Velikost zrn u běžné korundové keramiky se pohybuje od 3 μm do 5 μm [20].

Postup výroby korundové keramiky, berylnaté keramiky i keramiky na bázi nitridu hlinitého je velmi podobný. Základní materiál je obvykle rozdrcen na jemný prášek a smíchán s tavidly a pojivovými skly, které obsahují hořčík a vápník také ve formě prášku. Do směsi jsou často přidávány organická pojiva a změkčovadla. Směs je následně mleta kvůli odstranění aglomerátů až do vytvoření homogenní směsi, která je zformována do fólií označovaných jako „green sheet“ jedním z několika procesů a slinuta za zvýšené teploty k vytvoření výsledné pevné struktury. Formování materiálu do požadovaného konečného tvaru včetně zhotovování

otvorů probíhá ve formě „green state“. Při následném procesu slinování je nejprve nutné odstranit organický materiál a zajistit dokonalé spojení výsledné směsi. Proto je proces slinování rozdělen do dvou fází. V první fázi je teplota udržována na nižší úrovni, aby došlo k odstranění organického materiálu, který by mohl poté způsobovat dutiny v již hotové keramice. Ve druhé fázi je keramika slinuta při vysoké teplotě. Aby došlo ke zformování kvalitní struktury, musí se teplota u keramických materiálů, které obsahují skla, při slinování pohybovat nad teplotou tání tohoto skla. [5][6]

Proces slinování keramických materiálů, které jsou tvořeny oxidem kovu, může probíhat v běžné atmosféře vzduchu. Je však žádoucí, aby proces probíhal v kyslíkové atmosféře, která zajistí spolehlivé odstranění nežádoucích organických materiálů. K odstranění těchto materiálů dochází reakcí s kyslíkem za vzniku CO_2 . Keramické materiály tvořené nitridem kovu je nutné slinovat v dusíkové atmosféře. Dusíková atmosféra brání reakci nitridu s kyslíkem za vzniku oxidu kovu, který tvoří příslušný nitrid. [5]

1.1.3 Kovové substráty

Mezi substráty, které jsou využívány pro výkonové aplikace, patří také substráty s kovovým jádrem (označované jako IMS). Základ těchto materiálů tvoří měděná nebo hliníková deska, na které je nanášena izolační vrstva obvykle na bázi epoxidu. Na izolační vrstvě je následně vytvořen vodivý, například měděný motiv. Výhodou IMS substrátů je dobrá tepelná vodivost, jejíž hodnota je omezena použitým izolačním materiálem a jeho tloušťkou. V porovnání s keramickými substráty se substráty kovové vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi. Mezi jejich nevýhody patří především nízká dielektrická pevnost izolační vrstvy, která bývá obvykle tenká. Další nevýhodou je také velká tepelná roztažnost kovů, které jsou použity pro jádro substrátu, v porovnání s křemíkovými součástkami, které jsou připevněny na svrchní vrstvu. [16]

K novým trendům patří vytváření izolační vrstvy na kovovém jádře technologií tlustých vrstev. Tyto tlusté vrstvy je možné tisknout například na hliníkovou základnu a vypalovat je při relativně nízké teplotě kolem 550 °C až 600 °C [11][12], chromové oceli [21] nebo také na měděnou základnu. [17]

1.2 Technologie spojení keramika – kov

Spojení kovu s keramickým substrátem může být uskutečněno prostřednictvím mezivrstvy, která vznikne na rozhraní obou materiálů, nebo metodou přímého spojování, kdy

je kov přímo spojen s keramickým materiálem. Dalšími možnostmi vytváření spojení keramika – kov jsou například technologie tenkých a tlustých vrstev nebo chemicko – galvanické pokovování. [10][26]

1.2.1 Chemicko – galvanické pokovení keramického materiálu

Při této metodě se nejprve nanese tenká vrstva mědi na keramickou destičku chemickým (bezproudovým) procesem. Zvětšení tloušťky vrstvy je následně možné galvanickým pokovováním mědí nebo niklem. Nevýhodou této metody je, že adheze mezi keramickým materiálem a kovem je většinou slabá a dosažitelné tloušťky vrstev se pohybují maximálně v řádu desítek μm . [6]

1.2.2 Spojení kovu s keramickým materiálem prostřednictvím mezivrstvy

Mezi kovem a keramickou destičkou je vytvořena mezivrstva, která zprostředkovává spojení obou materiálů. V aplikacích, kde je vyžadována dobrá tepelná vodivost, je mezivrstva nežádoucí, protože snižuje výrazným způsobem tepelnou vodivost celého substrátu. Největší vliv na snížení tepelné vodivosti má mezivrstva, která není tvořena kovem. Mezivrstvy jsou také často málo odolné vůči korozi, a mohou tak zapříčinit selhání celého systému. Jejich tloušťka je obvykle menší než 25 μm . [6][26]

1.2.3 Přímé spojení keramika – kov

Mezi často používané metody pro vytváření spojení keramika – kov patří metoda přímého spojování.

Při procesu přímého spojování nedochází na rozhraní kov – keramika ke vzniku snadno rozpoznatelné mezivrstvy. Vznikají zde však velmi tenké přechodové vrstvy (tloušťka několika atomárních vrstev), které bývají tvořeny kyslíkovými mosty mezi kovem a keramikou. [26]

Aby bylo dosaženo dobré adheze, je nezbytné splnit několik podmínek. Kov musí být v těsném kontaktu s keramickým substrátem. Toho je možné dosáhnout například přivedením kovu do kapalné fáze, kdy kov přesně zkopíruje povrch keramiky a po vychladnutí dojde ke vzniku pevného spojení. Při roztavení kovu však dojde ke ztrátě jeho tvaru, což je obvykle nežádoucí. Tomu je možné předejít využitím eutektické slitiny vytvořené na povrchu kovu. Tato slitina může být například tvořena čistým kovem a oxidem daného kovu. Teplota tání takového eutektika je obvykle o 10 °C až 50 °C nižší než, je teplota tání čistého kovu. Při této teplotě se povrch kovu stane plastickým a přizpůsobí se povrchu keramického substrátu, což

usnadňuje spojení obou materiálů. Převládající složkou eutektika by měl být daný kov a další složky by měly být přítomny v co nejmenším množství. Je nutné, aby tloušťka nataveného povrchu byla tenká v porovnání s tloušťkou celého kovu. [26][27]

Pokud je jako materiál kovu použita měď, je tato metoda označována jako DBC – direct bonded copper. [6] Mezi výhody spojení vytvořeného technologií DBC patří především jeho vysoká pevnost a dobrá teplotní odolnost celého systému. Substrát je možné provozovat v rozsahu teplot od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+330\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prudké změny teploty však mohou způsobit delaminaci mědi od keramiky nebo prasknutí keramiky. Metoda přímého spojování má ve srovnání s většinou ostatních metod spojování mědi s keramickým materiálem malé výrobní náklady. [6][26][28] Výhodou této technologie je možnost spojovat keramickou destičku s mědí až o tloušťce 0,8 mm. Tlustá vrstva mědi najde uplatnění především ve výkonové elektronice, kde je nutné přenášet proudy v řádech desítek až stovek A. Mezi nevýhody technologie DBC patří například nízká odolnost vůči prudkým a cyklickým změnám teplot, nemožnost vytváření křížení vodivých cest nebo nízká rozlišitelnost vodivých motivů. [29] Tato metoda je blíže vysvětlena a praktická realizace popsána v kap. 3.

1.2.4 Spojení keramického materiálu s kovem prostřednictvím organometalické pasty

Při této metodě může být kov aplikován na povrch keramiky ve formě organometalické pasty. Ten je v pastě přítomen ve formě organické sloučeniny, která se při výpalu rozkládá za vzniku jemných kovových částic. Typickým případem jsou rezináty kovů Pt, Au nebo Ag, které se již dlouhou dobu používají k dekorování glazovaného porcelánu a v posledních desetiletích se začínají používat i v elektronice. Velmi silné adheze je dosaženo použitím rezinátů obecných kovů, které při výpalu v oxidační atmosféře vytvářejí oxidy a ty pak společně skelnou fází, prostřednictvím které kovy drží na keramice. [30]

Adheze organometalických past ke keramickému substrátu je velmi dobrá. Mezi nevýhody, při použití těchto substrátů pro výkonové aplikace, lze zařadit obtížné a nákladné dosažení vyšší tloušťky vodivé vrstvy než $1\text{ }\mu\text{m}$.

1.2.5 Technologie tlustých vrstev pro vytváření vodivé vrstvy na keramickém substrátu

Technologie tlustých vrstev patří mezi další metody vytváření vodivé vrstvy na povrchu nejčastěji keramického substrátu. Tlustou vrstvou bývají označovány vrstvy o tloušťce větší než 5 μm . [20] Běžně dostupnými pastami lze dosáhnout tloušťek do cca 30 μm . [6][31][32]

Tlusté vrstvy jsou nejčastěji tištěny na 96% korundovou keramiku. Pro mikrovlnné aplikace bývá používána spíše 99,5% korundová keramika. Rovinnost keramického materiálu není pro technologii tlustých vrstev tak důležitá jako při technologii tenkých vrstev, přesto je však důležité mít substrát dostatečně rovný například pro tisk rezistorů. Povrch substrátu může také ovlivnit výslednou adhezi. Pasty jsou téměř výhradně tištěny sítotiskem, který je ekonomický a zároveň dostatečně přesný. [20]

Vodivá složka past bývá většinou tvořena slitinami stříbra s platinou nebo paladiem. V některých případech může být tvořena také zlatem. Perspektivními pastami se v poslední době stávají pasty na bázi mědi, které umožňují tisknout vodivé vrstvy až do tloušťky 300 μm . [33] Technologie tlustých vrstev, kde je jako vodivá vrstva použita měď, je označována zkratkou TPC.

Mezi výhody technologie tlustých vrstev v porovnání s technologií DBC patří možnost selektivního zesílení požadovaných oblastí vodivého motivu, vysoká rozlišitelnost vodivých motivů, možnost křížení vodivých drah s využitím dielektrických past, vyšší odolnost vůči prudkým změnám teplot, možnost snadného vytváření pokovených otvorů a snazší technologický proces. Nevýhodou této technologie v porovnání s technologií DBC je především nižší adheze, která je však i přesto dostatečná pro spolehlivý provoz zařízení. Technologii tlustých vrstev je kvůli jejím výhodám věnována podstatná část disertační práce.

2 Cíle disertační práce

Předložená disertační práce sleduje čtyři hlavní cíle, které jsou uvedeny v následujících bodech.

1. **Realizace substrátu na bázi korund – měď vhodného pro výkonové aplikace se specifickými vlastnostmi.**

Tento substrát bude tvořený korundovou základnou s tloušťkou od 0,3 mm do 1 mm a vrstvou mědi s tloušťkou 20 μm až 300 μm . V měděné vrstvě budou vytvořené vodivé motivy technologií DBC a technologií TPC.

2. **Porovnání technologie přímého spojení mědi s korundem (DBC) a technologie tisku tlusté vrstvy mědi (TPC).**

V rámci řešení disertační práce budou otestovány tyto dvě technologie a vzájemně porovnány.

3. **Realizace a optimalizace technologie DBC i technologie TPC pro kusovou výrobu.**

Dalším cílem práce je vytvoření technologie pro výrobu výkonových substrátů za použití minimálních nákladů, kterou bude možno použít v laboratořích Katedry technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni.

4. **Vytvoření metodiky testování substrátů pro výkonové aplikace.**

Disertační práce bude obsahovat soubor technologických postupů umožňující kvalitativní ověření požadovaných vlastností výkonových substrátů a otestování jejich nejdůležitějších vlastností.

3 Vodivé sítě z mědi na korundu vytvářené technologií přímého spojení mědi s keramikou

Technologie spojení mědi s keramikou, neboli technologie DBC, je již po několik desetiletí používána pro spojení korundové keramiky nebo keramiky z nitridu hliníku s měděným plechem.

Záměrným a řízeným oksyločením povrchu mědi plátované na korund se na jejím povrchu vytvoří oxid měďný. Vznik oxidu měďného závisí na teplotě a na parciálním tlaku kyslíku. Při ohřevu nad eutektickou teplotu se povrchová vrstva nataví tím, že oxid měďný s mědí vytváří eutektikum, které taje při teplotě 1065 °C, což je o 18 °C nižší teplota, než je teplota tání čisté mědi (1083 °C). Při ochlazování utuhne roztavená vrstva za vytvoření eutektika Cu – Cu₂O. Při vhodně zvolené teplotě je dosaženo natavení povrchu mědi tak, aniž by došlo k roztavení celé měděné vrstvy. Teplota výpalu je tak volena vyšší, než je teplota eutektická, ale zároveň nižší, než je teplota tání mědi. Tím dojde k přizpůsobení povrchu mědi tvaru keramické destičky, zatímco čistá měď uvnitř vrstvy nezmění svůj tvar ani strukturu. [6][26][34][35] Při nevhodně zvolených podmínkách výpalu, tedy nevhodné teplotě a parciálním tlaku kyslíku může vzniknout na povrchu mědi černý oxid měďnatý, který je většinou nežádoucí. Fázové diagramy systému Cu – O jsou uvedeny na obr. 1 a obr. 2. [6][36]

Zformování kapalně fáze na povrchu mědi však není jedinou podmínkou pro vznik spolehlivého spojení. Další podmínkou je existence nízké mezifázové energie na rozhraní spojovaných materiálů. Jako příklad lze uvést cínovou pájku, kterou není možné stejným způsobem spojit s keramickým substrátem kvůli vysoké mezifázové energii mezi oběma materiály. U mědi klesne mezifázová energie výrazně pomocí kyslíku, který způsobí vznik oxidu měďného a následné zformování eutektika na povrchu mědi. [6][34]

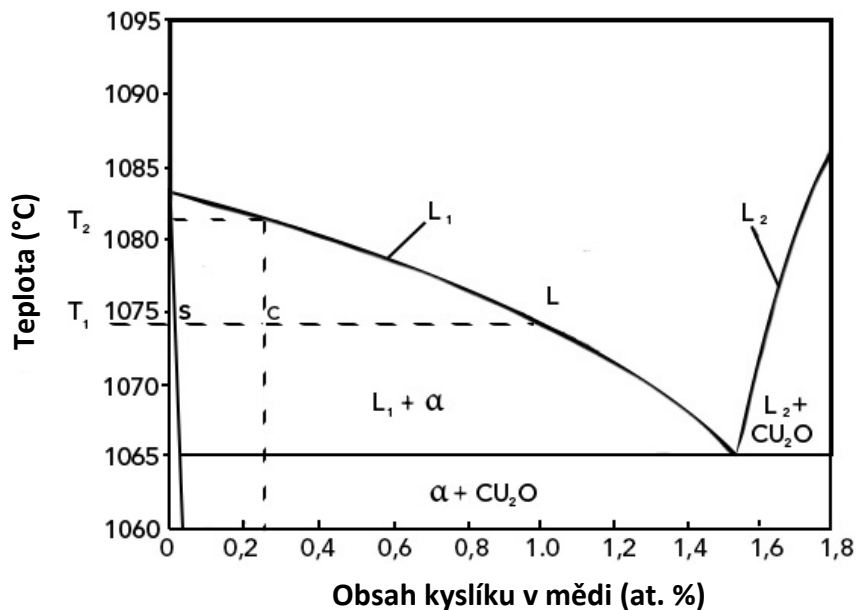
Princip výroby spojení technologií DBC je následující. Měděný plech je umístěn na povrchu keramické desky. Tloušťka plechu je obvykle v řádu stovek μm. [6][26]

Celek je poté vložen do pece, kde je udržována atmosféra proudícího plynu obsahujícího především inertní plyn (např. dusík nebo argon) a malé množství kyslíku. Na obr. 1 je uvedena část fázového diagramu systému měď – kyslík na straně mědi. Graf uvádí průběh křivky likvidu v závislosti na atomovém procentuálním obsahu kyslíku v mědi a pole existence jednotlivých fází systému. Teplota likvidu L_I se snižuje s rostoucím množstvím kyslíku obsaženého v mědi. Při teplotě T_I ($1065\text{ °C} \leq T_I \leq 1083\text{ °C}$) a atomové koncentraci kyslíku nižší než 1,5 at. % bude při atmosférickém tlaku měď s obsahem oxidu mědi tvořena pevnou i kapalnou fází. Relativní

podíl RP (%) obou fází je určen vztahem (3.1). Čím větší je číslo RP , tím více je obsažena kapalná fáze.

$$RP = \frac{CS}{LS} \cdot 100, \quad (3.1)$$

kde úsek CS a LS jsou vzdálenosti bodů na obr. 1. Úsek CL odpovídá množství pevné fáze při teplotě T_1 a úsek SC množství kapalná fáze při této teplotě. [6][26]



Obr. 1 Fázový diagram systému měď – kyslík. [6]

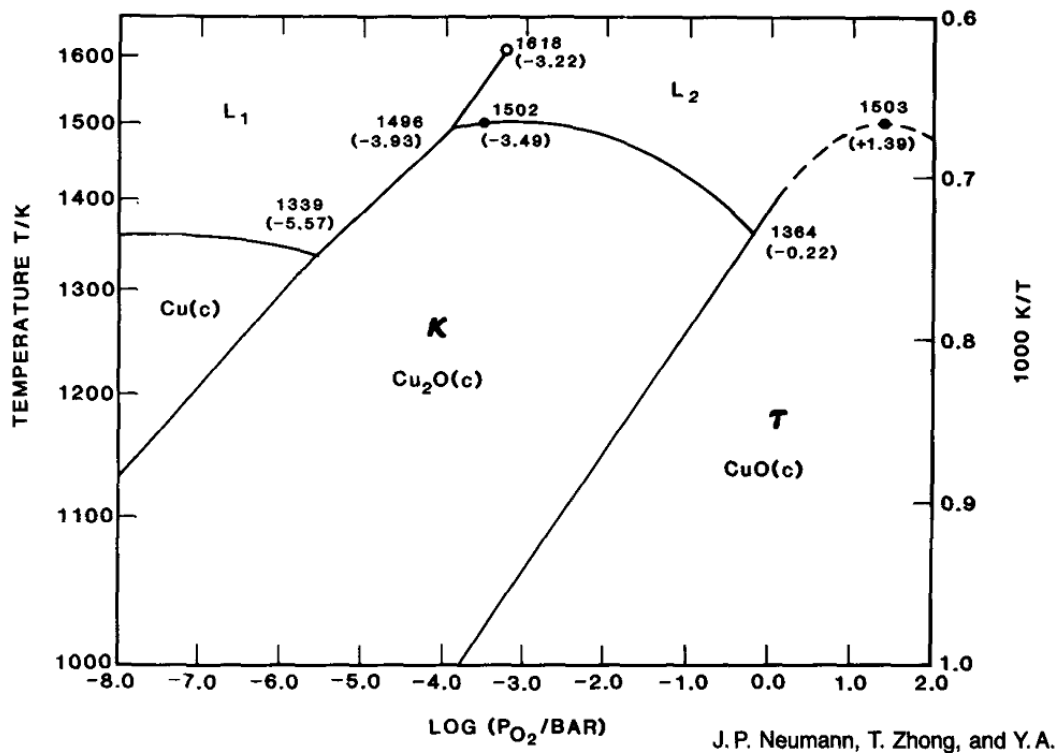
Požadavky na řízení procesu výroby substrátu technologií DBC jsou velmi přísné kvůli malému rozdílu mezi teplotou eutektikály a teplotou tání mědi. Rozdíl teploty ohřátí spoje a teploty eutektické ovlivňuje tloušťku kapalná fáze mezi korundem a mědí. Vliv parciálního tlaku kyslíku a teploty na systém Cu – O je uveden na obr. 2. Diagram uvádí oblasti stability jednotlivých fází systému. [6][26][36]

Vytvoření tekuté vrstvy mezi mědí a keramickou destičkou umožní vznik těsného kontaktu mezi oběma materiály a následné spojení [26].

Během chladnutí může docházet vlivem rozdílné teplotní roztažnosti mědi a keramiky k deformacím, většina z nich je vyrovnána plastickou deformací mědi. [6]

Pevnost takto vytvořeného spojení může být vyšší než 140 MPa [26]. Keramické materiály, pro které je možné použít technologii DBC, jsou například korundová keramika, keramika tvořená nitridem hliníku nebo berylnatá keramika.

Výhody a nevýhody technologie DBC jsou blíže popsány v kap. 1.2.3.



Obr. 2 Fázový diagram systému Cu-O s vyznačeným vlivem parciálního tlaku kyslíku na vytváření jednotlivých fází. [převzato z 36]

3.1 Výroba substrátu keramika – měď technologií DBC

První experimenty s výrobou výkonových substrátů v rámci disertační práce byly zaměřeny na technologii DBC. Této problematice je také věnována převážná část v tezi disertační práce [37] a několik prvních publikací v rámci doktorského studia. Hlavní výsledky z této oblasti jsou popsány v této kapitole. Tyto substráty byly prakticky zrealizovány kvůli jejich nevýhodám pouze v laboratorních podmínkách v laboratořích Katedry technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni.

Pro základní substrát byla zvolena 96% korundová keramika o tloušťkách 0,5 mm, 0,635 mm a 1 mm, která byla vyrobena ve společnosti ELCERAM. Vodivá vrstva byla tvořena elektrovednou mědí o tloušťkách od 0,1 mm do 1 mm.

Prvním krokem výroby substrátů měď – keramika technologií DBC bylo dělení materiálu na požadované rozměry. Korundové destičky byly dodány přímo dle požadovaných rozměrů a jejich dodatečná úprava nebyla ve většině případů nutná. Měď byla dělena na požadované rozměry mechanickým způsobem. Rozměry plechů po dělení se pohybovaly od 5 mm x 5 mm do 40 mm x 60 mm. Ve většině experimentů byl používán rozměr 20 mm x 20 mm. Bylo dokázáno, že je velmi důležité, aby byl plech po celém povrchu dostatečně rovný. Vzhledem

k tomu bylo nutné po dělení měděného plechu dobře upravit rovinnost jeho povrchu. Takto upravený plech musí přiléhat celoplošně na keramický substrát.

Povrch obou materiálů byl očištěn směsí izopropylalkoholu s demineralizovanou vodou. Vlastní ošetření probíhalo v ultrazvukové čističce, kde byly vzorky ponechány po dobu 10 min. Po očištění se oba materiály vždy sušily horkým vzduchem.

Vlastní proces spojování začíná přiložením měděného plechu na korund, důraz je kladen na zajištění celoplošného kontaktu mezi oběma materiály. Celek je vložen do plynotěsné retorty, která je blíže popsána v kap. 4.4.1, nebo do muflové pece. Umístění vzorků v muflové peci je zobrazeno na obr. 3. Na obr. 3 je také možné pozorovat vzorky o různých rozměrech keramických substrátů i měděných plechů. Během tohoto experimentu, který byl jeden z prvních, byl testován vliv zatížení měděných plechů na kvalitu výsledného spojení.

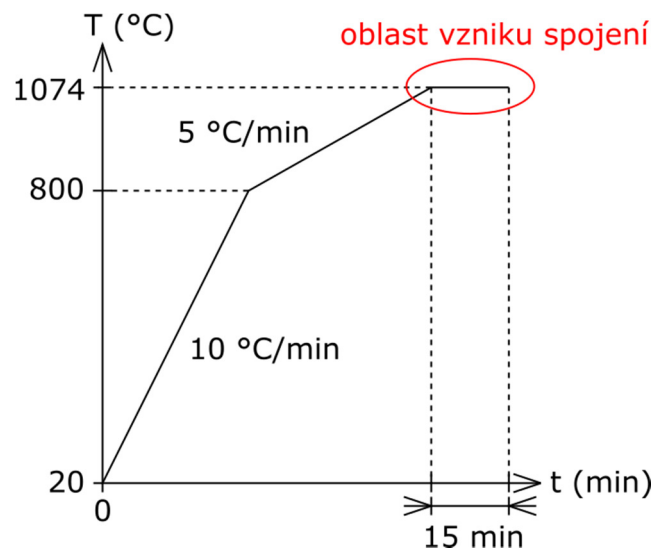


Obr. 3 Umístění vzorků v muflové peci pro výrobu substrátů technologií DBC.

První experimenty s výpalem se uskutečnily v utěsněné muflové peci tak, aby bylo možné udržet v peci parciální tlak kyslíku na požadované úrovni fázových diagramů dle obr. 1 a obr. 2. Toto řešení vyžadovalo vysokou spotřebu dusíku a vedlo k nízké opakovatelnosti výsledků. Proto byla navržena a vyrobena plynotěsná retorta (blíže popsána v kap. 4.4.1), která umožnila snadnější kontrolu atmosféry v oblasti vzorků během výpalu.

Po umístění vzorků v peci nebo v plynotěsné retortě byl zahájen výpal podle teplotního profilu uvedeného na obr. 4. Při výpalu byla vhněným dusíkem udržována optimální hodnota parciálního tlaku kyslíku v peci s obsahem kyslíku přibližně 1 at. %. Maximální teplota v peci se musí pohybovat mezi teplotou tání eutektika Cu – Cu₂O (1065 °C) a teplotou tání mědi (1083 °C), aby došlo k vytvoření spojení keramiky s mědí využitím eutektické slitiny a nedošlo přitom k roztavení mědi v celém jejím objemu. Optimální maximální teplota při výpalu byla sérií experimentů určena na 1074 °C.

Teplotní profil v peci nebo v retortě, který byl sérií experimentů určen jako optimální, je zobrazen na obr. 4. Po patnácti minutách při teplotě 1074 °C je vypnuto topení pece a vzorky spolu s pecí chladnou až na teplotu cca 50 °C, kdy je možné vzorky z pece vyjmout.



Obr. 4 Teplotní profil, který byl použit při vypalování vzorků technologií DBC.

Atmosféra v oblasti výpalu vzorků byla udržována vhněným plynem, který byl vytvořen směsí plynu ze dvou tlakových lahví. První láhev obsahovala dusík čistoty 5,0 a druhá láhev kalibrační plyn o složení 99 % dusíku a 1 % kyslíku. Regulováním průtoku obou lahví bylo dosaženo požadované atmosféry v oblasti výpalu vzorků. Při chladnutí vzorků byl do pece nebo retorty vhněněn pouze dusík, protože při chladnutí již nedochází ke zvýšení adheze spojení korund – měď, ale naopak může docházet k nežádoucí oxidaci mědi. Retorta umožňuje její vyjmutí z pece bez přerušení přísunu inertního plynu a urychlit tak chlazení vsádky až o desítky °C/min.

3.2 Úprava měděného povrchu korundového substrátu pokoveného technologií DBC

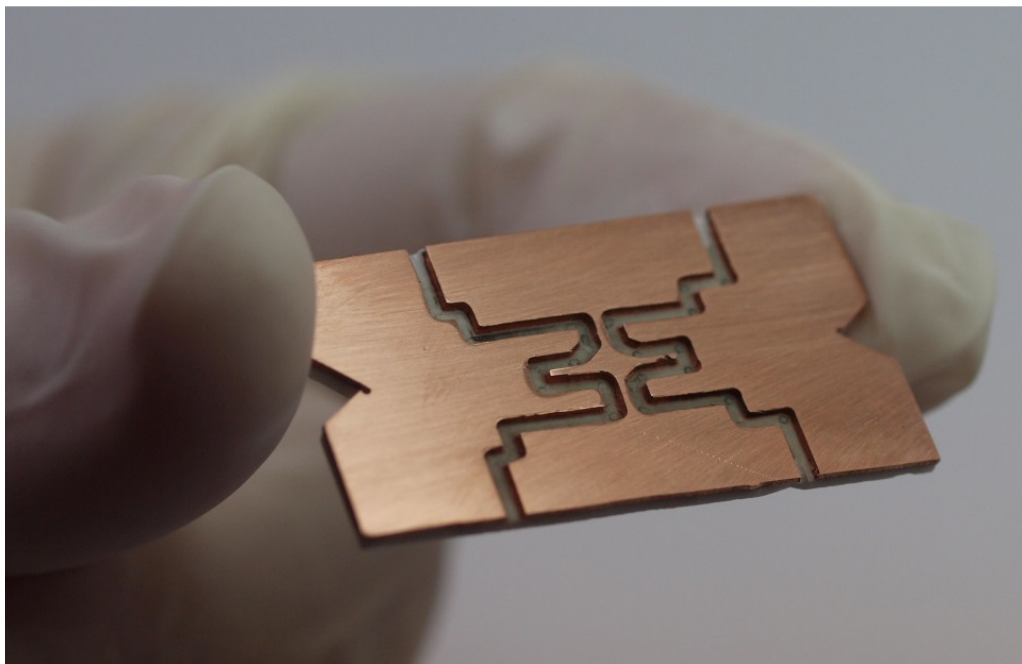
Substráty byly vždy po proběhlém vypalovacím profilu na povrchu pokryty vrstvou oxidů. Oxidy byly odstraněny broušením nebo chemicky. Broušení na metalografické brusce nebo brusným papírem odstranilo spolehlivě všechny oxidy, pokud však nebyl vytvořený substrát zcela planární, docházelo u této metody k nerovnoměrnému odběru materiálu.

Pro chemické odstranění bylo použito několik chemických látek, například kyselina chlorovodíková, kyselina dusičná nebo chlorid železitý. Nejlepších výsledků bylo dosaženo zředěnou kyselinou dusičnou s následným důkladným oplachem a odstraněním svrchní vrstvy, která byla v kontaktu s leptacím médiem broušením. U této metody je nezbytné dodržovat přísné bezpečnostní předpisy při manipulaci s leptadly. Nevýhodou této metody je kromě nutnosti manipulace s nebezpečnou kyselinou také náročná likvidace odpadů.

Automatickou frézku nebo leptáním se vytvoří požadované obrazce měděného pokovení. Mezi nevýhody frézování patří především to, že frézka neumožňuje kvůli vysoké tvrdosti korundu odstranit celou měděnou vrstvu a na povrchu korundu tak zůstane často slabá vrstva mědi. Je proto nutné použít dodatečné technologické operace pro její odstranění jako je například leptání amoniakálním roztokem peroxidu vodíku. Aby se odleptaly jen požadované části měděné vrstvy, vodivé motivy musí být zamaskovány. Výsledný substrát je nezbytné zbavit residuí leptadla a důkladně vysušit. Jsou-li vodivé obrazce vytvořeny leptadlem, je klíčové zabránit podleptání, což je především u velmi tlustých vrstev značně problematické.

Vyrobený substrát, který byl v praxi použit pro výkonové LED, je zobrazen na obr. 5.

Technologie DBC má celou řadu nevýhod, které byly popsány v textu, a proto se následující část práce věnuje především výkonovým substrátům, které byly vyrobeny technologií tlustých vrstev.



Obr. 5 Substrát vyrobený technologií DBC, který je určený pro výkonové LED.

4 Vodivé sítě z mědi na korundu vytvářené technologií tlustých vrstev

Technologie tlustých vrstev patří mezi velmi perspektivní technologie v oblasti výkonových substrátů. Výhody a nevýhody této technologie jsou uvedeny v kap. 1.2.5.

Adheze past určených pro tisk na keramický substrát je zajištěna nejčastěji skelnou fází, která reaguje jak s korundem, tak s kovem obsaženým v pastě. Tato skelná fáze může být tvořena oxidem bismutu, olova (v dnešní době se od olova ustupuje), křemíku nebo jinými oxidy kovu. [20]

Skelná fáze se používá kvůli optimalizaci viskozity při výpalu a schopnosti reakce s korundem a kovem. Tímto mechanismem dochází ke spojení mezi měděnou pastou a korundovou keramikou například také u nových past od společnosti Heraeus, které jsou testovány v praktické části.

Další možností, jak vytvořit adhezní spoj mezi pastou a korundem, je přidanou mezivrstvou, která je vytvořena na keramickém substrátu před tiskem vlastní kovové pasty. Tato mezivrstva může být tvořena například oxidy mědi pro tisk měděných past, obecnými kovy jako titan, wolfram, chrom nebo také například nanovrstvami, které jsou nanášeny z alkoholátů příslušných kovů technologií sol – gel apod. [20]

4.1 Pasty na bázi mědi

Disertační práce se z past určených pro tisk tlustých vrstev zaměřuje především na ty, které jsou na bázi mědi. Tyto pasty jsou velmi perspektivní, protože jako například pasty z „Thick print copper systému“ od firmy Heraeus umožňují vytvoření vodivé měděné vrstvy až 300 μm . [31] Takto tlustá vodivá vrstva je velmi výhodná pro výkonové aplikace, kde je nutné přenášet vysoké proudy a pro aplikace, kde je důležitý dobrý odvod tepla, protože například tlustá vrstva mědi (TPC) natištěná na korundovém substrátu dokáže dostatečně rozvést teplo po celém substrátu a následně umožnit dobrý odvod tepla i do chladiče.

Tisk tlustých vrstev umožňuje mimo jiné také křížení vodivých drah, což není u technologie DBC prakticky možné. Křížení lze zajistit tiskem dielektrické pasty mezi jednotlivé tisky vodivých drah, které mají být vzájemně kříženy. Jako příklad této dielektrické pasty lze uvést pastu Heraeus IP9319D, která má podobnou teplotu výpalu jako měděné pasty. Tato pasta se stejně jako pasty určené pro tisk TPC vypaluje v dusíku [38].

4.1.1 Měď

V dnešní době je měď a její slitiny po železe a hliníku třetím nejpoužívanějším kovem. [39] Měď je ušlechtilý kov, který má načervenalou barvu. Má velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, nízký plošný odpor, vysokou odolnost vůči rozpouštění v roztavené pájce a menší tendenci k migraci ve srovnání se stříbrem a je snadno zpracovatelná. Měď je používána v široké škále aplikací a to buď čistá, nebo ve formě slitin. Mezi nejznámější slitiny patří především bronz (slitina mědi a cínu) a mosaz (slitina mědi a zinku). [39]

Měď je také, v porovnání s ostatními kovy určenými pro tisk tlustých vrstev, jako je například stříbro, výrazně levnější. Kvůli tomu může být právě měď s výhodou využívána při tisku vodivých vrstev až do tloušťky stovek mikrometrů. [39]

Při výpalech měděných past se měď často pokrývá oxidy, zejména oxidem měďným a oxidem měďnatým. Oxid měďný se mimo jiné také účastní mechanismů spojení u technologie TPC, tak i u technologie DBC. Právě kvůli tomu je také důležité uvést vybrané vlastnosti těchto dvou oxidů.

4.1.2 Oxid měďný Cu_2O

Měď se při kontaktu s kyslíkem pokrývá oxidy. Tato oxidace bývá zpravidla nežádoucí. Urychlení oxidace je možné docílit vyšší teplotou.

Z fázového diagramu soustavy Cu – O (obr. 2) vyplývá, že za atmosférického tlaku je obtížné zoxidovat vrstvu mědi na oxid měďný. Téměř vždy bude obsahovat také oxid měďnatý. Na mědi bude nejprve vznikat vrstva oxidu měďného, která má různé interferenční odstíny v závislosti na její tloušťce. Například při tloušťce vrstvy 37 nm až 38 nm se vrstva jeví jako tmavě hnědá, při tloušťce 48 nm fialová a při tloušťce 124 nm až 126 nm jako červená. Když tloušťka vrstvy překročí tloušťku 126 nm, na vrstvě oxidu měďného bude růst na straně vzduchu také vrstva oxidu měďnatého CuO. Vznik pouze oxidu měďného je možný pouze za nižšího parciálního tlaku kyslíku nebo při zachování tenké vrstvy pod 126 nm. [39]

Oxid měďný má polovodivé vlastnosti. Šířka zakázaného pásu se pohybuje od 2,1 eV do 2,6 eV. Měrný elektrický odpor je vysoký a pohybuje se od $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ do $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$. Teplota tání oxidu měďnatého je 1235 °C. [40][41]

4.1.3 Oxid měďnatý CuO

Oxid měďnatý je černá krystalická nebo amorfnní látka. Oxid měďnatý má podobně jako oxid měďný polovodivé vlastnosti. Šířka jeho zakázaného pásu se pohybuje od 1,3 eV do 2,1 eV. Teplota tání oxidu je 1326 °C. Oxid měďnatý může způsobit při kontaktu podráždění pokožky nebo očí. [39][40][42]

Oxidy mědi mohou najít uplatnění například v solárních článcích. [40]

4.1.4 Nitrid mědi

Nitrid mědi Cu_3N může za určitých okolností vznikat na povrchu mědi při výpalu v dusíkaté atmosféře. Nitrid mědi patří mezi polovodiče s malou šířkou zakázaného pásu. V poslední době se začíná používat v optických úložiscích dat nebo ve vysokofrekvenčních integrovaných obvodech a ve fotovoltaice. Nitrid mědi má nízkou teplotu rozpadu, která se pohybuje mezi 100 °C a 300 °C.[43][44]

4.2 Charakteristika past pro sítotisk

Při experimentech v rámci disertační práce byla nejčastěji používanou pastou pro tisk vodivých obrazců na keramickém substrátu pasta C7720 od společnosti Heraeus. Tato pasta je určena pro vytváření tlustých vrstev na preoxidované keramice na bázi nitridu hlinitého nebo na 96% korundu. Pastu je možné tisknout i v několika vrstvách. Po každém tisku je natištěná vrstva vždy sušena a až po sušení je možné tisknout další vrstvu. V následující tabulce (tab. 3) jsou uvedeny nejdůležitější vlastnosti použité pasty.

Tab. 3 Vlastnosti měďné sítotiskové pasty Heraeus C7720 [33][45]

Forma pasty	Tixotropní
Viskozita	$30 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ až $90 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
Rychlost tisku	až $6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
Skladovatelnost	6 měsíců v suchu, temnu, při teplotách 5 °C až 25 °C
Tloušťka vypálené vrstvy	20 μm až 60 μm pro jeden tisk; až 300 μm pro 6 tisků
Rezistivita	$\leq 0,8 \text{ m}\Omega/\square$ při tloušťce vrstvy 50 μm

Další použitou a testovanou pastou byla pasta 2312-A3 od společnosti ESL ElectroScience. Tato pasta umožňuje dle katalogového listu tisk maximálně 185 μm tlustou vrstvu a její rezistivita je uváděna $\leq 1,5 \text{ m}\Omega/\square$. [46]

Světovými výrobci past jsou v současné době vyvíjeny stále nové měděné pasty. Mezi takovou novinku patří i adhezni pasta Heraeus C7403, která byla uvedena na trh několik měsíců před odevzdání disertační práce. S touto pastou byly také provedeny některé pokusy, které jsou uvedeny v této práci. Vlastnosti pasty C7403 se na první pohled příliš neliší od pasty Heraeus C7720. Tato pasta je však určena pro tisk základních (prvních) vrstev, na které může být poté tisknuta pasta Heraeus C7720 nebo Heraeus C7404. Pasta C7403 má dle výrobce vyšší adhezi ke korundovému substrátu než pasta C7720. [45] Jako další příklad pasty na trhu lze ještě také uvést např. pastu 2312–G od ESL ElectroScience [47].

4.3 Realizace tiskového procesu

Testovací motivy, které jsou uvedeny v kap. 5 na obr. 11, jsou sítotiskem vytištěny na korundové substráty o rozměrech zpravidla 101,8 mm x 101,8 mm x 0,3 mm. Tloušťka některých substrátů, určených pro testování, byla také 0,635 mm.

Po každém tisku jsou vzorky sušeny. Po sušení může následovat tisk další vrstvy až do požadované tloušťky. Po natištění a sušení vrstev následuje výpal. Všechny tyto kroky procesu výroby testovacích substrátů měď – korund jsou popsány v následujícím textu.

Vzhledem k požadavku na tlusté vrstvy bylo nejčastěji použito síto s osmdesáti vlákny na palec (mesh 80). Tímto sítem bylo při tisku dosaženo tloušťky vrstvy až cca 60 μm . Pro první a poslední vrstvu bylo při některých testech použito jemnějších sít mesh 200 nebo mesh 325. Úhel, který svírá těrka se sítem, byl 45°, rychlost pohybu těrky 50 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, vzdálenost síta od substrátu 1,8 mm a přítlak těrky cca 50 N.

Technologie TPC umožňuje selektivní zesilování vrstev na místech, kde je tlustá vrstva výhodou. Místa, kde je očekáván přenos velkého proudu je tak možno natisknout vyšším počtem měděných vrstev (tloušťka až 300 μm), zatímco v místech, kde budou protékat pouze například řídicí signály nebo malé proudy, je možné ponechat pouze jednu měděnou vrstvu (tloušťka např. 20 μm).

Každá vrstva musí být před tiskem následující vrstvy sušena při teplotě, která je udávána výrobcem pasty. Tato teplota se pohybuje od 125 °C do 150 °C. Vrstvy se sušily dle doporučení výrobce v peci s oxidační atmosférou. Po sušení vrstev následoval výpal buď v plynotěsné retortě, nebo ve vakuové peci. Oba principy výpalu jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

4.4 Výpal

Měděné pasty jsou určeny pro výpal především v průběžné a plynotěsné peci. Pro kusovou výrobu může být s výhodou použita také plynotěsná retorta, která je vložena do muflové pece. Dvě tyto technologie, které byly použity při praktických experimentech v rámci disertační práce, jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.4.1 Vypalování v plynotěsné retortě

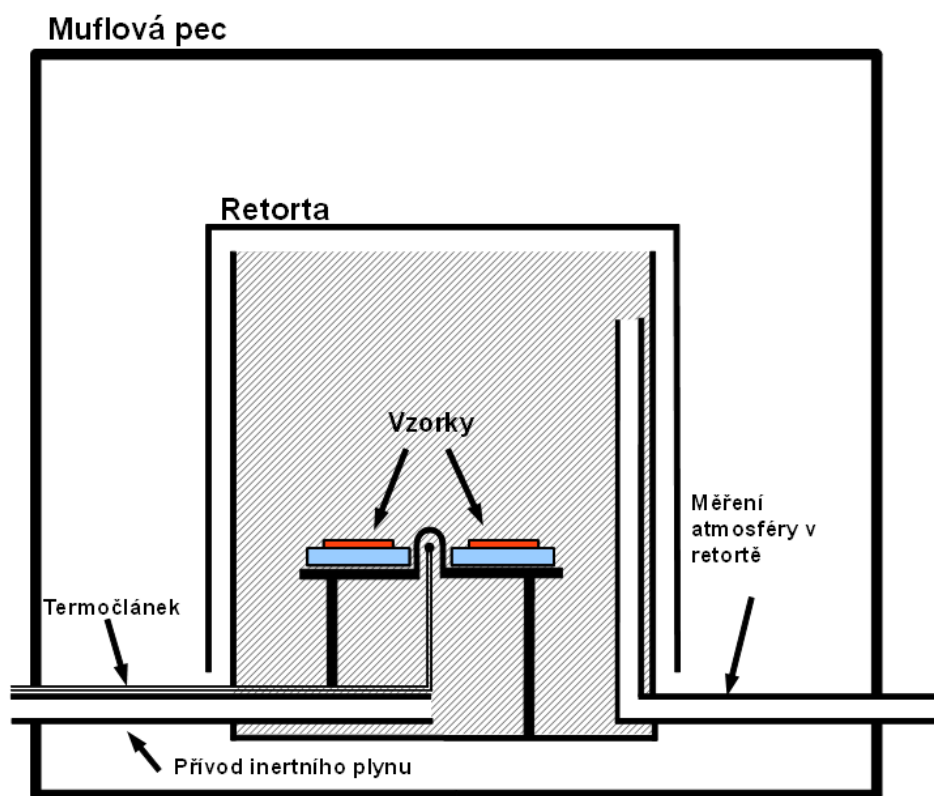
Výpal měděných past má dva hlavní kroky. V prvním kroku se z objemu pasty uvolňuje organická složka pasty, při teplotě cca 400 °C by měla být laková složka pasty již odstraněna. Při překročení teploty 400 °C začínají slinovat měděné částice z natištěné pasty, s rostoucí teplotou výpalu reaguje natištěná vrstva se substrátem a vytváří se spoj korundu s mědí. Jednotlivá zrna mědi postupně rostou na úkor zrn malých. Správná velikost zrna mědi je podmínkou dobrých vlastností vytvořené vrstvy.

Jedním z obtížně dosažitelných parametrů při výpalu tlusté měděné vrstvy např. za použití sítotiskové pasty Heraeus C7720 je především nízká požadovaná koncentrace kyslíku v peci, která je stanovena zpravidla pod 10 ppm. Takto nízké koncentrace není možné dosáhnout v klasické muflové peci při vhanění inertního plynu ani po důkladném utěsnění. Nízké koncentrace kyslíku je možné dosáhnout v plynotěsné nebo vakuové peci. Žádná z těchto pecí nebyla během prvotních experimentů k dispozici, a protože pořizovací náklady takovýchto pecí jsou vysoké, bylo hledáno jiné alternativní řešení. Jako zařízení, které by splnilo veškeré požadavky týkající se výpalu této pasty, byla zvolena plynotěsná retorta (obr. 6, obr. 7), která je vložena do běžné muflové pece. Tato retorta byla v rámci řešení disertační práce navrhována a prakticky zrealizována.

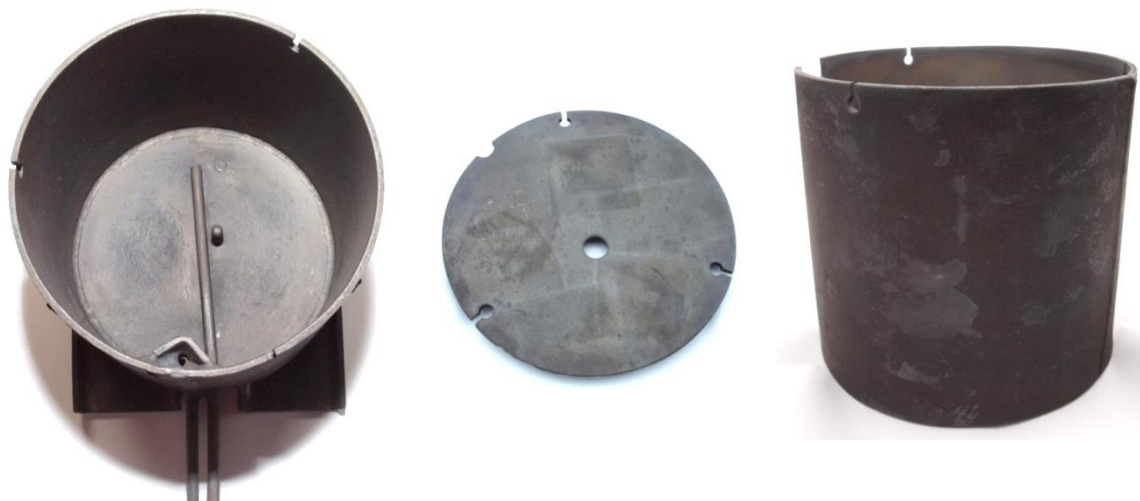
Retorta je vyrobena ze žáruvzdorného plechu tloušťky 3 mm, který je schopen odolat teplotám až do 1100 °C. Díky tomu je tak možné použít pro výpal tlustých vrstev i pro výpal substrátů vyrobených technologií DBC. Retorta se skládá ze třech od sebe oddělitelných klíčových částí. Do základní části plynotěsné retorty (obr. 8 vlevo) je připojen přívod ochranné atmosféry, který ústí ve spodní části retorty. Spodní část obsahuje také vyústek, který je určen pro umístění termočlánku sloužícího k měření teploty uvnitř retorty. Ve vrchní části základního dílu retorty je umístěn vývod pro měření atmosféry uvnitř retorty během procesu výroby.



Obr. 6 Plynotěsná retorta.



Obr. 7 Schematické zobrazení plynotěsné retorty umístěné v muflové peci.



Obr. 8 Složení plynotěsné retorty: základní část plynotěsné retorty – vlevo; deska umístěná na dně retorty – uprostřed; víko retorty – vpravo.

Plynotěsná retorta obsahuje dále desku (obr. 8 uprostřed) ze stejného materiálu jako je vyrobena retorta, která slouží pro vyrovnaní povrchu na dně retorty a tím pádem i k snazšímu umístění vzorků ve vodorovné poloze. V této desce je umístěn otvor sloužící k tomu, aby byl termočlánek vyveden co nejbližší k prostoru, kde jsou umístěny vzorky, a měření teploty tak bylo co možná nejvíce přesné.

Po vložení vzorků je celá retorta uzavřena víkem (obr. 8 vpravo). Víko slouží k vytvoření teplotního zámku a tím pádem k zabránění úniku atmosféry ven z retorty při zahřívání.

Uzavřená retorta je vložena do muflové pece LAC LMH 07/12 manipulačním držákem tak, že z pece jsou vyvedeny pouze dvě trubky (pro přívod ochranného plynu a pro měření atmosféry) a termočlánek. Muflová pec byla upravena pouze vyjmutím malé části izolace v oblasti dveří tak, aby bylo možné snadno vyvést vývody ven z pece a zároveň nebyla zhoršena teplotní izolace pece. Umístění retorty v peci je zobrazeno na obr. 9.

Mezi výhody použití retorty pro vypalování substrátů patří především to, že pro laboratorní účely poskytuje velmi dobrou plynotěsnost za zlomek ceny oproti plynotěsné peci. Další výhodou je možnost vyjmutí retorty z pece do běžné atmosféry kdykoliv během ohřevu či ochlazování pece, aniž by došlo k odpojení přívodu ochranné atmosféry nebo měření teploty uvnitř retorty. Tento postup najde uplatnění především tam, kde je výhodné rychlé, ale přesto kontrolované chladnutí vzorků za stálého udržování požadované atmosféry. Pokud by rychlost chladnutí po vyjmutí vyndání z pece byla příliš velká, je možné retortu přikrýt tepelně izolačním materiálem.



Obr. 9 Umístění plynotěsné retorty v muflové peci s otevřenými (vlevo) a zavřenými dveřmi pece (vpravo). Pod pecí je umístěn měřicí přístroj Keithley 2010, který slouží k převedení termoelektrického napětí termočlánku na teplotu.

Mezi výhody použití retorty pro vypalování substrátů patří především to, že pro laboratorní účely poskytuje velmi dobrou plynotěsnost za zlomek ceny oproti plynotěsné peci. Další výhodou je možnost vyjmutí retorty z pece do běžné atmosféry kdykoliv během ohřevu či ochlazování pece, aniž by došlo k odpojení přívodu ochranné atmosféry nebo měření teploty uvnitř retorty. Tento postup najde uplatnění především tam, kde je výhodné rychlé, ale přesto kontrolované chladnutí vzorků za stálého udržování požadované atmosféry. Pokud by rychlost chladnutí po vyjmutí vyndání z pece byla příliš velká, je možné retortu přikrýt tepelně izolačním materiálem.

Retorta má široké spektrum použití. Je vhodná pro aplikace, kde je požadována ochranná atmosféra interního plynu (dusík, argon) při zachování nízké koncentrace ostatních plynů (např. kyslíku).

Vzorky jsou vloženy na dno retorty nebo do speciálního držáku a po uzavření víka je celek vložen do muflové pece. V peci je regulátorem nastaven požadovaný teplotní profil a k vývodům retorty je připojena hadička, která přivádí dusík čistoty 5.0 z tlakové láhve. Na druhý vývod je v případě potřeby měření atmosféry uvnitř retorty připojena hadička vedoucí

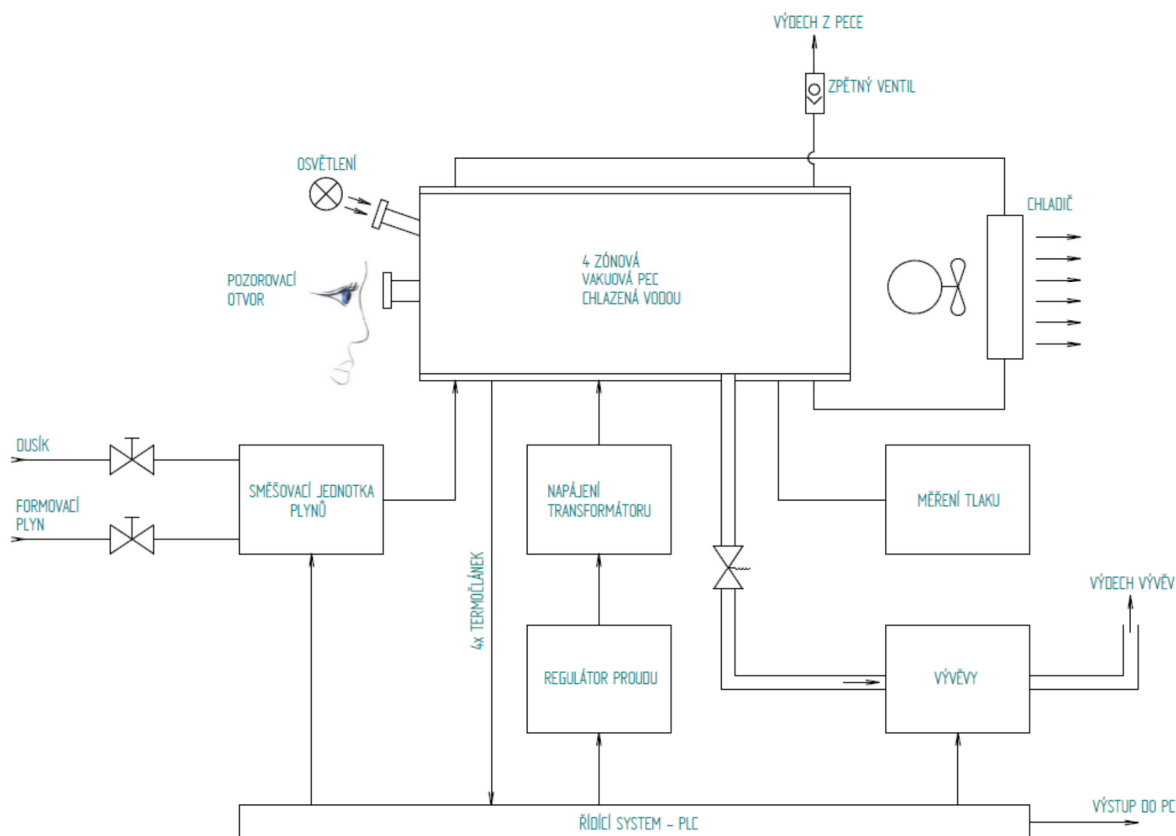
k analyzátoru plynu. Termočlánek je připojen k měřicímu přístroji Keithley 2010, který převádí termoelektrické napětí na teplotu ve stupních Celsia.

Od počátku ohřevu je do retorty vháněn dusík, protože měď začíná oxidovat při poměrně nízkých teplotách. Maximální teplota v peci při výpalu se pohybuje od 940 °C do 990 °C, což je více, než jsou doporučené teploty výpalu pasty výrobcem. Teplota v retortě je vždy nižší kvůli tepelným ztrátám při přestupu tepla z pece do retorty a kvůli ochlazování vháněným plynem. Čím je průtok dusíku vyšší, tím je i větší gradient teplot mezi teplotou mimo retortu v peci a teplotou u testovacích vzorků. Proto je také potřeba zvýšit nastavenou maximální teplotu na regulátoru pece s rostoucím průtokem dusíku při zachování stejné teploty v oblasti, kde jsou umístěny vzorky, proto je také v retortě umístěn termočlánek pro měření teploty.

Po ukončení ohřevu je možné za použití speciálního držáku retortu vyjmout z pece. Během manipulace s retortou i při jejím chladnutí na vzduchu je uvnitř neustále udržována požadovaná atmosféra (není odpojen přívod plynu). Při poklesu teploty v retortě ideálně až pod 50 °C lze odpojit přívod ochranné atmosféry, otevřít retortu a vyjmout vzorky.

4.4.2 Vypalování ve vakuové peci

V návaznosti na dobré výsledky výpalu v plynotěsné retortě byla ve spolupracující společnosti ELCERAM zakoupena nová komorová pec. Po řadě konzultací bylo zvoleno netradiční řešení, které kombinuje výpal ve vakuu a v dusíkové atmosféře. Konstrukce pece je podobná vakuovým pecím. Materiály jsou z nerezavějící oceli, keramiky, případně tantalu. Nepoužívají se keramické vyzdívký, které jsou zdrojem znečištění kyslíkem, vodní parou a dalšími plyny. Kombinace nízkého tlaku a vháněného dusíku v prostoru pece umožňuje dosáhnout nízkého parciálního tlaku kyslíku, vodní páry a dalších nečistot. Nízký parciální tlak kyslíku je nezbytný pro vypálení pasty, určené pro tlusté vrstvy, s dostatečnou adhezí a bez nežádoucích oxidů. Pec umožňuje také optické pozorování vzorků při výpalu. Schéma pece je zobrazeno na obr. 10.



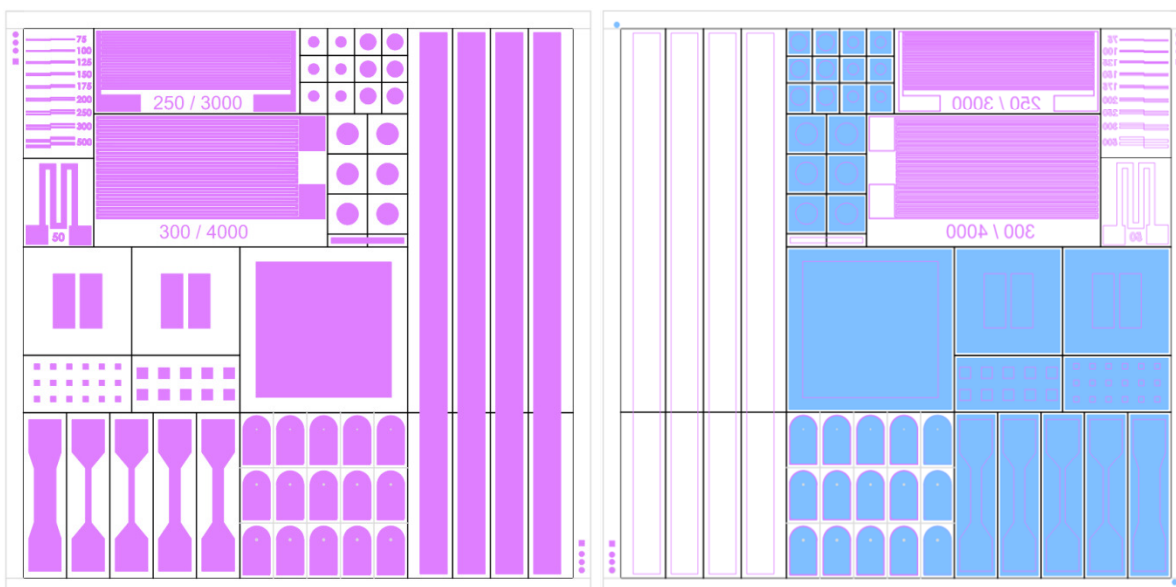
Obr. 10 Blokové schéma vakuové pece v a.s. ELCERAM.

Princip výpalu ve vakuové peci je následující. Pec je naplněna vzorky, které jsou umístěny zpravidla ve speciálních držácích. Klíčové je pročistit vnitřní prostor retorty pece a přilehlé příslušenství od možných nečistot vzniklých při předchozím výpalu a v době, kdy byla pec otevřená pro manipulaci se vzorky. Pročištění pece je docíleno napuštěním pece dusíkem a vakuováním, což je několikrát cyklicky zopakováno. Po vyčištění pece může začít vlastní teplotní profil výpalu. Během zvyšování teploty je v peci udržováno vakuum na úrovni nejčastěji desítek až stovek mbar, přičemž je do pece vhnán dusík čistoty 5.0 průtokem od 1 l/min do 10 l/min. Tato atmosféra je v peci udržována během celého výpalu, dokud teplota neklesne pod hodnotu, při které dochází k oxidaci mědi.

Výhodou pece je především možnost udržení nízkého parciálního tlaku kyslíku během výpalu tak, aby byla měď v oblasti stability (dle obr. 2), to znamená, že samovolně neoxiduje a v případě zoxidované vrstvy dojde k redukci oxidu na čistou měď. Díky tomu je možné dosáhnout kvalitního výpalu s adekvátní adhezí měděné vrstvy ke korundu.

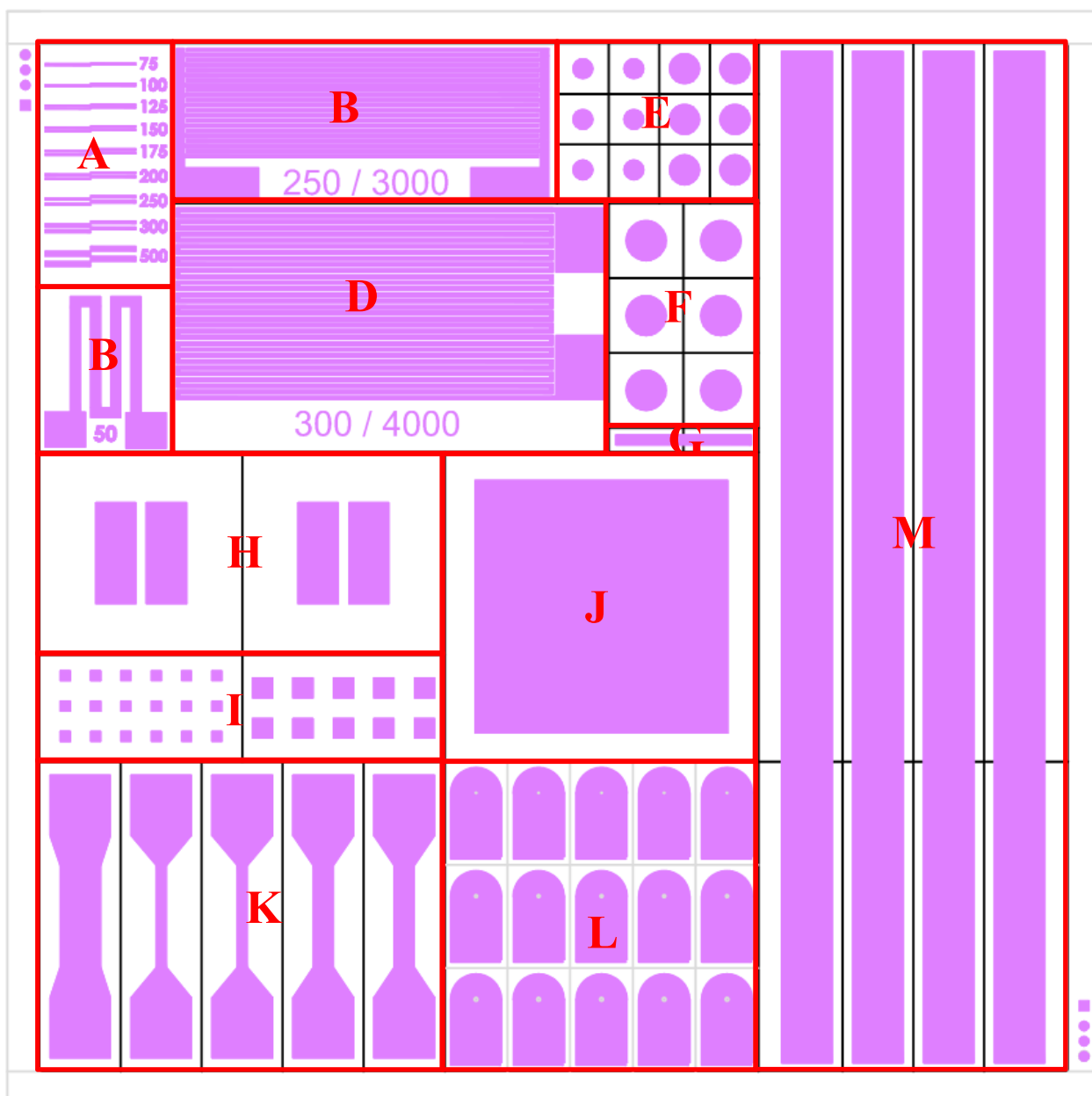
5 Metodika testování

Aby bylo možné testovat kvalitu výkonových substrátů, zejména pak těch, které jsou vytvářeny technologií tlustých vrstev, byla navržena celá řada testovacích motivů. Poslední verze univerzálního testovacího motivu je zobrazena na obr. 11. Fialovou a modrou barvou jsou označeny plochy, kde je vytvořena měděná vrstva. Šedě jsou zobrazeny linie, ve kterých je možné jednotlivé skupiny motivů od sebe oddělit. V těchto místech je substrát rýhován laserem. Vlevo na obr. 11 je zobrazena lícová strana s funkčním motivem a vpravo je v jednom obrázku zobrazen líc (fialově) i rub (modře). Motivy, které mají měděnou plochu i z druhé strany keramické destičky, jsou vyznačeny v pravé části obr. 11 modrou barvou.



Obr. 11 Testovací motiv líc (vlevo) a rub (vpravo). Fialová a modrá barva označuje oblasti, kde je natištěna měděná vrstva. Modrou barvou vpravo jsou vyznačeny oblasti, kde je natištěna měděná vrstva na rubové straně, růžové oblasti v pravé části obrázku jsou pouze pro lepší orientaci, aby bylo zřejmé, které motivy mají měď i z druhé strany substrátu, měď však v těchto místech na rubu tištěná není.

Na obr. 12 jsou písmeny vyznačeny stejné nebo podobné skupiny motivů, z nichž každá skupina slouží pro určité testovací úkony. Účel jednotlivých skupin motivů je přehledově uveden v tab. 4.



Obr. 12 Testovací motiv – vyznačení jednotlivých oblastí, účel každé oblasti je popsán v Tab. 4

Tab. 4 Účel skupiny testovacích motivů určených pro tisk tlustých vrstev na keramický substrát.

Motiv	Účel skupiny motivů, oblast testování, popis
A	Rozlišitelnost tisku
B	Rezistivita, meandr obsahující 50 čtverců
C	Povrchový odpor, interdigitální elektrody obsahující 3 000 čtverců mezery (1/3000 čtverce)
D	Rezistivita, meandr obsahující 4 000 čtverců
E	Zkoušky tahem
F	Zkoušky tahem
G	Zkoušky odlupováním
H	Metalografické výbrusy
I	Svařování drátků
J	Pájitelnost, prostor pro vytváření strukturovaných motivů subtraktivními technologiemi
K	Pájitelnost a proudová zatížitelnost
L	Pokovené otvory
M	Zkoušky odlupováním a gradient teploty

Vysvětlení metodiky testování je dále podrobněji popsáno pro každý testovací motiv. Výsledky některých experimentů na vybraných motivech jsou uvedeny v další části této práce, zejména pak v kap. 6.

Motiv A – Rozlišitelnost tisku

Technologií tlustých vrstev je možné dosahovat vysoké rozlišitelnosti tisku. Pro optické vyhodnocování tohoto parametru je určen první motiv. Motiv A obsahuje dvojici vodivých cest, které mají tloušťku od 75 μm do 500 μm . Mezi vodivými cestami je mezera, která má stejnou tloušťku jako vodivé dráhy. Označení této tloušťky je zobrazeno přímo v motivu vedle každé dvojice vodivých cest v mikrometrech. Běžným mikroskopem je možné pozorovat vypálenou měděnou vrstvu. Z výsledků pozorování vyplyne skutečnost, jaká je rozlišitelnost daného tisku. S rostoucím počtem natištěných vrstev se tato rozlišitelnost zpravidla zhoršuje.

Motiv B – Rezistivita, meandr obsahující 50 čtverců

Motiv B obsahuje meandr, který je určený pro měření rezistivity vypálené vrstvy. Obsahuje 50 čtverců a má tloušťku vodivé dráhy 1 mm. Motiv umožňuje měření rezistivity čtyřvodičovou metodou. Meandr je vhodný spíše pro méně vodivé pasty nebo pro situace, kdy není možné vytisknout a vypálit meandr, označený písmenem D, tak, aby v něm nedošlo nikde ke zkratu. Pro všechny ostatní případy je výhodnější použít pro měření rezistivity právě motiv D.

Motiv C – Povrchový odpor, interdigitální elektrody obsahující 3 000 čtverců mezery (1/3000 čtverce)

Interdigitální elektrody, obsažené v motivu C, mají izolační mezeru mezi jednotlivými „prsty“ 250 μm a celková délka mezery je 750 μm . Plocha mezery mezi „prsty“ obsahuje 3 000 čtverců. Tyto interdigitální elektrody je výhodné použít pro měření izolačního odporu. Tento odpor může být snížen například kontaminací keramiky mezi prsty různými látkami obsaženými v pastě, které mají snahu difundovat do keramiky dále od měděné vrstvy nebo dalšími nečistotami. Motiv C může být podobně jako motiv A a D použit také pro optické pozorování rozlišitelnosti tisku. Při tisku jedné vrstvy se rozlišitelnost pohybuje kolem 100 μm , při tisku více vrstev tato rozlišitelnost však klesá až k hodnotám kolem 250 μm až 400 μm . Právě pro tyto situace je výhodné použít kromě motivu A také motivy C a D kvůli velké oblasti, ve které by měla být vzdálenost mezi vodivými obrazci konstantní. Zda nedošlo ke zkratu u tohoto motivu je možno snadno ověřit použitím ohmmetru.

Motiv D – Rezistivita, meandr obsahující 4 000 čtverců

Motiv, označený písmenem D, je určený zejména pro měření rezistivity. Tento motiv obsahuje meandr tvořený měděnou vrstvou, který obsahuje 4 000 čtverců. Šířka vodivé vrstvy je 300 μm , délka meandru je 1,2 m. Je navržený tak, aby odpor, měřený čtyř – vodičovou metodou, byl v jednotkách nebo při větší tloušťce vodivé vrstvy v desetínách ohmu a byl tak snadno měřitelný. Meandr je také možno použít pro optická pozorování rozlišitelnosti tisku. Měření s využitím tohoto motivu jsou uvedena v kap. 6.6.

Motiv E a F – Zkoušky tahem

Vodivé obrazce obsažené v těchto dvou motivech mají všechny stejnou funkci a slouží k měření adheze měděné vrstvy na keramickém substrátu. Lícová strana těchto motivů obsahuje kruhy, tvořené vodivou vrstvou, o průměru 2 mm, 3 mm a 4 mm. Rubová strana obsahuje čtverec z mědi, který má rozměry jako celý jeden segment, který je ohraničený šedými čarami

pro rýhování laserem. Testování probíhá tak, že k lícové straně je připájen váleček z mědi nebo mosazi o stejném nebo větším průměru, než je průměr kruhu vodivého motivu. K rubové straně je připájen hranol nebo váleček tak, aby plocha, na které je připájen, byla výrazně větší nežli pájená plocha na lícové straně. V trhacím zařízení pak probíhá zkouška adheze tahem. Princip této zkoušky je blíže popsán v kap. 6.10.1.

Motiv G – Zkoušky odlupováním

Tento motiv je určen pro rychlé orientační zjištění adheze odlupování vodivé vrstvy od korundu. Motiv je uprostřed rýhován laserem, a je ho tak možné zlomit tak, aby nedošlo k přetržení vodivé vrstvy. K přetržení vodivé vrstvy dochází spíše u tenkých vrstev mědi, proto je vhodné tento motiv použít pro tloušťky měděných vrstev větších než 100 μm . Po zlomení substrátu je nutné ohnout měděnou vrstvu o 90° nebo 180 ° a táhnout tak, aby docházelo k odlupování měděné vrstvy od keramiky. Síla, která je potřebná pro odloupení měděné vrstvy, je úměrná adhezi a často také kvalitě výpalu.

Motiv H – Metalografické výbrusy

Motivy H jsou do jisté míry univerzální a lze je použít pro více testů. Primárně jsou určeny pro metalografické výbrusy. Zpravidla uprostřed motivu je veden řez tak, aby procházel oběma měděnými plochami. Po vytvoření metalografického výbrusu je možné leptat povrch leptadlem, které je blíže specifikováno v kap. 6.2. Leptání umožňuje mimo jiné zvýraznit hranice zrn. Metalografické výbrusy jsou opticky vyšetřovány konfokálním nebo elektronovým mikroskopem. Příklady výsledků jsou uvedeny v kap. 6.1 a kap. 6.2. Z výbrusů lze mimo jiné zjistit například tloušťku měděné vrstvy, velikost měděných zrn, množství dutin, skelné fáze a oxidů nebo elektronovou mikroskopií (analyzátor EDS) také prvkové složení.

Tento motiv může být také určen například pro připájení dvoj – vývodové součástky a jejímu dalšímu testování, pro testování ultrazvukového svařování apod.

Motiv I – Svařování drátků

Pro testování např. termokompresního, ultrazvukového nebo termosonického svařování jsou určeny čtverce v motivu I. Jednotlivé čtverce je zde možné svařováním propojit drátky. Na první a poslední čtverec je poté připojeno elektrické napětí a měřen protékající proud. Dle vypočteného odporu je možné určit kvalitu přivařených drátků. Testování svárů je také možno provádět na trhacím zařízení tak, že drátky jsou namáhány prostřednictvím háčku silou, dokud nedojde k přetržení. Průběhu tohoto testu, ale na jiných motivech, je věnována pozornost v kap. 7.3.1.

Motiv J – Pájitelnost, prostor pro vytváření strukturovaných motivů subtraktivními technologiemi

Tento motiv je do jisté míry univerzální. Obsahuje plochu 25 mm x 25 mm, která umožňuje opticky ověřit, zdali použitá technologie umožňuje vytvářet takto velké plochy. Na ploše je možné testovat pájitelnost nebo vytvářet strukturované motivy subtraktivními technologiemi, jako je například chemické leptání. Dále je také možné tento motiv využít pro zjištění homogenity vrstvy a kvalitu a homogenitu následných povrchových ochranných vrstev jako je např. ENIG.

Motiv K – Pájitelnost a proudová zatížitelnost

Motivy K mají dvě hlavní oblasti použití. První oblastí je testování pájitelnosti metodou smáčecích vah nebo zkouškou ponořením do pájky. Pájitelnost je ovlivněna především oxidy na povrchu mědi. Testy pájitelnosti jsou blíže popsány v kap. 6.11.

Druhou oblastí použití těchto motivů je měření proudové zatížitelnosti. K oběma velkým plochám každého jednotlivého obrazce je přivedeno elektrické napětí z proudového zdroje s rozsahem několika desítek ampér. Termočlánekem, teplotním čidlem nebo termokamerou je poté měřena teplota nejužšího místa každého obrazce. Šířka nejužšího místa je 1 mm, 2 mm a 4 mm. Výsledkem tohoto měření je oteplení nejužšího místa vodivé dráhy v závislosti na procházejícím proudu. Tento parametr je důležitý pro výkonové aplikace, kde se pracuje s vysokými proudy.

Motiv L – Pokovené otvory

Motiv L je navrhnout pro testování pokovených otvorů, které mají v jednotlivých místech motivu různé průměry od 0,15 mm do 0,35 mm. Opticky a elektricky je vyhodnocováno propojení obou stran potištěného substrátu.

Motiv M – Zkoušky odlupováním a gradient teploty

Poslední motiv má podobný účel jako motiv G s tím rozdílem, že tento motiv je určen pro automatizovaný test v trhacím zařízení. Keramika je v místě, kde prochází rýha, vytvořená laserem z druhé strany keramiky, nežli je měděný motiv, zlomena. Měděná vrstva je ohnuta v úhlu 180° a upnuta do trhacího zařízení. Rychlostí 50 mm·min⁻¹ se od sebe vzdalují čelisti s upnutým vzorkem a přitom je měřena a zaznamenávána síla působící na vzorek. Z průběhu zkoušky se poté vyjádří průměrná síla, která je potřebná k odloupení měděné vrstvy. Šířka měděného proužku je 5 mm. Měření síly potřebné k odloupení mědi od keramiky je blíže popsáno v kap. 6.10.2.

Motiv M může být také použit pro měření gradientu teploty v délce. Na jeden konec měděného proužku je připájena výkonová součástka, která se po připojení ke zdroji elektrické energie zahřívá. Teplo se distribuuje do délky celého proužku. Gradient teploty může být měřen termočlánkem, teplotním čidlem nebo termokamerou. V případě měření termokamerou je vhodné měřenou oblast opatřit černou vrstvou s definovanou emisivitou a usnadnit tak určení emisivity měřeného vzorku. Praktické využití tohoto motivu je popsáno v kap. 6.9.1.

6 Testování vzorků

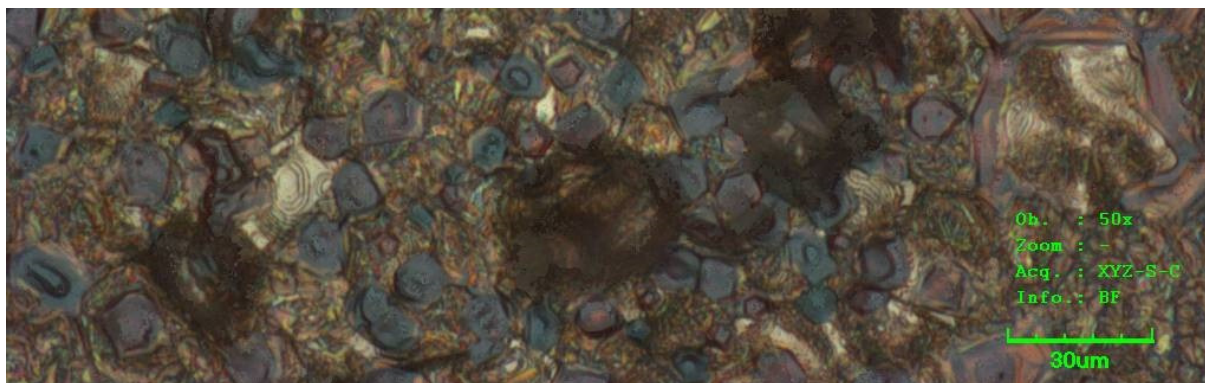
Pro testování vlastností vzorků vypálených měděných past byly natisknuty a vypáleny různé testovací motivy umožňující testování vybraných parametrů. Nejvíce používaným motivem byl univerzální testovací motiv, uvedený v kap. 5. Podle postupu testování, který je uveden v této kapitole, také probíhalo měření a vyhodnocování výsledků. Pozornost byla věnována především substrátům s tlustou vrstvou mědi (TPC), některé testy byly však také uskutečněny na substrátech, vyrobených technologií DBC. Nejdůležitější parametry vypálené měděné pasty jsou popsány v následujících podkapitolách.

6.1 Metalografické výbrusy a snímky povrchu vzorků

Při optimalizování procesů výpalu vzorků DBC a TPC substrátů v plynotěsné retortě i ve vakuové peci byly jedním z hlavních hodnotících kritérií metalografické výbrusy a snímky povrchu měděných vrstev. Z řezu vzorků bylo možné určit celou řadu parametrů. Vybrané snímky a výsledky z metalografických výbrusů jsou uvedeny v této kapitole. Na konci popisu každého obrázku je vždy uveden mikroskop, kterým byl snímek pořízen, a základní nastavené parametry mikroskopu.

6.1.1 Výpaly v plynotěsné retortě

Plynotěsná retorta byla použita pro většinu prvotních experimentů s výpalem natištěných tlustých vrstev na korundovém substrátu. Retorta byla vyvinuta pro laboratorní testování a je blíže popsána v kap. 4.4.1. Do retorty byl během výpalu vháněn dusík s regulovaným průtokem. Platí, že čím vyšší průtok vháněného dusíku, tím nižší parciální tlak kyslíku a tím také menší oxidovatelnost povrchu, což dokumentují následující dva snímky povrchu vrstev. Kyslík může do retorty vnikat z jejího okolí, odplyňováním stěn retorty a také odplyňováním vypalovaných vzorků, případně jejich držáků. Z obr. 13 a obr. 14 je zřejmé, že povrch měděné vrstvy vypálené při průtoku dusíku 15 l/min je pokryt tlustší vrstvou oxidů nežli vzorek vypálený při průtoku 25 l/min.

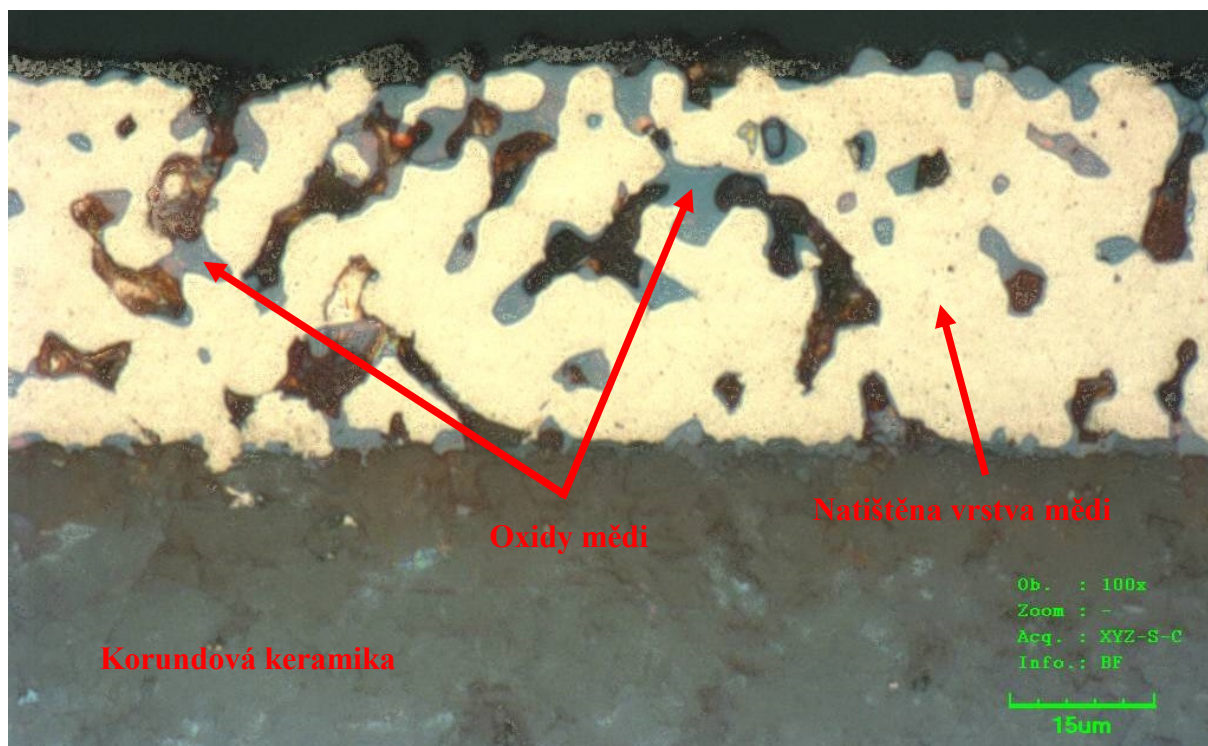


Obr. 13 Povrch měděné vrstvy, která byla vypálena při průtoku dusíku 15 l/min. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.



Obr. 14 Povrch měděné vrstvy, která byla vypálena při průtoku dusíku 25 l/min. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

Na obr. 15 a obr. 16 je uvedeno porovnání vzorků vypálených v plynotěsné retortě při průtoku dusíku 15 l/min a 25 l/min tentokrát na metalografickém výbrusu. Žluto – oranžové oblasti vyznačují měď, světle modré oxidy mědi, šedá barva ve spodní části obrázků patří keramickému substrátu a modrošedá na rozhraní mědi a keramiky patří tenké vrstvě, která je tvořena převážně oxidem mědi. Stanovení prvkového složení jednotlivých oblastí je uvedeno v kap. 6.2. Vrstva oxidu se podílí na adhezi mědi s korundovou keramikou, zejména s její skelnou fází. Z obrázků je zřejmé, že vyšší průtok dusíku má pozitivní vliv na nižší pórovitost v měděné vrstvě a dále také na menší množství oblastí s oxidy mědi. Průtok dusíku do retorty má však svá omezení. Při vyšším průtoku než 25 l/min již dochází k velmi nerovnoměrnému rozložení teploty v retortě a tím pádem i k nerovnoměrnému výpalu měděné vrstvy, což má za následek mimo jiné například zhoršenou adhezi některých oblastí substrátu. Velký průtok dusíku rovněž není pro výrobu substrátů ekonomický výhodný.



Obr. 15 Metalografický výbrus měděné vrstvy – vypáleno při průtoku dusíku 15 l/min. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.



Obr. 16 Metalografický výbrus měděné vrstvy – vypáleno při průtoku dusíku 25 l/min. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

6.1.2 Výpaly ve vakuové peci

Snímek povrchu vypáleného vzorku ve vakuové peci, který byl natištěn čtyřmi vrstvami pasty Heraeus C7403 a dvěma vrstvami pasty Heraeus C7720, je zobrazen na obr. 17. Metalografický výbrus téhož vzorku je zobrazen na obr. 18. Z obrázků je zřejmé, že výpalem pasty ve vakuové peci je možné dosáhnout nižší tvorby oxidů na povrchu mědi a nižší tvorby dutin v objemu mědi.



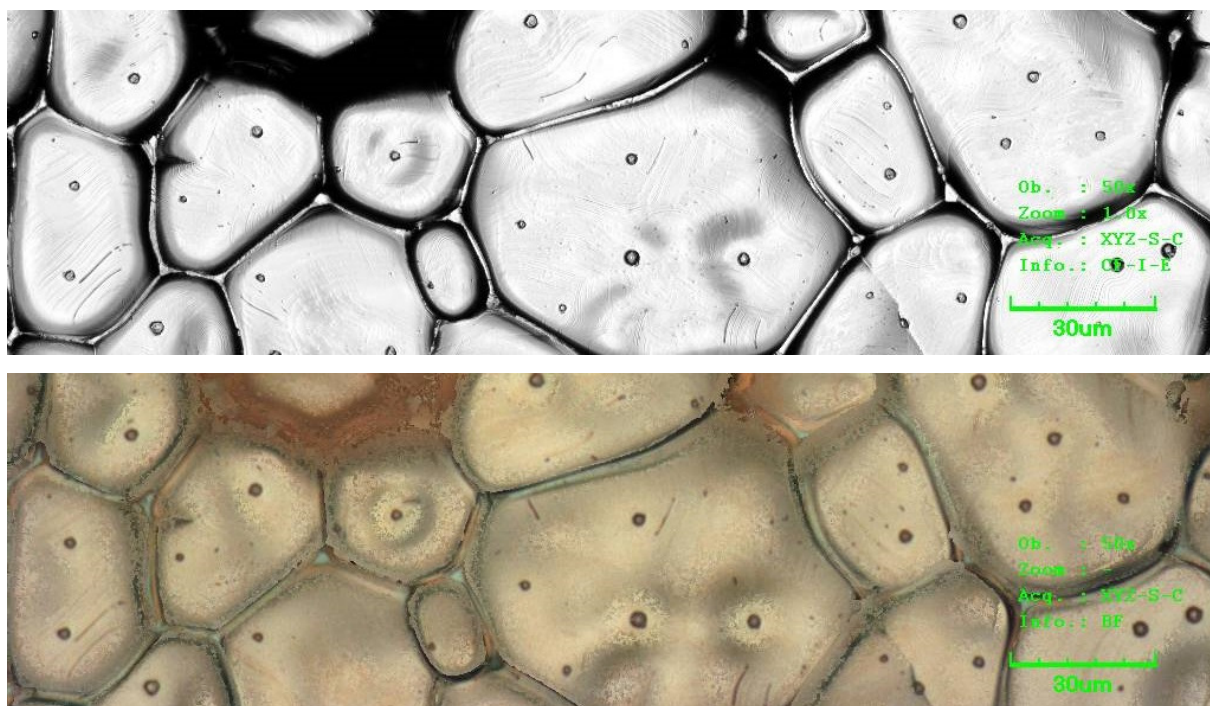
Obr. 17 Povrch měděné vrstvy, která byla vypálena ve vakuové peci. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.



Obr. 18 Metalografický výbrus měděné vrstvy, která byla vypálena ve vakuové peci. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

6.1.3 Výpal v průběžné peci Heraeus

Společností Heraeus byly poskytnuty vypálené vzorky pro porovnání s našimi výpaly. Výpal ve společnosti Heraeus probíhá v průběžné peci, která umožňuje velmi urychlit celý proces výpalu. Průběžná pec, jejíž výrobcem je společnost BTU, je však určena pouze pro větší sériovou výrobu a její pořizovací náklady i náklady na provoz jsou vysoké. Na obr. 19 je zobrazen povrch vypálené měděné vrstvy. Z obrázku je zřejmé, že zrna mědi jsou velmi velká a při tloušťce vypálené vrstvy cca 30 μm je přítomno z pravidla pouze jedno až dvě zrna na tloušťku vrstvy. To je velmi málo a je to způsobeno pravděpodobně příliš vysokou teplotou při výpalu. Zrna jsou rovněž zakulacená, což odpovídá příliš vysoké teplotě při výpalu. Velikost zrn nepříznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti vrstvy. Výsledná vrstva obsahující velká zrna není tažná a snadno se na hranicích zrn láme.

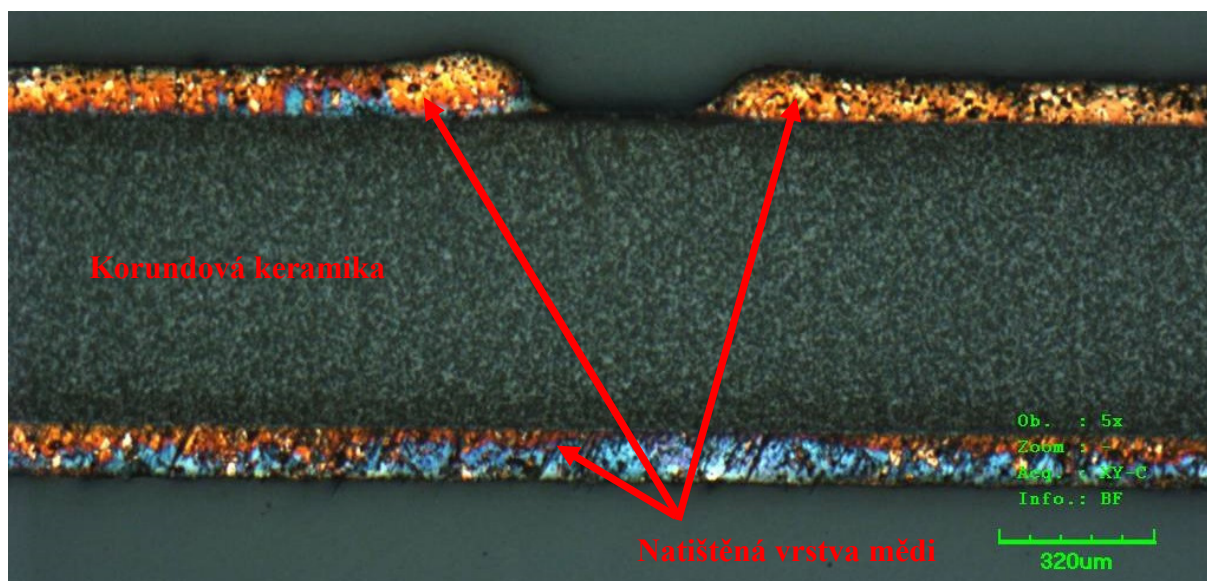


Obr. 19 Povrch měděné vrstvy, která byla vypálena v průběžné peci ve společnosti Heraeus. Horní obrázek nasnímán mikroskopem Olympus OLS 3000; konfokální mód, světlé pole. Dolní obrázek nasnímán mikroskopem Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

6.2 Elektronová mikroskopie

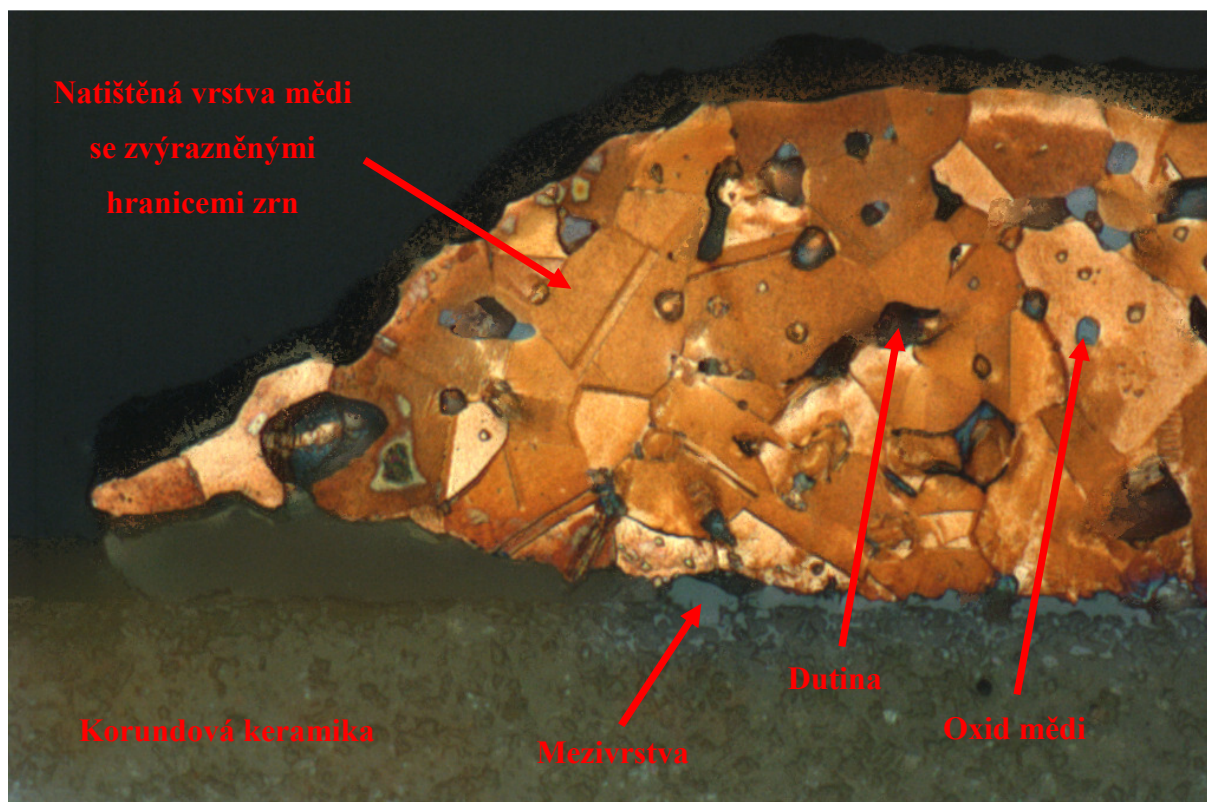
Pro získání prvkové analýzy na elektronovém mikroskopu byly připraveny metalografické výbrusy korundového substrátu s tlustou vrstvou mědi. Tyto výbrusy byly naleptány a jejich snímky z konfokálního mikroskopu jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

Použité leptadlo bylo složeno z 10% roztoku peroxodisíranu amonného ve vodě. Výbrus byl ponořen do leptacího roztoku po dobu 30 s, následoval oplach vodou, mytí v ultrazvukové vodní lázni a sušení tlakovým vzduchem.



Obr. 20 Metalografický výbrus po leptání u oboustranně potištěné korundové destičky pastou Heraeus C7720. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

Na obr. 21 je vidět několik odlišně barevných oblastí, kde oranžová barva vyznačuje měděnou vrstvu, ve které jsou různě barevné oblasti, které symbolizují dutiny nebo oxidy a jiné příměsi. Šedo zelenou barvou ve spodní části je vyznačen keramický substrát a šedá oblast mezi keramickým substrátem a mědí vyznačuje mezivrstvu vzniklou při výpalu měděné vrstvy v peci. Na snímku jsou také díky naleptání dobře patrná krystalická zrna mědi s různou orientací.

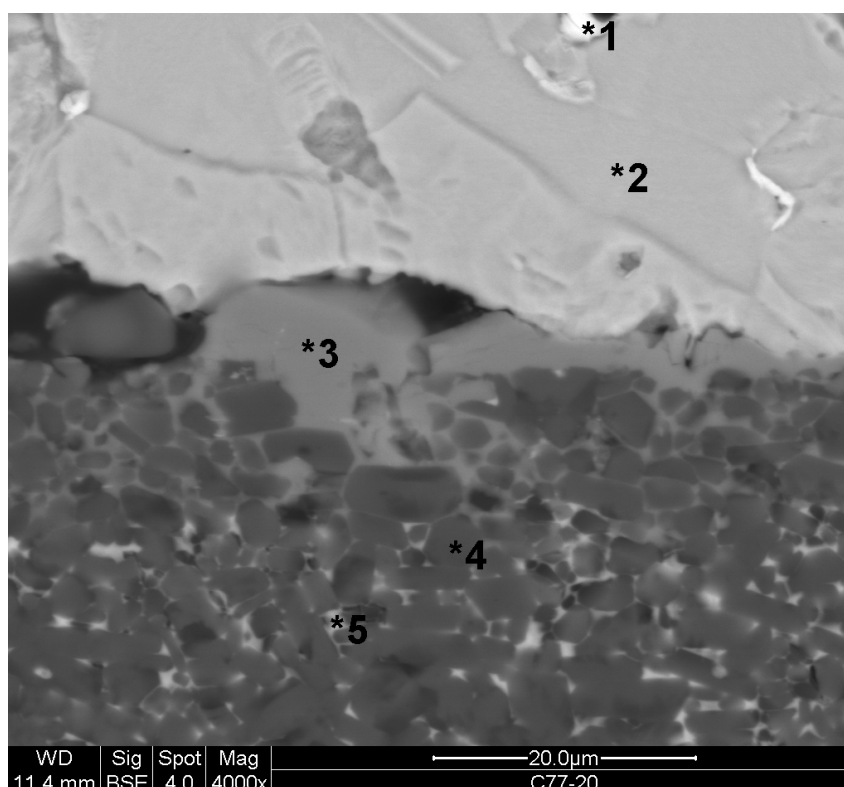


Obr. 21 Metalografický výbrus po leptání nasnímaný laserovým konfokálním mikroskopem LEXT. Detail okraje, který se odloupl při výpalu. Olympus OLS 3000; barevný mód, světlé pole.

Skenovacím elektronovým mikroskopem, metodou EDS (Energ Disperzní Spektrometrie) bylo zjištěno prvkové složení v několika místech, která jsou označena na obr. 22.

Energ Disperzní Spektrometr (EDS) funguje na principu měření energie rentgenového záření, které je vyvolané dopadem primárního elektronu na valenční elektron prvku. Každý prvek má jiné spektrum rentgenového záření a podle typu a kvanta rentgenového záření je určen typ a množství prvku ve vzorku.

Vybrané výsledky prvkového složení jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Z výsledků je zřejmé, že vypálená měděná vrstva pasty Heraeus C7720 je složena převážně z čisté mědi, avšak některé malé oblasti obsahují prvek bismut včetně jeho oxidů a také další oxidy, převážně oxidy mědi. Měděná vrstva obsahuje také značné množství dutin. Oxidy mědi jsou kromě povrchu koncentrovány na rozhraní mezi měděnou vrstvou a korundovým substrátem, kde tvoří adhezni vrstvu.

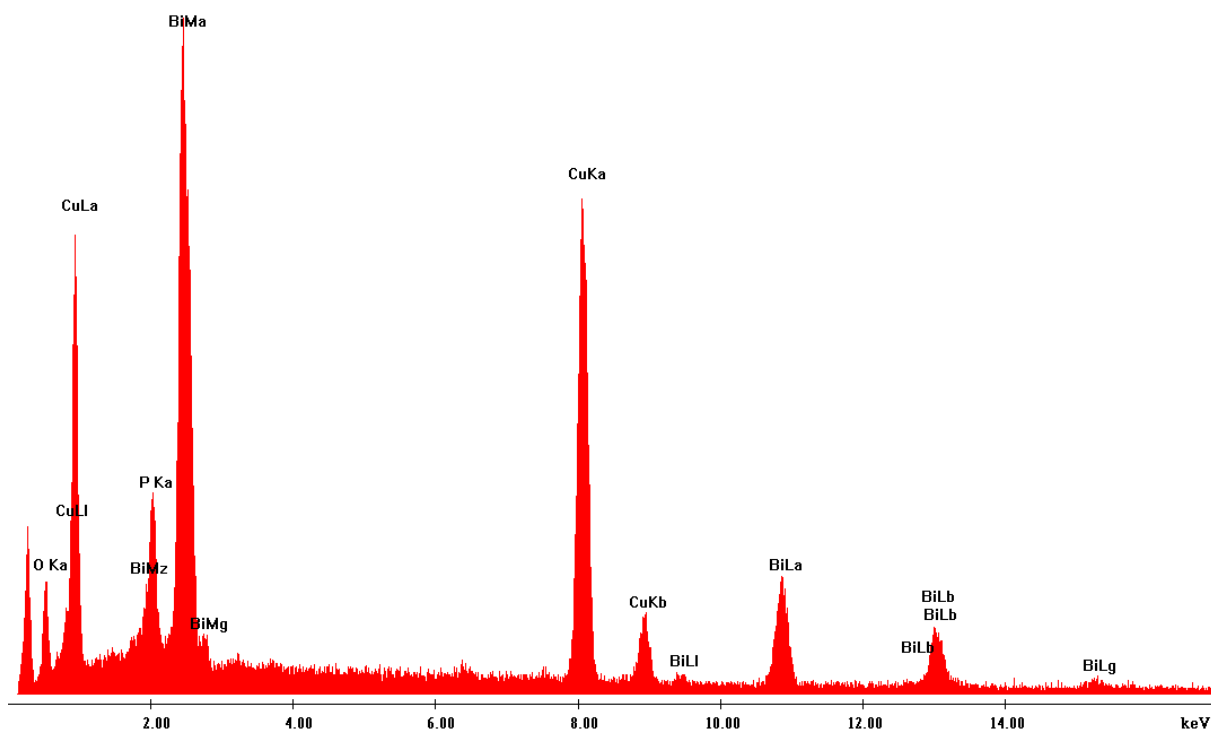


Obr. 22 Snímek z elektronového mikroskopu s vyznačením významných oblastí (hvězdičkou a číslem), ve kterých bylo zjišťováno prvkové složení. SEM JEOL JSM-7600F; BSE detektor; mód s redukcí náboje.

Prvkové složení ve vyznačených pěti místech je uvedeno v tab. 5. Na obr. 23 je uvedeno prvkové složení v oblasti, která byla na obr. 22 označena jako 1. Prvkové složení ve zbylých místech je zobrazeno na obrázcích v příloze (obr. I až obr. IV). Zajímavé jsou především oblasti bohaté na prvek bismut, které jsou zobrazeny bílou barvou, podobně jako oblast č. 1.

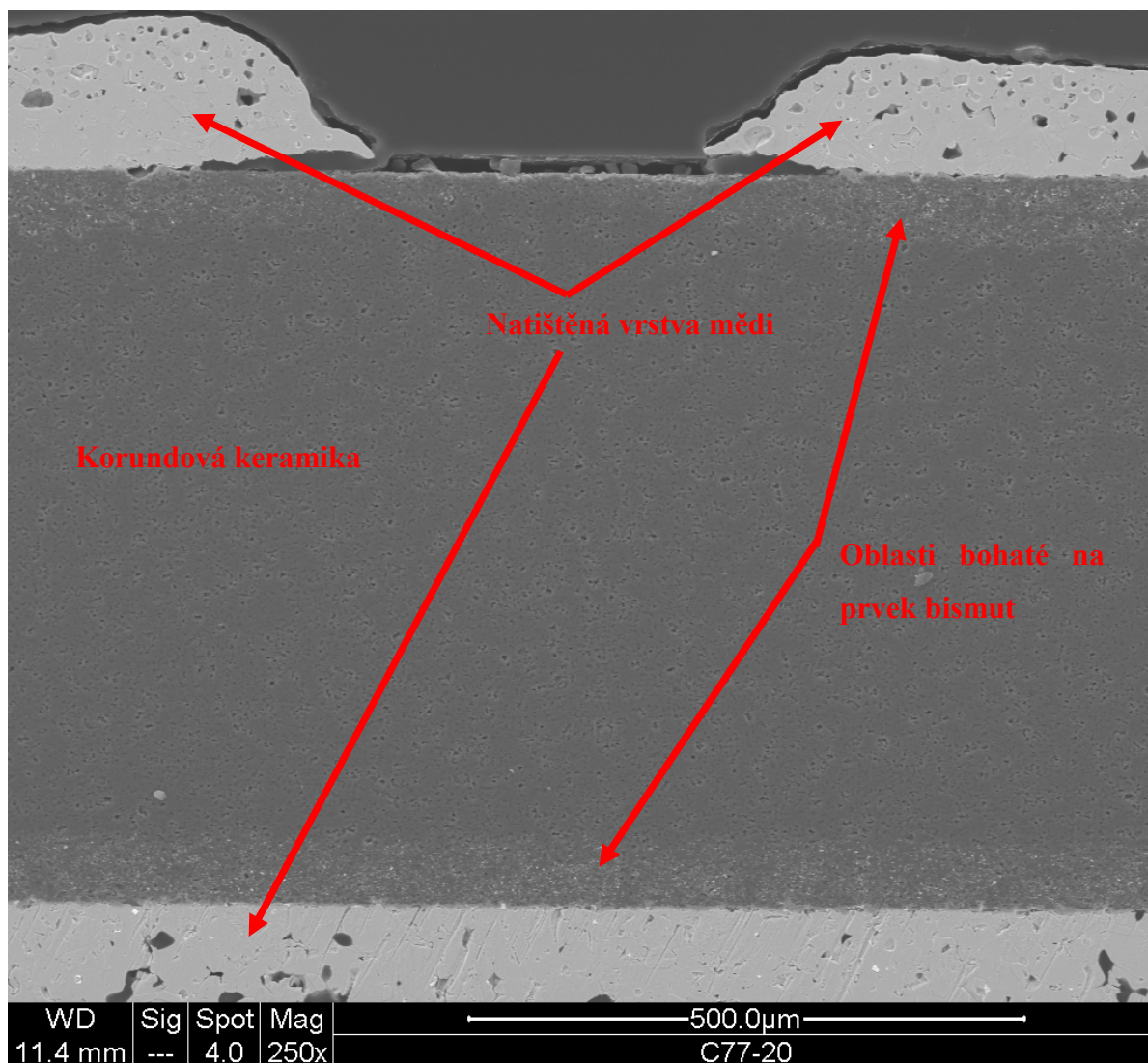
Tab. 5 Prvkové složení metalografického výbrusu v různých místech u vzorku, kde je vodivá vrstva tvořena pastou Heraeus C7720.

Oblast měření	Prvkové složení seřazené podle četnosti		
1	Bi	Cu	
2	Cu		
3	Cu	Al	O
4	Al	O	
5	Al	O	Bi



Obr. 23 Spektrum změřené EDS analyzátozem odpovídající prvkovému složení v oblasti číslo 1 na obr. 22.

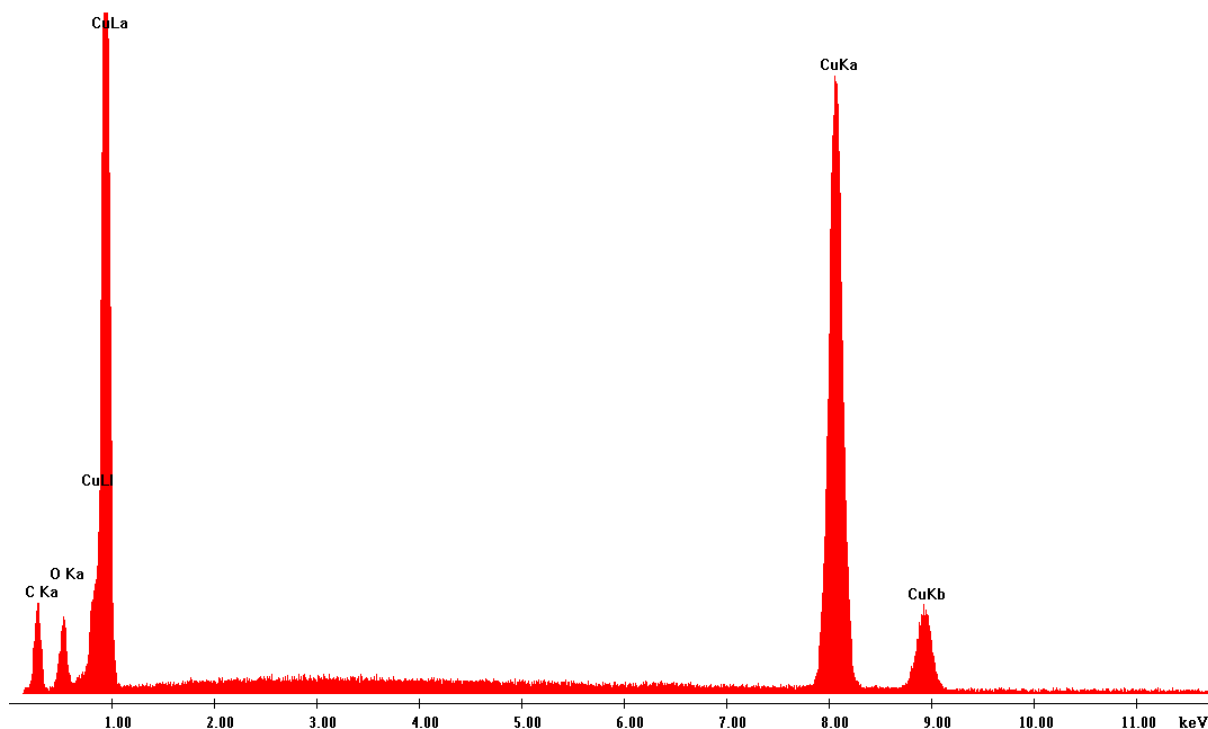
Bismut s rozpuštěnými dalšími složkami, který byl ve formě oxidu obsažen v měděné pastě, difunduje také do keramického substrátu až do vzdálenosti cca 200 μm , jak ukazuje obr. 24. Je zde zobrazen keramický substrát, který je z obou stran opatřen měděnou vrstvou. Na okraji keramického substrátu je možno vidět bílé oblasti, které obsahují ve zvýšené míře prvek bismut.



Obr. 24 Metalografický výbrus keramiky potištěné tlustou vrstvou mědi (Heraeus C7720) zobrazený elektronovým mikroskopem. Bílou barvou jsou zobrazeny oblasti, kde je obsažen prvek bismut. SEM JEOL JSM-7600F; BSE detektor; mód s redukcí náboje.

Snahou je dosáhnout co nejnižšího množství oxidů v měděné vrstvě, které ovlivňují všechny elektrické i tepelné vlastnosti měděné vrstvy k horšímu. Předějit vzniku oxidů lze udržením parciálního tlaku kyslíku v poli stability mědi dle fázového diagramu Cu – O zobrazeném na (obr. 2) Prvkové složení oblasti s oxidy je uvedeno na obr. 25.

Label A:

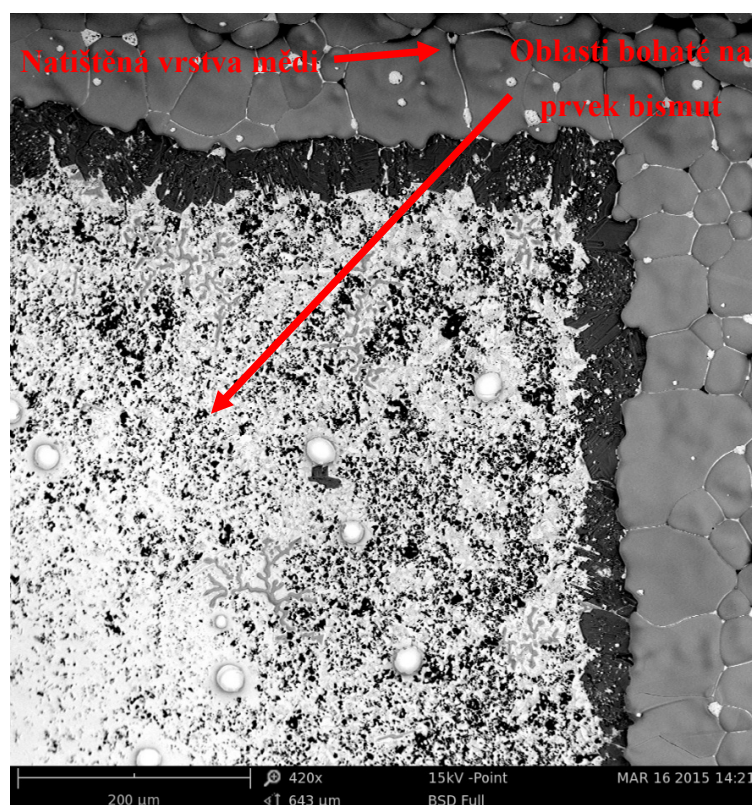


Obr. 25 Prvkové složení v oblasti bohaté na oxidy mědi.

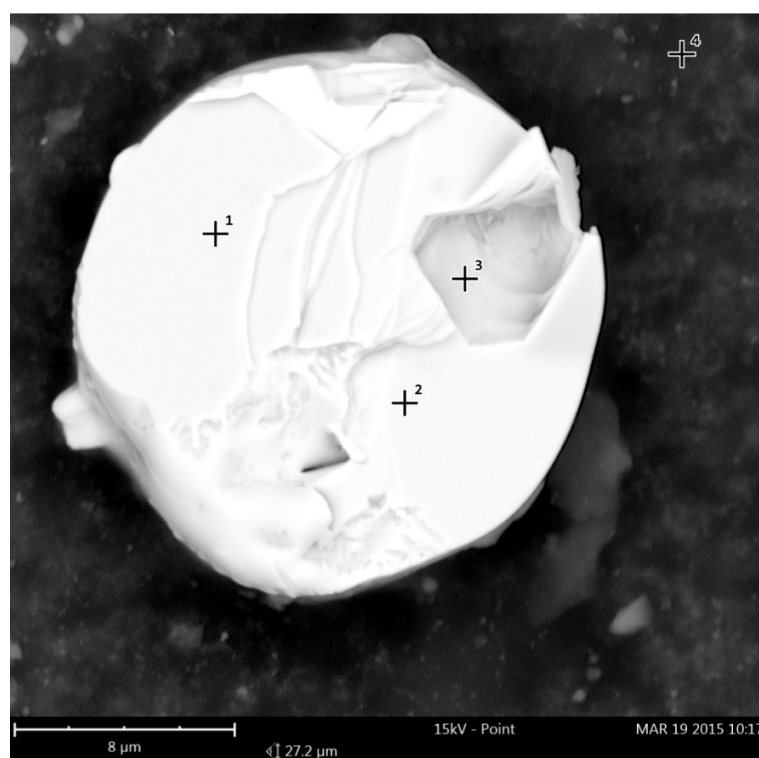
Oblasti bismutu

Při vypálení osmi vrstvé měděné vrstvy s pastou Heraeus C7720 ve vakuu (výpal první vrstvy + tisk dalších sedmi vrstev následovaný druhým výpalem) vznikly na keramickém substrátu kolem mědi oblasti bohaté na prvek bismut. Tento jev je znázorněn na obr. 26.

Oblast bohatá na prvek bismut má na obrázku bílou barvu. V této oblasti se nacházejí kuličky (obr. 27), které se skládají převážně z prvku bismutu. Tato kulička byla uhlíkovou páskou sejmuta z testovaného substrátu a podrobena prvkové analýze. V oblastech č. 1 až č. 3 označených křížkem je obsažen převážně z cca 83 % prvek bismut. Zbytek tvoří měď, oxidy mědi, bismutu a menší množství dalších prvků.

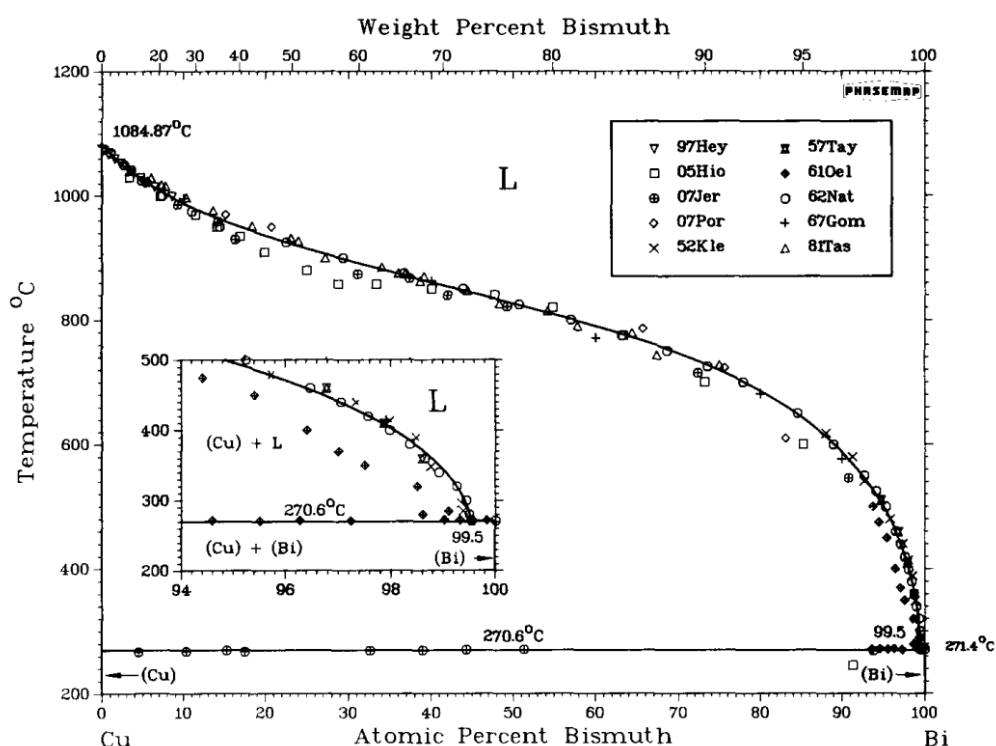


Obr. 26 Snímek z prvkové EDS analýzy vypálené osmivrstvé měděné vrstvy Heraeus C7720, kde je dobře patrná oblast bohatá na prvek bismut. Prvek bismut je v obrázku vyznačen bílou barvou. SEM PHENOM PROX; BSE detektor; mód s redukcí náboje.



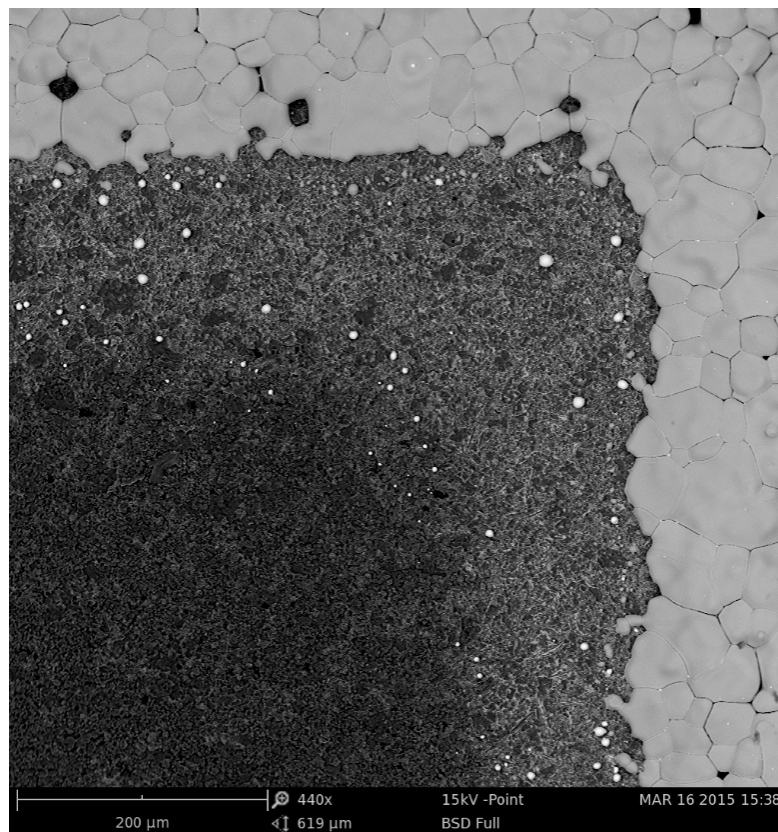
Obr. 27 Kulička bohatá na prvek bismut – jedná se o přiblížení jedné z bílých kruhových oblastí na obr. 27. SEM PHENOM PROX; BSE detektor; mód s redukcí náboje.

Bismut vznikl redukcí Bi_2O_3 při výpalu za sníženého tlaku v ochranné atmosféře. Teplota tání bismutu je $271,3\text{ }^\circ\text{C}$ [48], a kuličky bismutu tak byly při chladnutí během vypalovacího procesu relativně dlouhou dobu v roztaveném stavu a umožnily do sebe rozpouštět i další prvky. Destičková struktura v kuličce bismutu na obrázku je typická pro rombicky krystalizující bismut. Měď obsažená v bismutu může být způsobena existencí eutektika Bi – Cu. Eutektická teplota je $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ až $0,8\text{ }^\circ\text{C}$ pod teplotou tání bismutu při přibližně 99,5 at. % Bi. Z průběhu křivky likvidu na obr. 28 je vidět, že se měď v roztaveném bismutu rozpouští, např. při obsahu bismutu cca 6 at. % při teplotě $500\text{ }^\circ\text{C}$. [49] V kapce bismutu může být tedy měď přítomna jako primárně vyloučené zrno mědi z taveniny.



Obr. 28 Fázový diagram systému Cu – Bi [převzato z 49]

Při výpalu jedné vrstvy je oblast obsahující prvek bismut na keramice kolem mědi podstatně menší a méně koncentrovaná na tento prvek a oxidy kovů, jak je patrné z obr. 29. Je tedy zřejmé, že množství skelné fáze, které se rozšiřuje směrem od měděné vrstvy, roste s rostoucí tloušťkou měděné vrstvy.



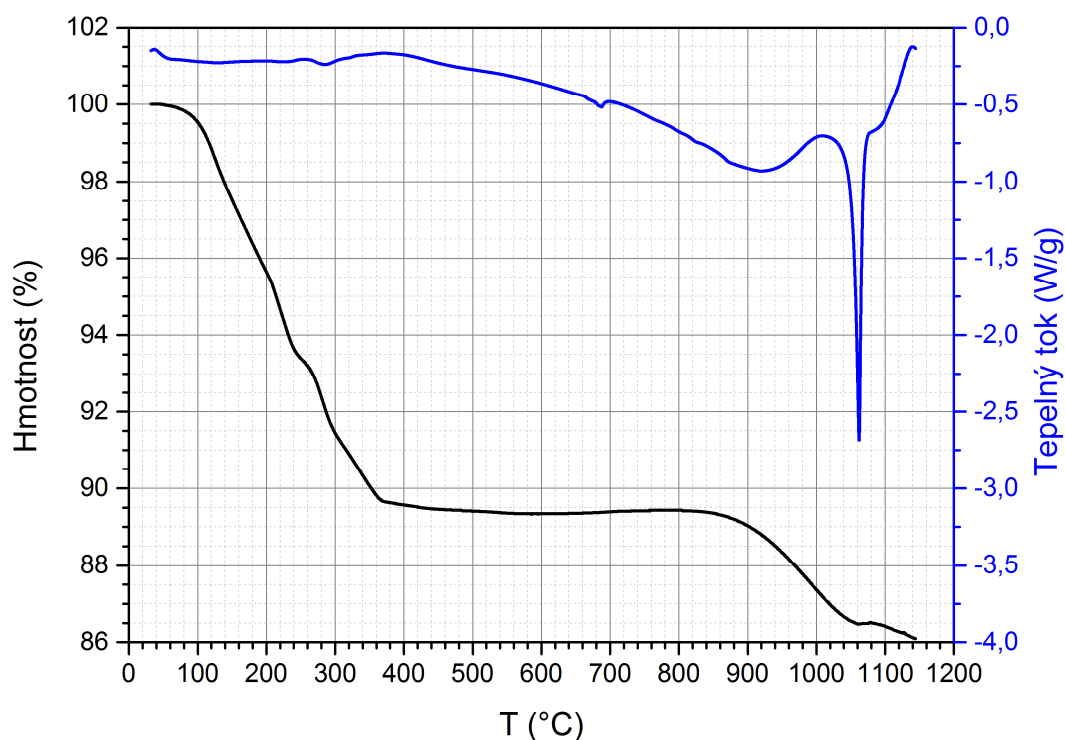
Obr. 29 Snímek z prvkové EDS analýzy vypálené jednovrstvé měděné vrstvy Heraeus C7720, kde je patrný nízký obsah prvku bismutu kolem měděné vrstvy. Bismut je v obrázku vyznačen bílou barvou. SEM PHENOM PROX; BSE detektor; mód s redukcí náboje.

Prvkové analýze byla také podrobena v době odevzdání disertační práce nejnovější pasta Heraeus C7403. Tato pasta by měla být použita především pro tisk prvních vrstev na keramickém substrátu. Tuto pastu je možné označit za pastu zprostředkovávající především dobrou adhezi mezi mědí a korundem. Vzorky s vypálenou pastou Heraeus C7403 mají po výpalu mírně odlišné prvkové složení nežli vzorky s pastou Heraeus C7720. Skelná fáze je u této pasty tvořena především oxidem křemíku. Oxid bismutu je v této pastě také obsažen, ale v menší míře nežli u pasty Heraeus C7720. Pasta dále v menší míře obsahuje malé množství oxidů vápníku, hořčíku a mědi.

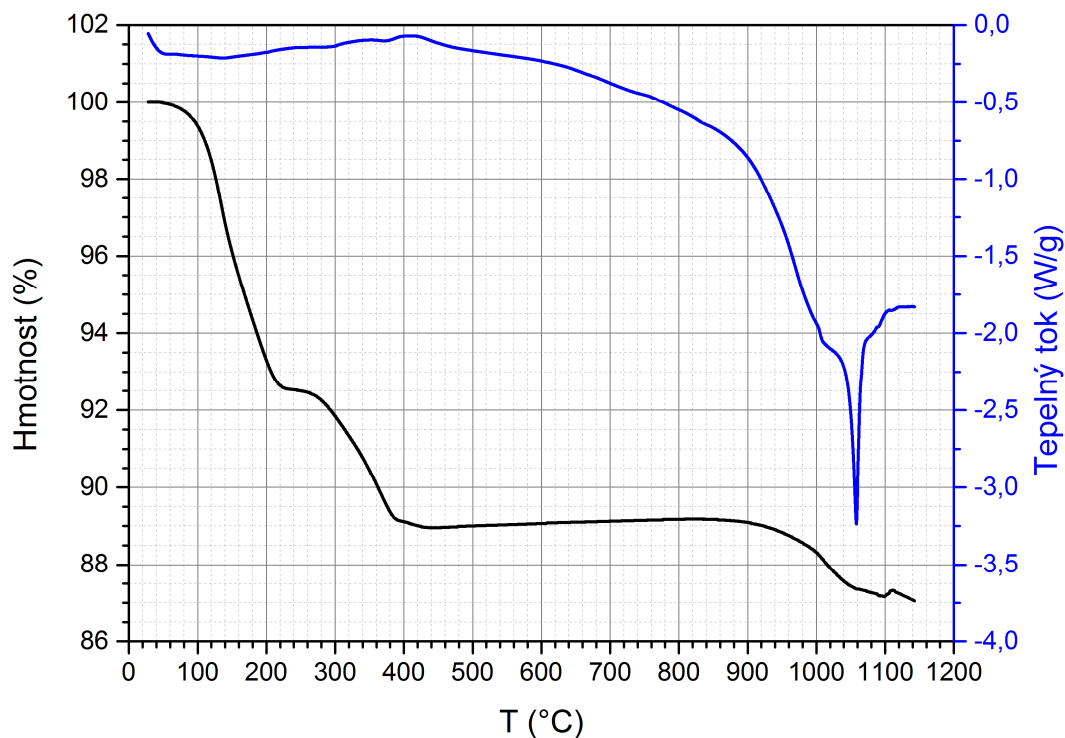
6.3 Strukturální termická analýza měděné pasty

Strukturální termická analýza umožňuje určit, co se z materiálu uvolňuje při jeho zahřívání a také, jak se mění jeho skupenství. Přibližně 15 mg pasty Heraeus C7720 a Heraeus C7403 bylo umístěno do keramického kelímku. Tento kelímek byl poté vložen do přístroje TA Instruments SDT Q600, kde byla udržována dusíková atmosféra po celou dobu ohřevu. Rychlost ohřevu byla 10 °C/min. Výsledky této analýzy jsou uvedeny na obr. 30 a obr. 31.

Z obr. 30 a obr. 31 je zřejmý téměř konstantní pokles hmotnosti u obou sledovaných past až do teploty přibližně 360 °C až 380 °C. V této části se z pasty uvolňuje především organická složka pasty. U pasty Heraeus C7403 je z grafu patrné, že je tvořena pravděpodobně dvěma typy organické složky, z nichž jedna se uvolnila při teplotě do cca 220 °C a druhá pak od teploty cca 260 °C. Kolem teploty 900 °C se začne rozkládat také skelná fáze. Například v případě pasty obsahující skelnou fázi z oxidu bismutu se při této teplotě začíná redukovat oxid bismutitý na bismut za úniku kyslíku, kovový bismut se pravděpodobně také odpařuje, proto je z grafu zřejmý pokles hmotnosti. Z grafů je také vidět prudká změna průběhu tepelného toku, neboli heat flow, v oblasti kolem 1060 °C. Tento pokles odpovídá teplotě tání mědi, případně eutektika Cu – Cu₂O. Z výsledků měření plyne, že do teploty cca 400 °C je nutné zajistit větší výměnu atmosféry v peci, aby se eliminovalo její znečištění uvolňující se organickou složkou pasty.



Obr. 30 Výsledek termické analýzy pasty Heraeus C7720.

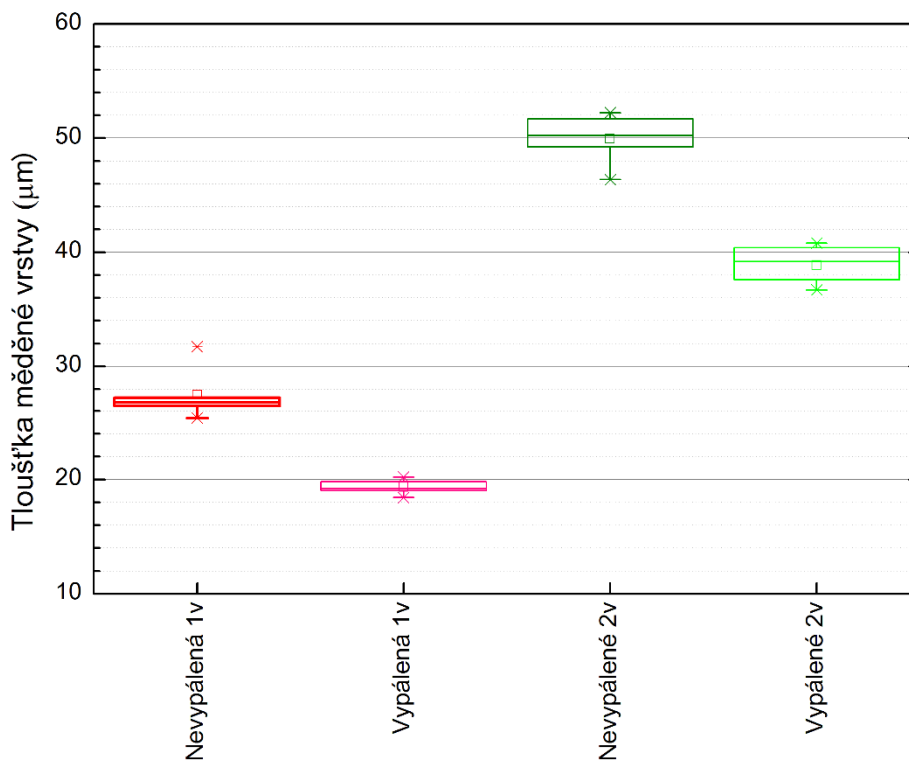


Obr. 31 Výsledek termické analýzy pasty C7403.

6.4 Tloušťka měděné vrstvy před výpalem a po výpalu

Při výpalu natištěné vrstvy, vytvořené technologií tlustých vrstev, v dusíkové atmosféře dochází nejen k úbytku hmotnosti, ale také ke snížení tloušťky této vrstvy.

Konfokálním mikroskopem byla změřena tloušťka měděné pasty před výpalem (po sušení) a po výpalu pro jednovrstvý a dvojevrstvý tisk. Úbytek hmotnosti je zobrazen na obr. 32. Jedna vrstva je v obrázku označena zkratkou „1v“ a dvě vrstvy zkratkou „2v“. Měření proběhlo na deseti místech a ze všech těchto měření byl vytvořen graf, který je uveden na obr. 32. Z grafu je zřejmé, že po výpalu se tloušťka sníží přibližně o 25 %. Menší procentuální úbytek hmotnosti byl zaznamenán u dvojevrstvé mědi než u mědi natištěné pouze jednou vrstvou.



Obr. 32 Snížení tloušťky mědi vlivem výpalu pro jednovrstvý a dvojevrstvý tisk měděné pasty.

6.5 Hustota vypálené měděné vrstvy

Jedním z nejdůležitějších parametrů každého materiálu je jeho hustota. Hustota měděné vrstvy, která byla odejmuta z keramického substrátu, byla zvážena přesnou laboratorní váhou. Pro účely tohoto testování byly zvoleny vzorky osmivrstvé mědi, s tloušťkou cca 300 μm , které měly horší adhezi mědi ke korundu, a bylo tak možné celou vodivou vrstvu z keramiky určitou silou odejmout. Měděná vrstva byla vážena nejprve na vzduchu a poté při ponoření do izopropylalkoholu (obr. 33). Z naměřených hodnot byla vypočtena hustota 7,14 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tabulková hodnota hustoty mědi δ je 8,94 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hustota mědi vypálené pasty je tedy přibližně o 20 % nižší nežli tabulková hodnota. Nižší hustota je způsobena především pórovitostí vypálené vrstvy a přítomností skelné fáze.



Obr. 33 Měření hustoty měděné vrstvy laboratorní váhou.

6.6 Měrný elektrický odpor vypálené měděné vrstvy

Substráty tvořené systém korund – měď jsou určeny pro elektronické obvody. Aby v těchto obvodech nedocházelo k nadbytečným výkonovým ztrátám, je klíčové, aby měrný elektrický odpor vodivých drah substrátu byl co nejnižší.

Čtyř – vodičovou metodou byl změřen odpor vodivé dráhy motivu D z kap. 5, který je zobrazen na obr. 34. Vodivá dráha byla vytvořena tiskem pasty C7403 nebo C7720. Testované motivy byly jednovrstvé a třívrstvé. Délka celé vodivé dráhy je $l = 1,2$ m. Průřez byl změřen konfokálním mikroskopem LEXT 3000. Tento mikroskop v kombinaci se softwarem umožňuje změřit objem části motivu o určité délce. Ze známého objemu a délky je možné vypočítat průměrný obsah (průřez) vodivého motivu S .

Měrný elektrický odpor neboli rezistivitu ρ lze vypočítat ze vztahu

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (6.1)$$

kde R je změřený odpor meandru, S je průměrný průřez dráhy změřený mikroskopem LEXT, $l = 1,2$ m je délka vodivé dráhy.

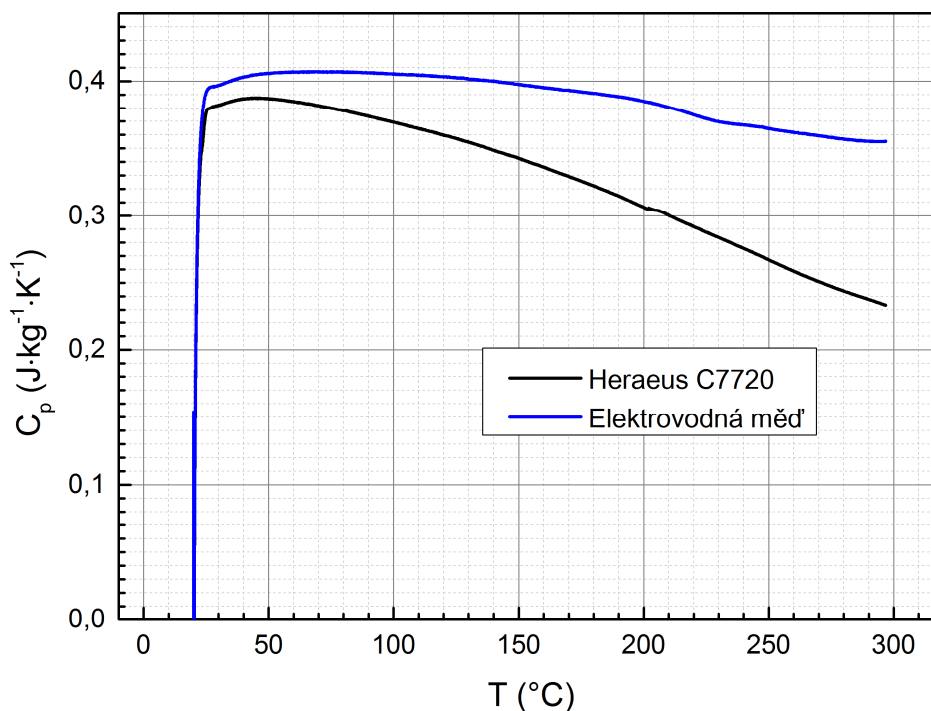
Tabulková hodnota měrného elektrického odporu je $16,78 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$. Vypočtená hodnota se pohybuje u obou typů past kolem $24 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$. Je tak možné říci, že měrný elektrický odpor vypálené Heraeus pasty C7403 i C7720 je přibližně o 40 % vyšší nežli je měrný elektrický odpor čisté mědi. Měrná elektrická vodivost σ je převrácenou hodnotou měrného elektrického odporu a její hodnota pro pasty Heraeus se pohybuje kolem $42 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 34 Vodivý motiv, který je určený pro měření rezistivity. V závislosti na optimalizaci tisku a výpalu je šířka vodivé dráhy v meandru přibližně 300 μm a počet čtverců v dráze je 4000.

6.7 Měrná tepelná kapacita vypálené měděné vrstvy

Měrná tepelná kapacita hraje významnou roli v aplikacích, kde dochází k velkému zahřívání substrátu. V tomto testu byla diferenční skenovací kalorimetrií porovnána tepelná kapacita C_p vypálené pasty Heraeus C7720 a elektrovodné mědi. Naměřená hodnota C_p vypálené pasty byla $376,7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$, naměřená hodnota C_p elektrovodné mědi při stejné teplotě byla $391,6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pokles tepelné kapacity vypálené pasty Heraeus je oproti elektrovodné mědi pouze o cca 4 %. Teplotní závislost měrné tepelné kapacity je uvedena na obr. 35. Z obrázku je zřejmé, že s rostoucí teplotou klesá měrná tepelná kapacita pasty Heraeus C7720 rychleji nežli měrná tepelná kapacita elektrovodné mědi.



Obr. 35 Měrná tepelná kapacita C_p vypálené pasty Heraeus C7720 a elektrovodné mědi měřená diferenční skenovací kalorimetrií.

6.8 Tepelná vodivost vypálené měděné vrstvy

V aplikacích, kde je klíčové efektivní chlazení výkonových součástek, je jedním z nejdůležitějších parametrů tepelná vodivost celého systému. V případě aplikací, kde je součástka připevněna na měděnou vrstvu substrátu keramika – měď, je klíčová zejména teplotní vodivost mědi i keramiky včetně případné mezivrstvy, vytvořené na jejich rozhraní. Tepelná vodivost keramiky je závislá na jejím složení a je blíže popsána v kap. 1.1.2. Tepelná vodivost λ měděné vrstvy, vytvořené technologií tlustých vrstev, byla vypočtena z Wiedmann – Franzovo zákona

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L_c \cdot T, \quad (6.2)$$

kde σ je změřená měrná elektrická vodivost (z kap. 6.6), L_c je konstanta označovaná jako Lorentzovo číslo a její hodnota pro měď je dle Kittela $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$ [50] a T je teplota. V našem případě byla měrná elektrická vodivost $\sigma = 42 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ změřena při teplotě okolí $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($298,15 \text{ K}$), proto i do vztahu byla dosazena teplota $T = 298,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Vypočtená tepelná vodivost měděné pasty je $\lambda = 279 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je hodnota o 28 % nižší nežli je tabulková hodnota čisté mědi ($386 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Nižší tepelná vodivost je dána tím, že měděná vrstva obsahuje oblasti s dutinami a příměsi, které mají velmi nízkou tepelnou vodivost.

6.9 Přestup tepla korundového substrátu s tlustou vrstvou mědi

Mezi nejdůležitější vlastnosti korundového substrátu s tlustou vrstvou mědi patří především přestup tepla. Dobrý odvod tepla z výkonové součástky je klíčový u substrátů pro výkonové aplikace, a proto je této kapitole věnována větší pozornost. Jsou zde uvedeny výsledky počítačových tepelných simulací a výsledky měření přestupu tepla termokamerou. Měřeny byly vzorky s Ag – Pd vrstvou a vzorky s měděnými pastami, které byly vytvořeny technologií TPC.

6.9.1 Přestup tepla na motivech ve tvaru proužku

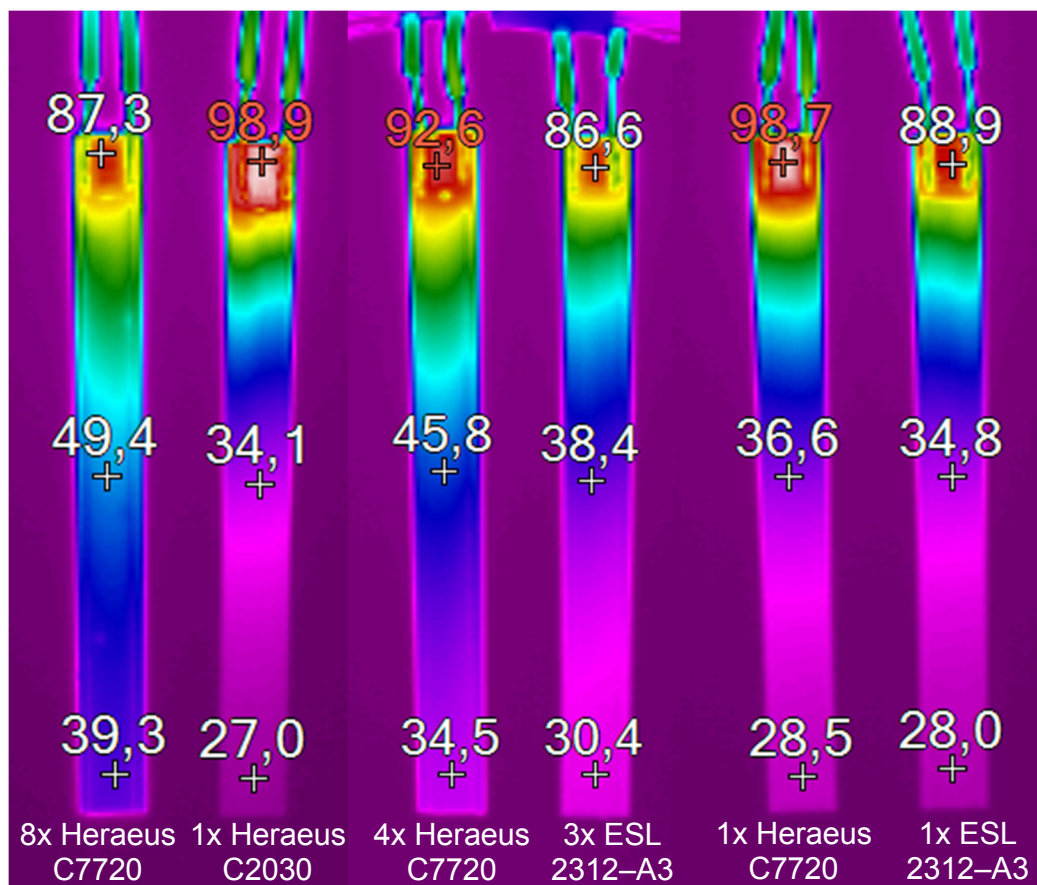
K experimentu měření přestupu tepla na motivech ve tvaru proužku byly určeny motivy, které jsou označeny písmenem M na obr. 12. Na jednom konci proužku byl připájen výkonový plošný rezistor, který byl navrhnut a vyroben přímo pro účely testování přestupu tepla. Tento rezistor měl základnu z korundové destičky o rozměrech $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Na této destičce byly z jedné strany natištěny dvě stříbrné elektrody a mezi nimi byla natištěna odporová dráha o odporu $15 \text{ } \Omega$. Z druhé strany destičky byla celoplošně natištěna stříbrná vrstva, která umožnila

připájení tohoto rezistoru k testovanému vzorku. K výkonovému rezistoru byla poté ještě připájena dvojice přívodních vodičů, za které byly vzorky uchyceny do držáku, tak aby volně vertikálně visely v prostoru. Princip měření vzorků je uveden na obr. 36. Vždy byly měřeny dva vzorky simultánně vedle sebe. Na každém z celkem šesti vzorků byla udržována konstantní výkonová ztráta tak, aby byla měření porovnatelná. Výkonové rezistory byly pro měření vybírány vždy se stejnou hodnotou odporu. Všechny substráty byly kvůli přesnějšímu nastavení emisivity a tím pádem i přesnějšího měření teploty termokamerou opatřeny z obou stran nástřikem černé barvy.

Na obr. 37 jsou zobrazeny výsledky experimentu. Snímek z termokamery byl pořízen vždy 90 s od zapnutí zdroje elektrické energie. Na snímcích je dobře patrné porovnání přestupu tepla na šesti různých vzorcích. První dvojice zobrazuje porovnání osmi vrstvé měděné pasty Heraeus C7720 (tloušťka cca 200 μm) s Ag – Pd pastou Heraeus C2030 (tloušťka cca 12 μm). Druhá dvojice porovnává čtyřvrstvou pastu Heraeus C7720 (tloušťka cca 93 μm) s třívrstvou pastou ESL 2312–A3 (tloušťka cca 60 μm). Poslední dvojice zobrazuje porovnání jednovrstvých tisků pro pasty Heraeus C7720 (28 μm) a ESL 2312–A3 (24 μm).



Obr. 36 Princip měření přestupu tepla na testovacích motivech ve tvaru proužků. Pro měření byla použita termokamera FLUKE TI55.



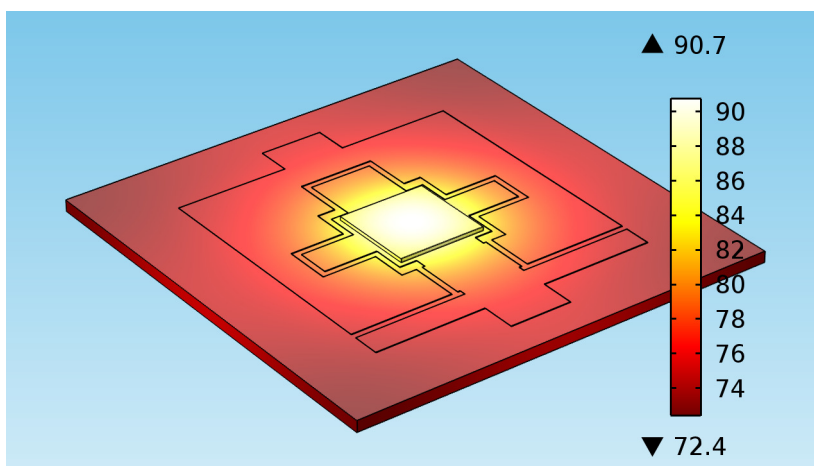
Obr. 37 Porovnání přestupu tepla na testovacích motivech ve tvaru proužků – snímky z termokamery.

Z obr. 37 je zřejmé, že čím je použita tlustší vodivá vrstva, tím je také menší teplota na výkonovém rezistoru. Nejnižší teploty rezistoru bylo dosaženo při použití osmivrstvé pasty Heraeus C7720 a to 87,3 °C, nejvyšší teplota pak je u jednovrstvé stříbrné pasty Heraeus C2030 a to 98,7 °C. Lepší odvod tepla než měděná pasta Heraeus má měděná pasta od ESL, která při nižší tloušťce vrstvy má zároveň i nižší teplotu na čipu. Horší výsledky měření adheze a pájitelnosti pasty od společnosti ESL ElectroScience a také skutečnost, že firma neuvádí dosažitelnost tloušťky 300 um, vedly k zaměření prací především na aplikace past společnosti Heraeus. U první dvojice měřených proužků je zřejmé, že tlustší vodivá vrstva má výrazně pozitivní vliv na distribuci tepla po celé ploše motivu, zatímco relativně tenká Ag – Pd vrstva rozvádí teplo málo. Čím menší je rozdíl mezi maximální a minimální teplotou na jednom proužku, tím lepší je distribuce tepla po ploše. Pokud by z druhé strany motivu byl umístěný chladič, pak tlustá vrstva umožní efektivně rozvést teplo do větší vzdálenosti od výkonové součástky a zajistit tak její účinnější chlazení.

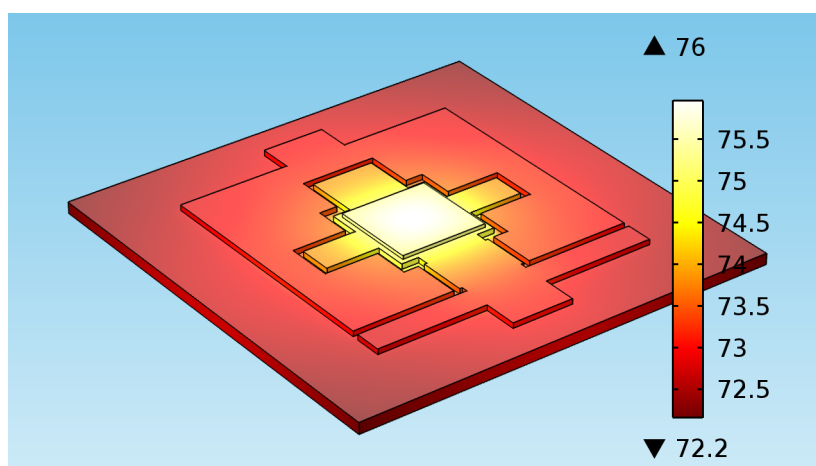
6.9.2 Simulace přestupu tepla na čtvercových motivech

Počítačové simulace umožňují provádět jednodušší experimenty nežli experimenty s reálnými vzorky. Přesto však jsou reálná měření přesnější, protože do simulací je obtížné přesně implementovat všechny vlivy okolí. Program COMSOL Multiphysics byl využit pro 3D grafické simulace, jejichž výsledky jsou uvedeny na obr. 38 až obr. 41. Porovnávány byly dva substráty, které jsou určené pro přijímač slunečního záření s optickým koncentrátorem. První substrát má vodivou vrstvu z Ag – Pd, která je 12 μm tlustá. Druhý substrát obsahuje měděnou vrstvu s tloušťkou 300 μm . Pro vstupní veličiny simulací byly v případě vodivé měděné vrstvy využity výsledky měření hustoty (kap. 6.5), měrné tepelné kapacity (kap. 6.7) a tepelné vodivosti (kap. 6.8). V simulacích byly použity vzorky se stejnými rozměry a parametry, jako vzorky z kap. 6.9.3. Naměřené hodnoty z kap. 6.9.3, zejména pak z obr. 48 a obr. 51, mohou být porovnávány s výsledky počítačových simulací uvedených v této podkapitole. Jako zdroj tepla byl v praktickém experimentu i v případě simulace použit výkonový rezistor, na kterém byla udržována výkonová ztráta 2 W. Na následujících obrázcích je vždy zobrazen substrát, na kterém je barevně vyznačena teplota každého místa. Nejvyšší teplota na substrátu je vždy v oblasti výkonového rezistoru a je uvedena v pravém horním rohu obrázku vedle černého trojúhelníku. Nejnižší teplota, která je vždy v rohu korundového substrátu, je uvedena v pravém dolním rohu vedle černého trojúhelníku.

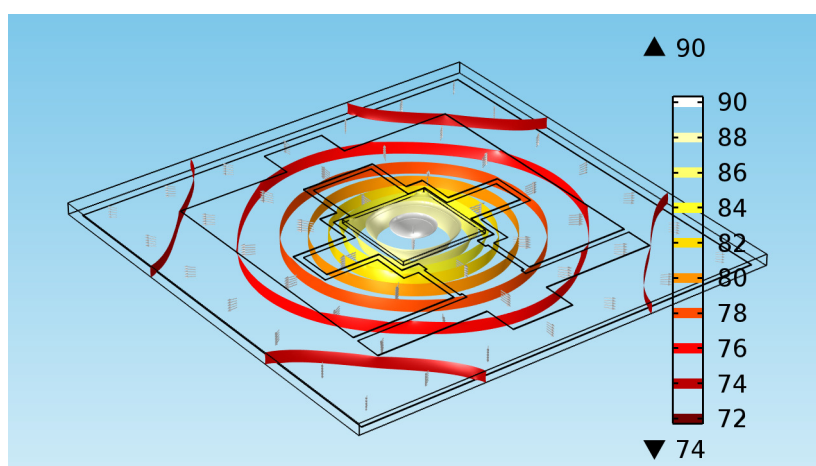
Simulace dokázaly, že tlustá vrstva mědi odvádí teplo z výkonové součástky daleko lépe, než o řád tenčí vodivá vrstva tvořená Ag – Pd.



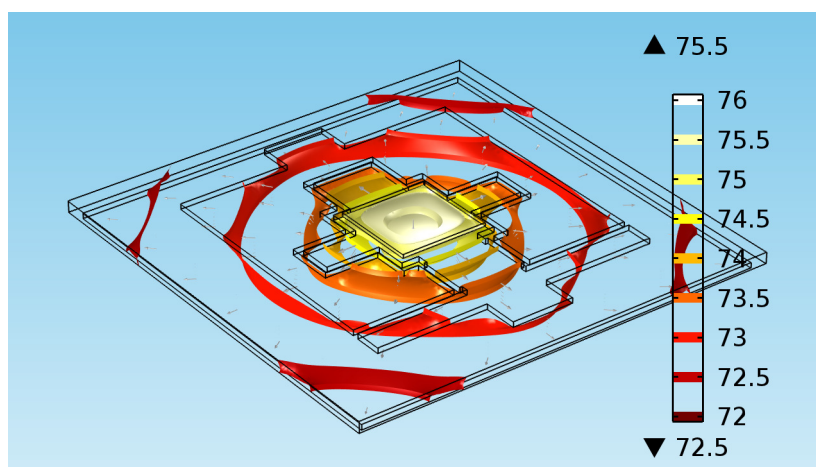
Obr. 38 Výsledek teplotní simulace CPV přijímače s vodivým motivem, který je tvořen Ag – Pd vrstvou tlustou 12 μm .



Obr. 39 Výsledek teplotní simulace CPV přijímače s vodivým motivem, který je tvořen měděnou vrstvou tlustou 300 μm .



Obr. 40 Výsledek teplotní simulace CPV přijímače s vodivým motivem, který je tvořen Ag – Pd vrstvou tlustou 12 μm , s vyznačenými izotermami.



Obr. 41 Výsledek teplotní simulace CPV přijímače s vodivým motivem, který je tvořen měděnou vrstvou tlustou 300 μm , s vyznačenými izotermami.

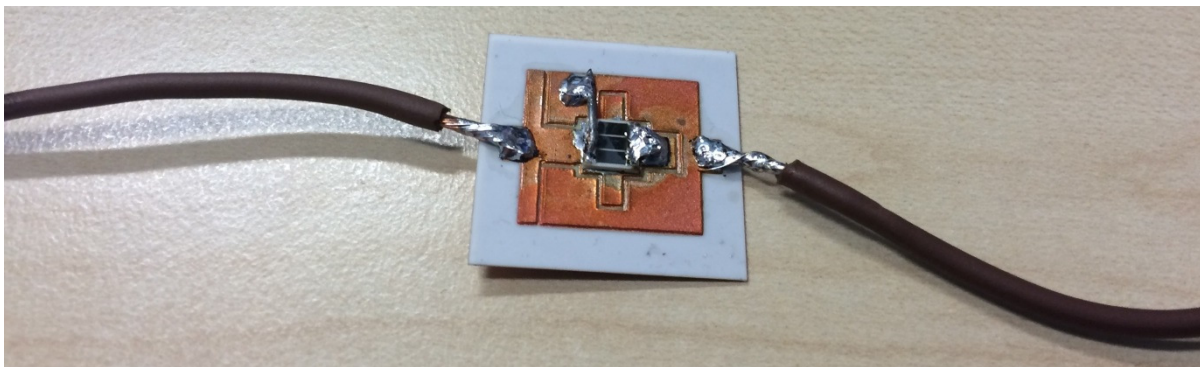
6.9.3 Porovnání přestupu tepla na čtvercových motivech

Termokamerou FLUKE TI55 bylo porovnáno rozložení teploty na čtvercových korundových substrátech s vodivými motivy, které byly určeny pro experimentální verzi CPV přijímače. Motivy, které byly měřeny v tomto experimentu, měly stejné parametry, jako motivy určené pro počítačové simulace v kap. 6.9.2. Na jednom korundovém substrátu byla natištěna 300 μm tlustá měděná vrstva pasty Heraeus C7720 a na druhém, pro porovnání, 12 μm tlustá vrstva Ag – Pd pasty Heraeus C2030. Tato Ag – Pd pasta se používá standardně pro tisk vodivých vrstev na keramiku. Měřeno bylo na substrátech s chladičem i bez chladiče.

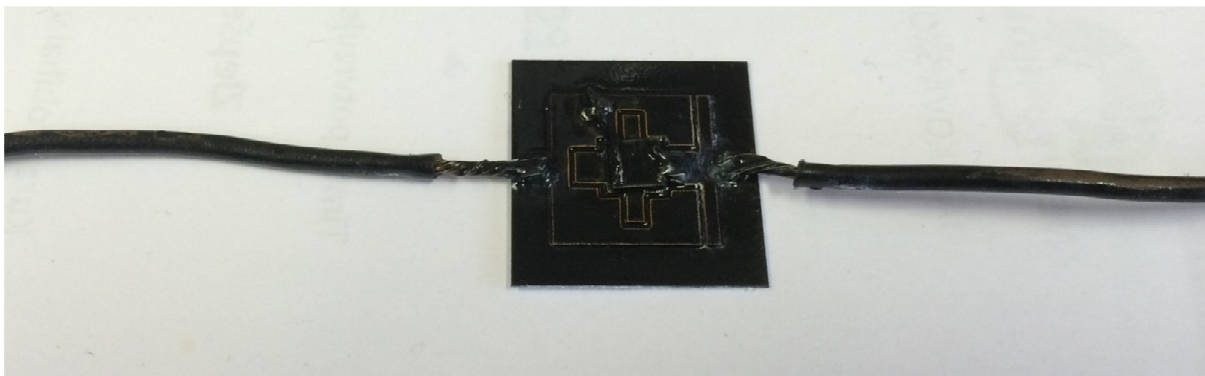
Měření bez chladiče

Na lícové straně obou typů substrátů byl vytvořen identický vodivý motiv, na který byl připájen plošný rezistor o odporu 15 Ω (popis v kap. 6.9.1). Tento rezistor byl rubovou stranou připájen na lícový vodivý motiv substrátu a dále kontaktován. Ke zdroji elektrického napětí byl celý vzorek připojen prostřednictvím připájených vodičů. Na výkonovém rezistoru byla udržována výkonová ztráta 2 W (5,5 V; 0,37 A). Na rubové straně je po celé ploše keramického substrátu natištěná vodivá vrstva. U měděné pasty dosahuje tato vrstva tloušťky 300 μm , u Ag – Pd substrátu tloušťky 12 μm . Testovací vzorek s měděnou vrstvou, připájeným výkonovým rezistorem a vodiči je zobrazen na obr. 42. Všechny substráty byly kvůli přesnějšímu nastavení emisivity a tím pádem i přesnějšího měření teploty termokamerou opatřeny z obou stran nástřikem černé barvy (obr. 43).

Termokamerou Fluke Ti55 byla změřena série experimentů od času zapnutí napěťového zdroje do doby 90 s. Po této době došlo vždy k odpojení zdroje a dále probíhalo měření na chladnoucím vzorku po dobu 30 s. Emisivita snímaného vzorku byla na termokameře nastavena na hodnotu 0,93.

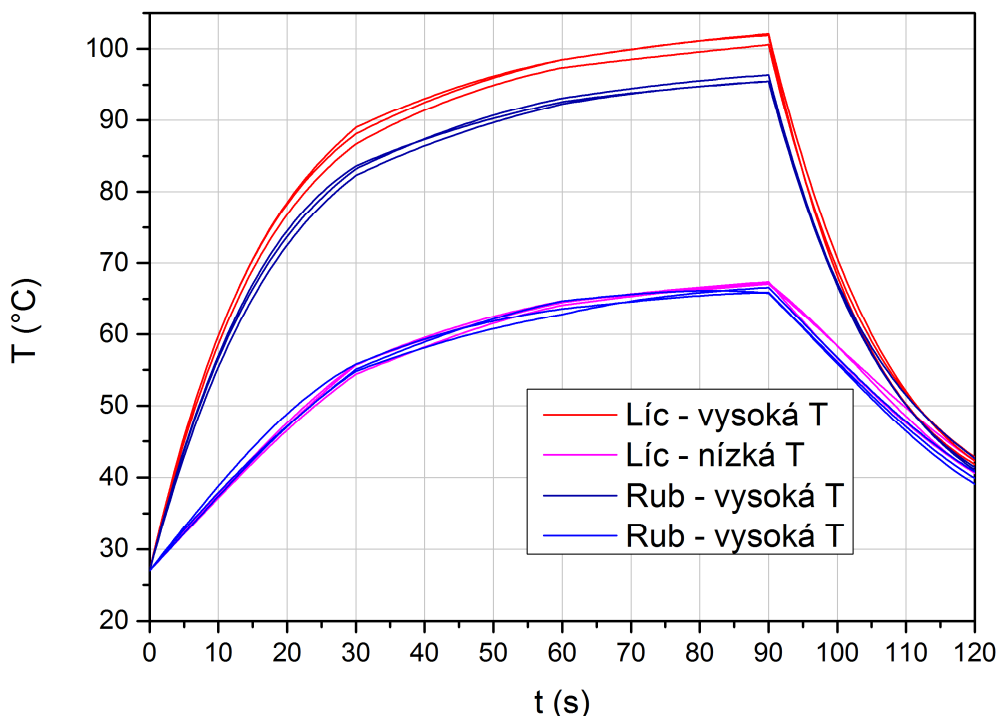


Obr. 42 Testovací vzorek s tlustou vrstvou mědi.

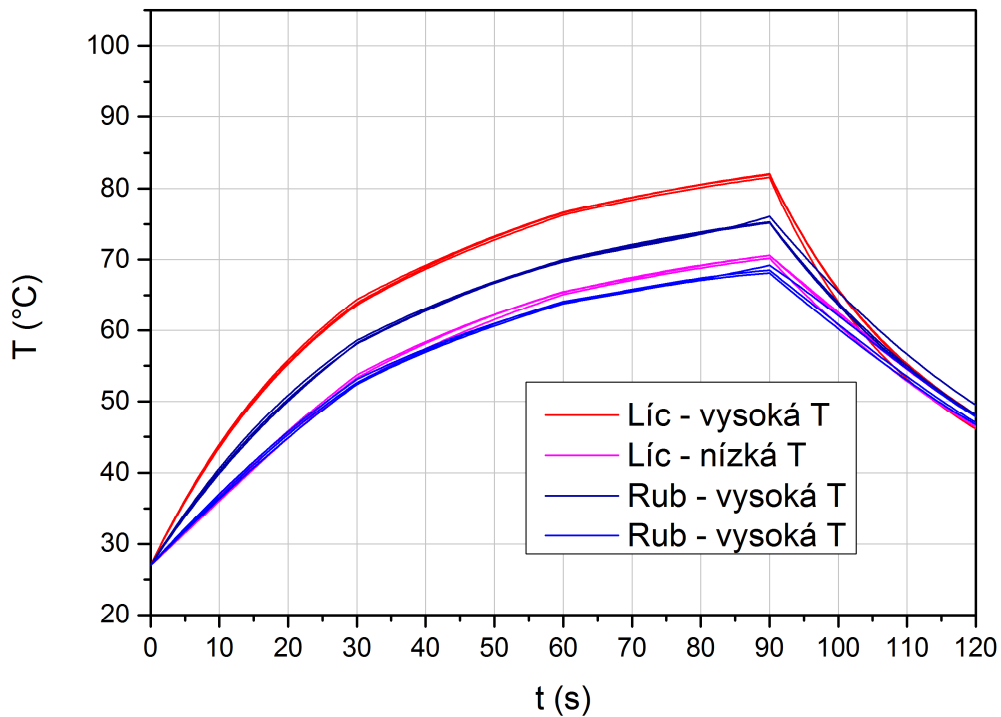


Obr. 43 Testovací vzorek s tlustou vrstvou mědi, který byl opatřen vrstvou černé barvy.

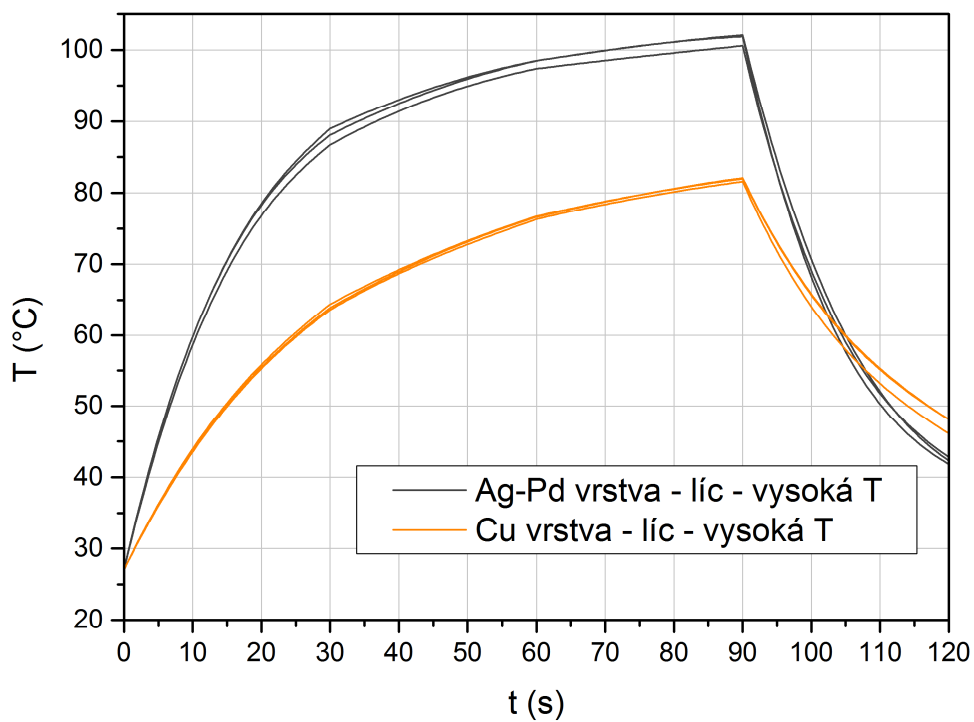
Na obr. 44 a obr. 45 jsou zobrazeny průběhy teploty v čase pro různá místa měření a oba typy substrátů. Teplota byla snímána z lícové strany, kde je připájen výkonový odpor i z rubové strany, kde je umístěna pouze vodivá vrstva. Na každé straně substrátu byla měřena nejvyšší teplota (v obrázcích označená vysoká T) a teplota v rohu keramického substrátu (v obrázcích označená nízká T). Vyznačení těchto teplot je také uvedeno na obr. 48 až obr. 51. Na obr. 46 a obr. 47 je zobrazeno porovnání obou typů substrátů ve stejných měřených místech. Další obrázky porovnání jsou uvedeny v příloze (obr. V a obr. VI).



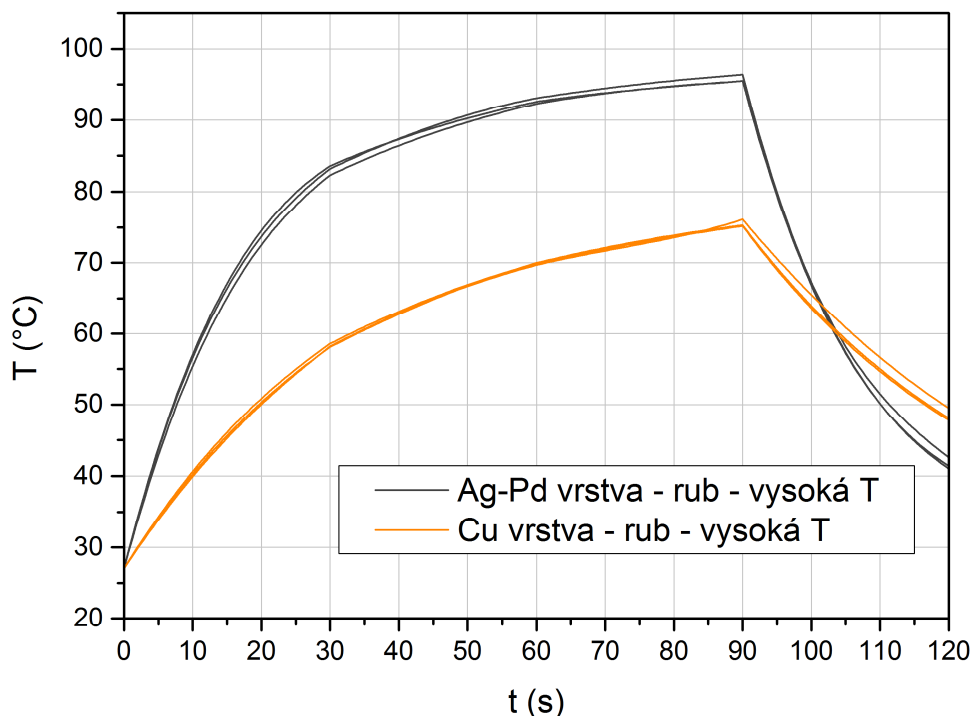
Obr. 44 Průběh teploty v čase pro různá místa měření u Ag – Pd substrátů.



Obr. 45 Průběh teploty v čase pro různá místa měření u substrátů s tlustou vrstvou mědi.



Obr. 46 Porovnání průběhu teploty v čase pro nejvyšší teplotu lícové strany obou substrátů.

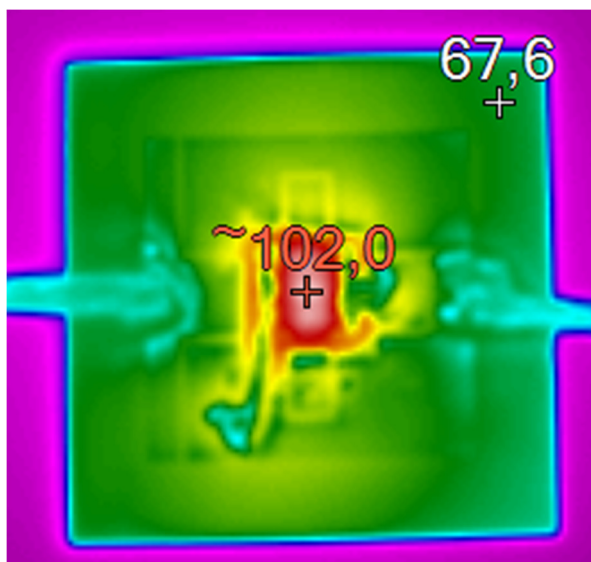


Obr. 47 Porovnání průběhu teploty v čase pro nejvyšší teplotu rubové strany obou substrátů

Na následujících snímcích (obr. 48 až obr. 51) jsou zobrazeny snímky z termokamery v čase 90 s od zapnutí napájecího zdroje. Křížky je vyznačena vždy nejvyšší teplota a teplota na okraji keramického substrátu, která je u všech měření vždy ve stejné vzdálenosti od rohu substrátu.

Tento experiment dokázal tvrzení podobně jako experiment v kap. 6.9.1 nebo počítačové simulace v kap. 6.9.2, že velká tloušťka vodivé vrstvy umožní výrazně lepší chlazení výkonové součástky. Důležité je také poukázat na rovnoměrný přenos tepla po celé ploše substrátu s měděnou vrstvou, což je velmi dobře vidět na snímcích rubové strany, kde rozdíl mezi nejvyšší teplotou a teplotou v rohu substrátu je u Ag – Pd vrstvy 29,9 °C, zatímco u měděné vrstvy pouze 6,5 °C.

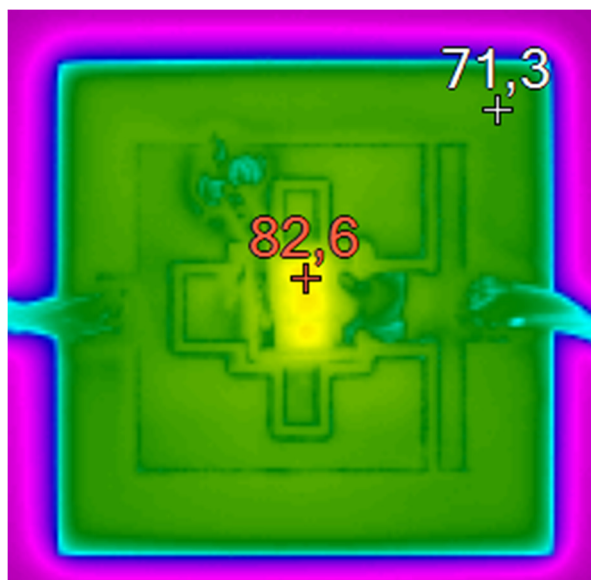
Na základě experimentálního měření byl pomocí simulací vytvořen věrný model odpovídající realitě, který lze použít pro návrh substrátů s jinými motivy. Pro tyto jiné motivy tak již nebude nutné dělat experimentální měření, ale postačí vyjít z tohoto modelu.



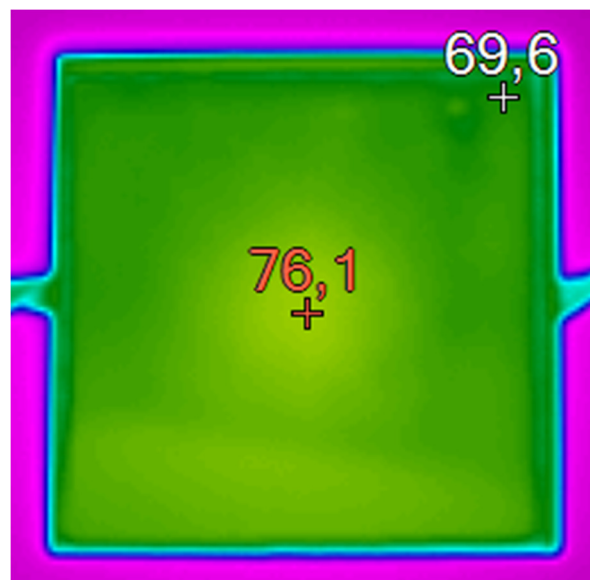
Obr. 48 Ag – Pd vrstva – líc.



Obr. 49 Ag – Pd vrstva – rub.



Obr. 50 Měděná vrstva – líc.



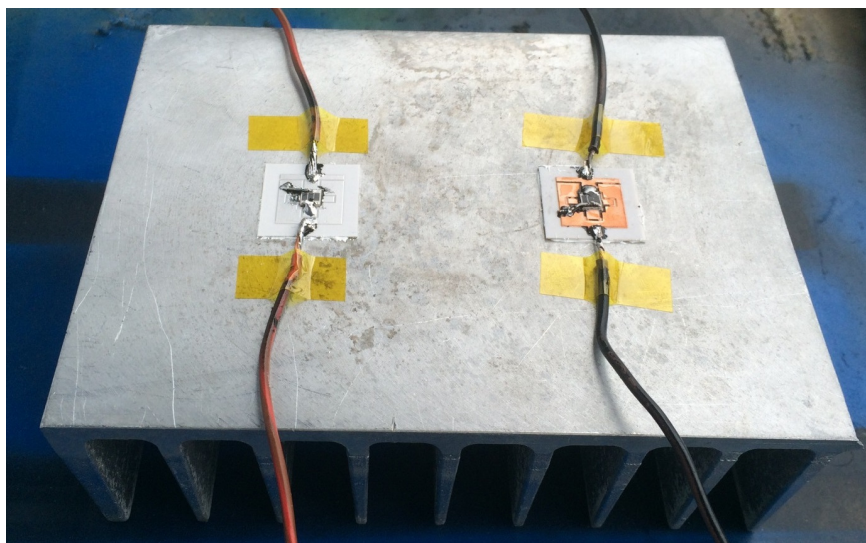
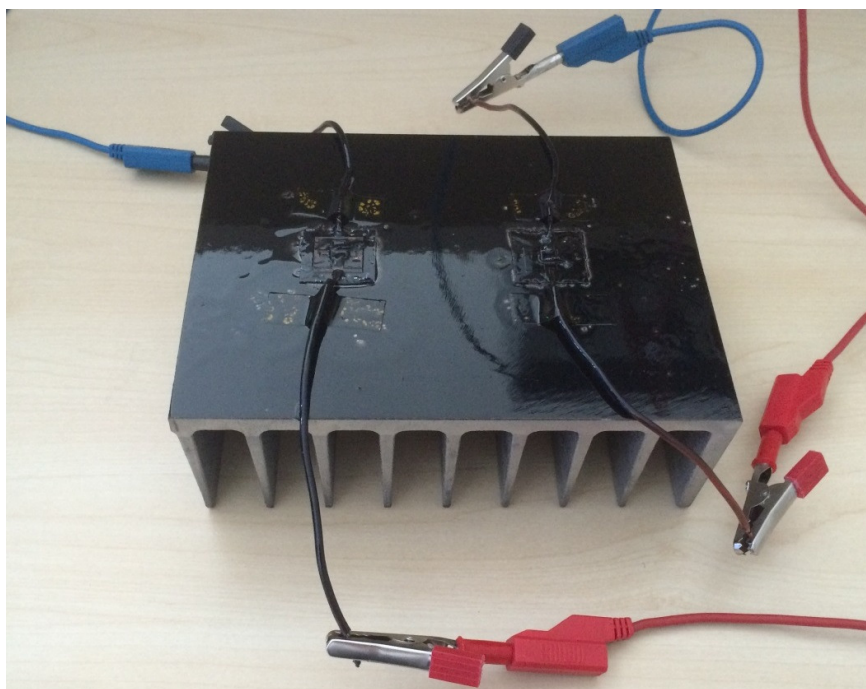
Obr. 51 Měděná vrstva – rub.

Měření s chladičem

Substráty s měděnou i Ag – Pd vodivou vrstvou byly tepelně vodivou pastou připevněny na dostatečně dimenzovaný hliníkový chladič (obr. 52). Vzorky i s chladičem byly poté také opatřeny vrstvou černé barvy. Měření teploty termokamerou probíhalo simultánně na obou vzorcích (obr. 53) při výkonové ztrátě 8 W na každém vzorku. Dále byly substráty změřeny pro výkonovou ztrátu 10 W, 15 W a 20 W. Napětí a proudy pro jednotlivé výkony jsou uvedeny v tab. 6. Všechna měření probíhala při teplotě okolí 25 °C.

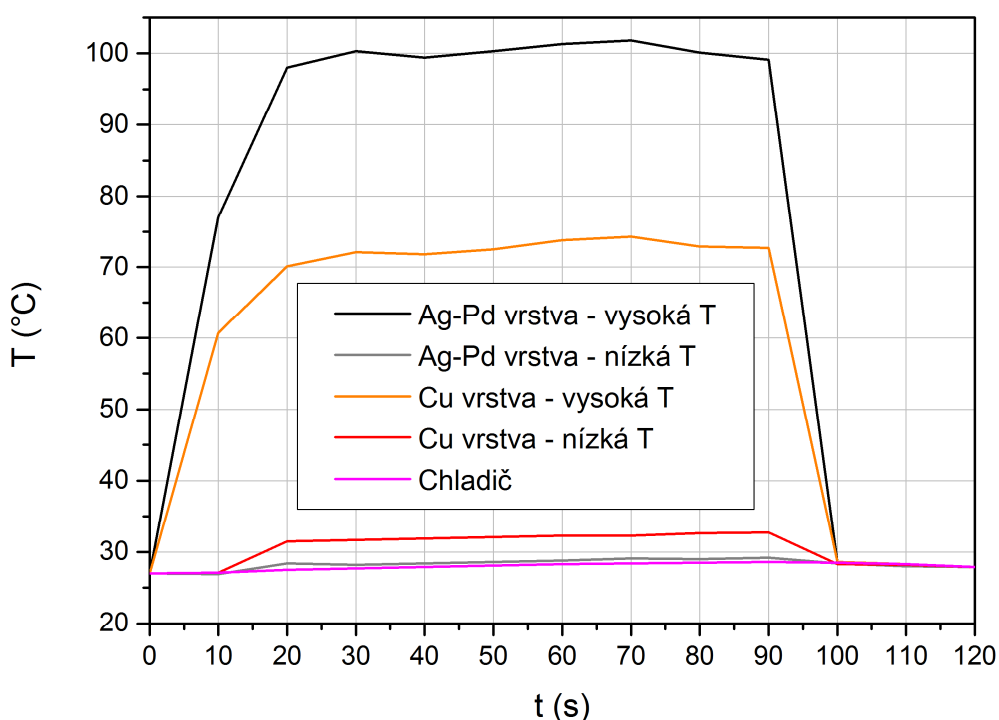
Tab. 6 Měřené výkonové ztráty a odpovídající napětí a proud

P (W)	U (V)	I (A)
8	11,0	0,73
10	12,2	0,82
15	15,0	1,00
20	17,4	1,15

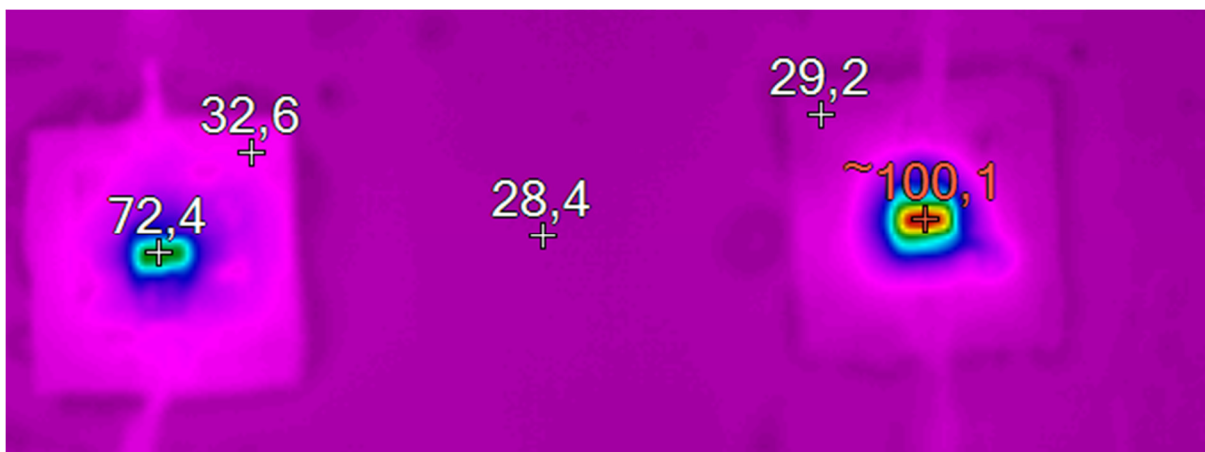
**Obr. 52** Testovací vzorky na hliníkovém chladiči před opatřením vrstvy černé barvy.**Obr. 53** Současné měření obou typů substrátů na chladiči.

Na obr. 54 je zobrazena časová závislost nejvyšší a nejnižší teploty pro měděný substrát a Ag – Pd substrát, které byly připevněny na hliníkovém chladiči. Na rezistoru obou vzorků byla výkonová ztráta 8 W. Snímek z termokamery po 90 s od počátku měření je zobrazen na obr. 55. Teplota byla odečítána vždy po 10 s.

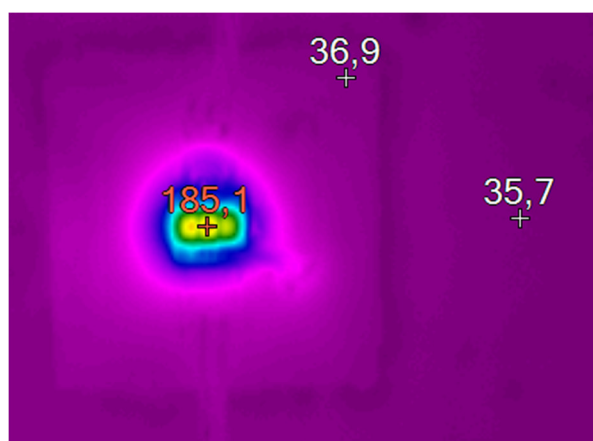
Pro vybrané hodnoty ztrátového výkonu (15 W a 20 W) byly pořízeny snímky, kde je zobrazena kromě maximální teploty také teplota na okraji substrátu a na chladiči (obr. 56 až obr. 58). Všechny snímky z termokamery byly pořízeny po 90 s od zapnutí zdroje elektrické energie. Kvůli vysoké teplotě nebylo možné změřit substrát s Ag – Pd vrstvou pro větší výkon než 15 W.



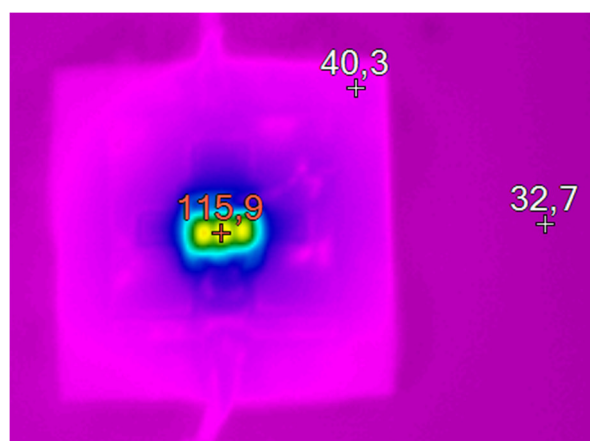
Obr. 54 Průběh nejvyšší a nejnižší teploty v čase pro substráty s Ag – Pd a měděnou vrstvou, které byly připevněny na hliníkový chladič.



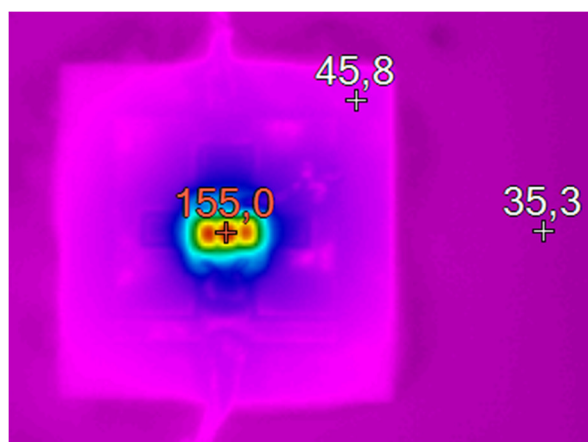
Obr. 55 Porovnání oteplení měděného substrátu (vlevo) a substrátu s Ag – Pd vrstvou (vpravo). Oba substráty byly současně připojeny na chladič a oba byly zatěžovány výkonovou ztrátou 8 W.



Obr. 56 Substrát s Ag – Pd vrstvou při výkonové ztrátě $P = 15$ W.



Obr. 57 Substrát s měděnou vrstvou při výkonové ztrátě $P = 15$ W.



Obr. 58 Substrát s měděnou vrstvou při výkonové ztrátě $P = 20$ W.

Z grafu a snímků z termokamery je opět zřejmé, že substráty, které mají vodivou vrstvu z tlusté mědi, rozvádí teplo vzniklé na výkonovém rezistoru po celé ploše substrátu podstatně lépe než substráty s tenčí Ag – Pd vrstvou. Rozložení teploty u substrátu s tlustou vrstvou mědi je po celé jeho ploše více rovnoměrné a rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou teplotou je tak nižší podobně jako u experimentu bez připojeného chladiče.

Maximální teplota na substrátu s měděnou vrstvou je o 28,7 °C nižší než maximální teplota na stříbrném substrátu při použití chladiče a při výkonové ztrátě 8 W na rezistoru. Při výkonové ztrátě 15 W se tento rozdíl zvýší na 69,2 °C. Tlustá vrstva mědi tak pomáhá daleko lépe převést teplo z výkonové součástky do chladiče.

6.10 Měření adheze spojení korund - měď

Mezi metody, jak určit, jestli má měděná vrstva natištěná na korundovém substrátu dobrou adhezi, patří především zkouška tahem (označovaná také jako „pull test“) a zkouška odlupováním (označovaná také jako „peel test“). Obě tyto zkoušky včetně výsledků z měření jsou blíže popsány v následujících podkapitolách. Mezi další způsob, jak vyhodnocovat adhezi, lze ještě zařadit například zkoušku namáháním vzorku ve stříhu. Tato zkouška je však pro vzorky vytvořené technologií TPC obtížně proveditelná, protože okraj měděné vrstvy je poměrně tenký.

6.10.1 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem jsou převážně používány vodivé motivy, které byly v kap. 5 označené písmenem E a F. Tyto motivy mají z lícové strany vodivé obrazce ve tvaru kruhu o průměru 2 mm, 3 mm a 4 mm. Z rubové strany je vždy čtverec, který má minimálně dvakrát větší plochu než příslušný kruh na lícové straně. Tím je zajištěno, že při trhání těchto dvou obrazců dojde vždy k odtržení mědi od keramiky v místě kruhového obrazce na lícové straně substrátu. K oběma stranám substrátu je připájen mosazný váleček, který má průměr vždy větší, než je úhlopříčka čtvercového obrazce. V obou mosazných válečcích jsou vyvrtány otvory, kterými vede ocelové lanko. Lanko jsou upnuta do čelistí trhacího zařízení a slouží k vystředění testovacího vzorku s válečky tak, aby síla, která působí při namáhání vzorků v tahu, působila kolmo na testovaný substrát (obr. 59). Pohybem čelistí od sebe dojde k odtržení měděné vrstvy od korundového substrátu. Trhací zařízení je připojeno k počítači, který umožňuje záznam síly v závislosti na čase nebo na změně vzdálenosti čelistí.

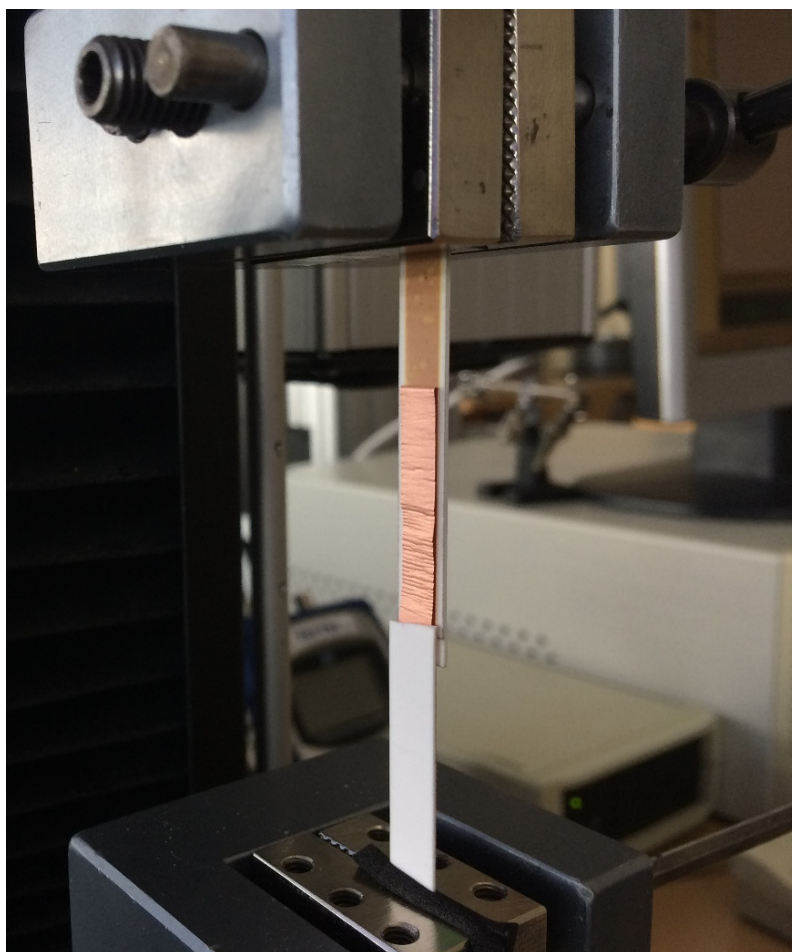


Obr. 59 Princip zkoušky tahem.

Síla nutná k odtržení měděné vrstvy, vytvořené technologií DBC, od korundu je vždy vyšší než 35 N/mm^2 . Adheze vzorků vytvořených při prvních experimentech s technologií TPC byla velmi nízká. Síla, při které došlo k odtržení mědi, se pohybovala v jednotkách N/mm^2 . Postupnou optimalizací celé technologie se podařilo dosáhnout zvýšení této síly až na 40 N/mm^2 a vyrovnat se tak technologii DBC. Vzhledem ke skutečnosti, že substráty pro výkonové aplikace často pracují v náročných klimatických podmínkách, byla ověřována dlouhodobá stabilita spojení keramika měď vytvořeného technologií TPC. Vybrané vzorky byly vystaveny podmínkám teplotních cyklů dle normy ČSNEN 60068-2-14. Vzorky byly cyklicky vždy po deseti minutách přemísťovány z prostředí s teplotou $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do prostředí s teplotou $+150 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž doba přechodu z jednoho prostředí do druhého byla maximálně 10 s. V průběhu experimentu byly odebírány vzorky po 10, 50, 100 a 500 cyklech, přičemž u žádného odběru nebyla pozorována delaminace měděné vrstvy od keramického substrátu.

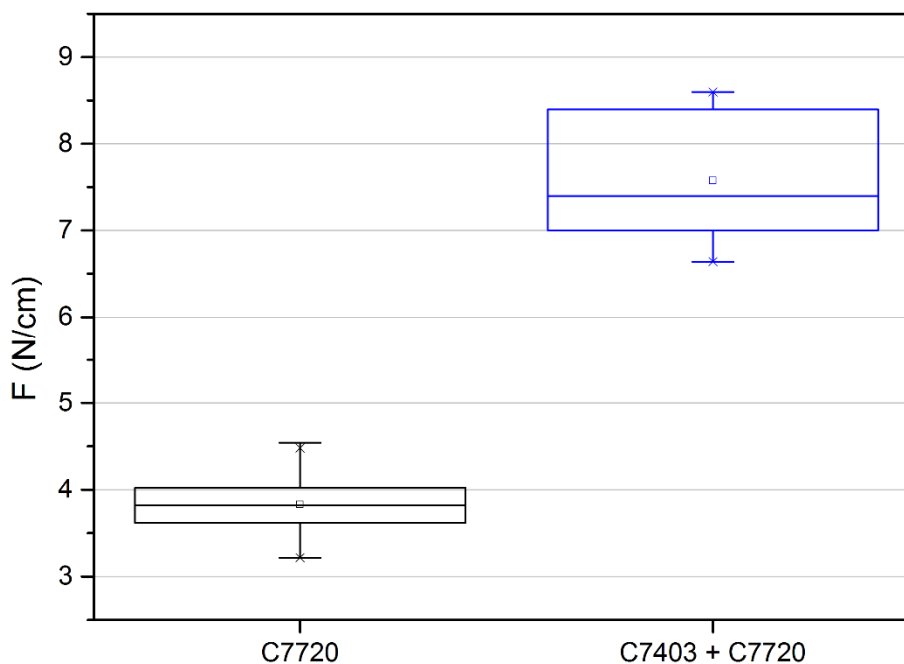
6.10.2 Zkouška odlupováním

Motivy označené písmenem M v kap. 5 byly použity pro zkoušku odlupováním. Motiv obsahuje 4 obrazce ve tvaru proužků. Každý obrazec je vždy nejprve zlomen v rýze a následně upnut do čelistí trhačího zařízení dle obr. 60. Rychlostí $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se od sebe vzdalují čelisti s upnutým vzorkem a síla působící na vzorek je přitom je měřena a počítačem zaznamenávána.



Obr. 60 Snímek z probíhající zkoušky odlupováním.

Z obr. 61 je zřejmé, že použití pasty C7403 jako adhezní vrstvy mezi mědí a korundem umožní zvětšení síly nutné pro odloupení měděné vrstvy od korundu.



Obr. 61 Porovnání adheze vzorku vytvořeného technologií TPC s použitím pouze pasty Heraeus C7720 a vzorku potištěného kombinací past Heraeus C7403 a Heraeus C7720.

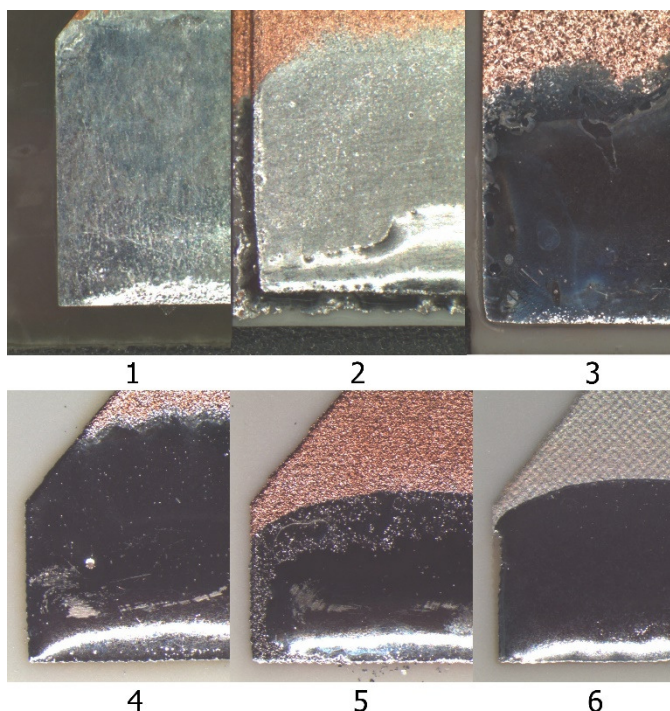
6.11 Pájitelnost vodivých vrstev

Součástky jsou na vodivé vrstvy desek plošných spojů a výkonových substrátů připevňovány nejčastěji pájením. Aby byl pájený spoj spolehlivý, je klíčové zajistit adekvátní pájitelnost vodivé vrstvy. Pájitelnost vodivých vrstev byla porovnávána pro vzorky vytvořené technologií TPC, DBC a dalších technologií. Testování probíhalo zkouškou ponořením do pájky a zkouškou roztékavosti pájky.

6.11.1 Zkouška ponořením do pájky

Testované vzorky byly podrobeny zkoušce pájitelnosti dle J-STD-002D. Během testu byl vzorek korund – měď ponořen 4 mm do roztavené pájky Sn96,5Ag3Cu0,5 (označované SAC305) s teplotou tavení 217 °C a do pájky Sn60Pb40 (označované SnPb) s teplotou tavení 183 °C. Při testech byly použity tavidla SNMA a Actiec5. Na obr. 62 je uvedeno porovnání šesti testovaných vzorků pro kombinaci pájky Sn60Pb40 a tavidla Actiec5. Testována byla komerční deska plošného spoje ze sklo – epoxidového laminátu, substráty tvořené 96% korundovou keramikou, které byly potištěny pastou Heraeus C7720 s odstraněním oxidů po výpalu v plynotěsné retortě, bez odstraňování oxidů ve vakuové peci a pastou ESL 2312–A3, vypálené také ve vakuové peci. Dále pak byl testován substrát vyrobený technologií DBC

a korundový substrát potištěný Ag – Pd pastou Ferro 2554T, který byl vypálen v muflové peci. U všech těchto vzorků byla pájitelnost jejich kovových vrstev vyhodnocována opticky a jejich porovnání je uvedeno na obr. 62.



Obr. 62 Porovnání pájitelnosti vzorků zkouškou ponořením do pájky. 1: komerční PCB ze sklo – epoxidového laminátu; 2: TPC Heraeus C7720 s odstraněním oxidů (plynotěsná retorta); 3: substrát vyrobený technologií DBC; 4: TPC Heraeus C7720 (vakuová pec); 5 TPC ESL 2312–A3 (vakuová pec); 6: Ag – Pd Ferro 2554T (muflová pec).

Pájený povrch by měl být pokrytý souvislou vrstvou pájecí slitiny bez viditelných defektů. Toto kritérium je splněno u vzorků, které jsou vyrobeny ze sklo – epoxidového laminátu a u vzorku vyrobeného technologií DBC (na obr. 62 označeno čísly 1 a 3). Z obrázku je také zřejmé, že odstranění oxidů má pozitivní vliv velikost smáčecího úhlu měděné vrstvy.

6.11.2 Zkouška roztékavosti pájky

Zkouška měření roztékavosti je založena nejčastěji na principu měření smáčecího úhlu kuličky pájky, která byla přetavena na měděné vrstvě. Pro test byla použita bezolovnatá pájecí slitina SAC305 a olovnatá slitina SnPb. Složení těchto slitin je uvedeno v předchozí podkapitole. Pájecí slitiny byly ve tvaru kuličky o průměru 500 μm . Na testovaný povrch byl nanesen roztok tavidla SNMA nebo Actiec 5 a do tavidla umístěna kulička pájecí slitiny. Takto připravený vzorek byl přetaven v horkých parách při teplotě 230 $^{\circ}\text{C}$.

Po zchladnutí vzorků se z povrchu pomocí izopropylalkoholu odstranilo tavidlo. Smáčecí úhel byl následně přímo měřen konfokálním mikroskopem Olympus OLS 3000. Čím je změřený úhel menší, tím je pájitelnost povrchu lepší. Výsledky měření smáčecího úhlu jsou uvedeny v tab. 7. Testovány byly vzorky komerční desky plošného spoje ze sklo – epoxidového laminátu, substrátu vyrobeného technologií DBC, substrátů tvořených 96% korundovou keramikou, které byly potištěny měděnou pastou Heraeus C7720, ESL 2312–A3 a Ag – Pd pastou Ferro 2554T. Výpal probíhal v plynotěsné retortě, ve vakuové nebo muflové peci. Povrch některých vzorků byl chemicky čištěn kvůli odstranění oxidů z povrchu.

Tab. 7 Měření smáčecího úhlu substrátů při použití pájecí slitiny SbPb a SAC305 a tavidla SMNA a Actiec5.

Použitá technologie / typ pasty / použitá pec / úprava povrchu	SnPb / SMNA	SnPb/ Actiec5	SAC 305/ SMNA	SAC 305 / Actiec 5
Komerční PCB	22,2°	14,3°	37,6°	23,2°
DBC	<10°	16,5°	37,1°	26,7°
TPC Heraeus C7720 (plynotěsná retorta bez odstranění oxidů)	90°	35,4°	90°	48,5°
TPC Heraeus C7720 (plynotěsná retorta s odstraněním oxidů)	17,9°	10,5°	44,3°	38,1°
TPC Heraeus C7720 (vakuová pec bez odstranění oxidů)	12,8°	13,4°	25,2°	29,0°
TPC ESL 2312–A3 (vakuová pec bez odstranění oxidů)	45,1°	38,9°	72,6°	59,5°
TPC ESL 2312–A3 (vakuová pec s odstraněním oxidů)	45,9°	23,7°	69,1°	55,1°
Ag – Pd Ferro 2554T (muflová pec bez odstranění oxidů)	32,3°	23,6°	34,2°	23,9°

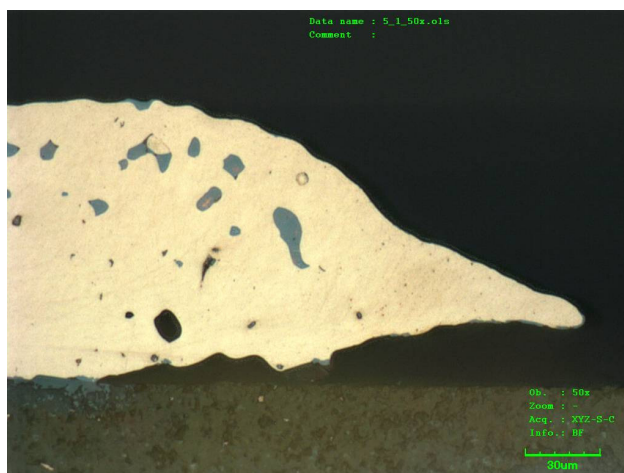
Z tab. 7 je zřejmé, že nejlepší pájitelnost vzorků lze dosáhnout použitím pájecí slitiny SnPb a aktivního tavidla Actiec5. Nejlépe pájitelné jsou vzorky komerčního PCB a substrátu vyrobeného technologií DBC. Pájitelnost vzorků vyrobených technologií TPC, které nebyly čištěny je horší, ale lze ji zlepšit odstraněním oxidů z povrchu vodivé vrstvy tak, že se vyrovná pájitelnosti vzorků vyrobených technologií DBC i komerčním vzorkům ze sklo – epoxidového laminátu. Substráty vyrobené technologií DBC i substráty ze sklo – epoxidového laminátu jsou během procesu výroby také standardně chemicky čištěny. Horší pájitelnost tlustých vrstev mědi, které jsou vytvořeny z past Heraeus C7720 a ESL 2312–A3 může být také způsobena vyšším obsahem skelné fáze. Nejnovější pasty Heraeus, které jsou určeny pro tisk vrchních vrstev, obsahují této skelné fáze méně a pájitelnost těchto vrstev je také výrazně lepší.

7 Optimální proces výroby výkonových substrátů

Na základě množství experimentů, které byly provedeny v rámci disertační práce, je možné stanovit optimální proces výroby výkonového substrátu korund – tlustá vrstva mědi v plynotěsné retortě i ve vakuové peci.

7.1 Optimální proces výroby výkonových substrátů v retortě

Experimentální plynotěsná retorta používaná v laboratořích ZČU má mnoho výhod, které jsou popsány v kap. 4.4.1. Mezi jednu z výhod uvedených v této kapitole patří mimo jiné to, že retortu je možné z pece kdykoliv během probíhajícího teplotního profilu vyjmout z pece do okolní atmosféry a urychlit tak chladnutí vzorků uvnitř retorty. Urychlení chladnutí vzorků má za následek zrychlení celého procesu výpalu až o několik hodin, snížení spotřeby dusíku a také snížení nežádoucí oxidace povrchu mědi. Nežádoucím jevem příliš brzkého vyjmutí retorty z pece kolem 650 °C se ukázalo být odlupování okrajů měděné vrstvy od keramického substrátu. Příčinou tohoto odlupování, které je zobrazeno na následujícím obrázku, je především rozdílná teplotní roztažnost měděné a keramické vrstvy.



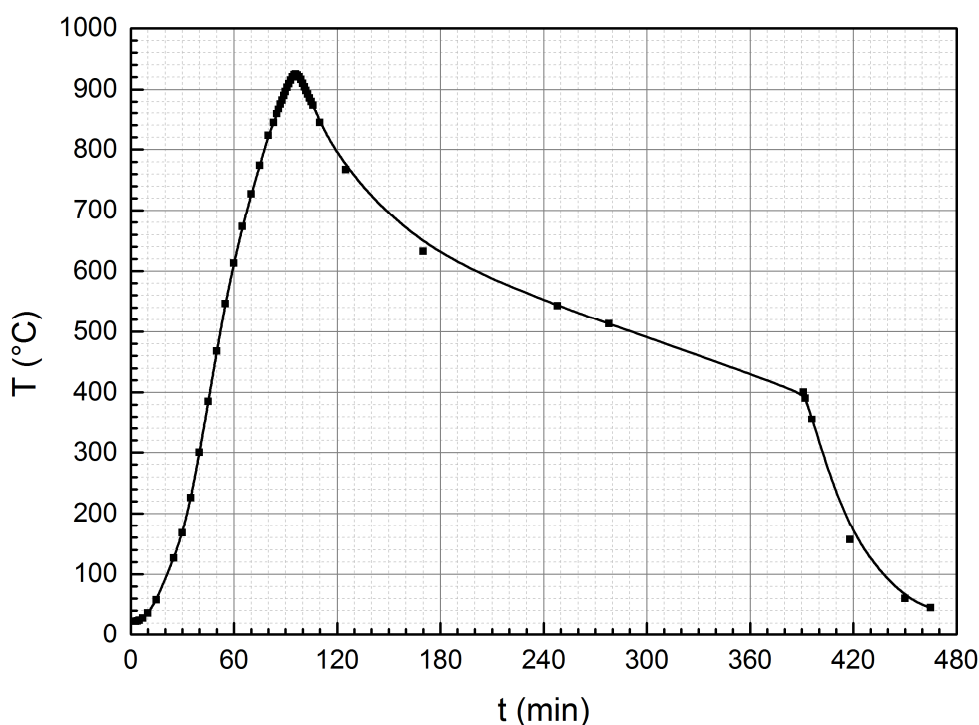
Obr. 63 Odloupnutá vrstva mědi od keramického substrátu způsobená vyjmutím plynotěsné retorty z pece při teplotě cca 650 °C.

Nežádoucímu odlupování okrajů měděné vrstvy je možné zabránit tím, že retorta zůstane celý vypalovací cyklus v peci. To však není výhodné z hlediska spotřeby dusíku, doby vypalovacího cyklu i povrchové oxidovatelnosti. Experimentálně bylo zjištěno, že k odlupování rohů nedochází, je-li retorta vyjmuta z pece při teplotě 400 °C a nižší. Vyjmutím retorty při

400 °C je tak možné dosáhnout všech požadovaných parametrů, při ušetření času i spotřeby dusíku.

Sérii experimentů byla sledována kvalita vypálené vrstvy především z hlediska míry oxidovatelnosti povrchu, adheze měděné vrstvy ke keramickému substrátu, kvality okrajů měděné vrstvy, velikosti zrn a elektrické vodivosti.

Bylo dospěno k ideálnímu teplotního profilu a množství vháněného dusíku během výpalu. Teplotní profil, kde je vyznačena teplota měřená termočlánkem v oblasti vzorků přímo v retortě, je uveden na obr. 64.



Obr. 64 Teplotní profil výpalu měděné pasty v experimentální retortě.

Koncentrace kyslíku uvnitř retorty musí být při výpalu pasty udržována na nízké úrovni, jinak dochází k silné oxidaci povrchu měděné vrstvy. Vzniklé oxidy je možné odstranit například pomocí zředěné kyseliny dusičné. Použití kyselin však s sebou přináší značné problémy, jako je například možnost zatečení kyseliny do pórů v mědi, odkud se tuto kyselinu nepodaří při čištění odstranit a může tak způsobit problémy v dalším používání a provozu substrátu. Další nevýhodou použití leptadel je, že dochází nejen k odleptání nežádoucích oxidů, ale také k odleptání měděné vrstvy a tím pádem k celkovému snížení tloušťky. Snahou je tedy tyto problémy minimalizovat a optimalizovat proces tak, aby nebylo nutné pokud možno žádného dodatečného čištění povrchu použít. To je však v případě použití plynotěsné retorty téměř nemožné, protože toto vypalovací zařízení nedosahuje takových možností v udržení nízké

koncentrace kyslíku jako plynotěsná nebo vakuová pec. Vhodnou optimalizací je však možné dosáhnout toho, že vrstva oxidů je velmi slabá a k jejímu odstranění postačí pouze použití tavidla při pájení nebo případně slabého vodného roztoku kyseliny citrónové. Optimální průtok dusíku do retorty byl experimentálně stanoven na 25 l/min. Právě tento průtok zajistí dostatečně nízký parciální tlak kyslíku, který zabrání vytvoření tlusté vrstvy oxidů na povrchu mědi. Vyšší průtok dusíku by byl teoreticky lepší z hlediska množství oxidů. Vysoký průtok studeného dusíku do retorty však také způsobí vyšší ochlazování vzorků v retortě při výpalu, a toto ochlazení se stane v objemu retorty značně nerovnoměrné a způsobí tak vznik nerovnoměrně vypálené měděné vrstvy, která má v různých místech různou adhezi a také různé další vlastnosti. Pro omezení tohoto vlivu by bylo možné dusík přehřívat například delší části trubičky, která je umístěna v peci.

7.2 Optimální proces výroby výkonových substrátů ve vakuové peci

Sérií experimentů byl stanoven optimální proces výroby výkonových substrátů vakuové peci, která byla pořízena ve společnosti ELCERAM. Podobně jako u vzorků vypalovaných v experimentální plynotěsné retortě, i zde byly výsledky výpalu hodnoceny především z hlediska míry oxidovatelnosti povrchu, adheze měděné vrstvy ke keramickému substrátu, velikosti zrn a elektrické vodivosti.

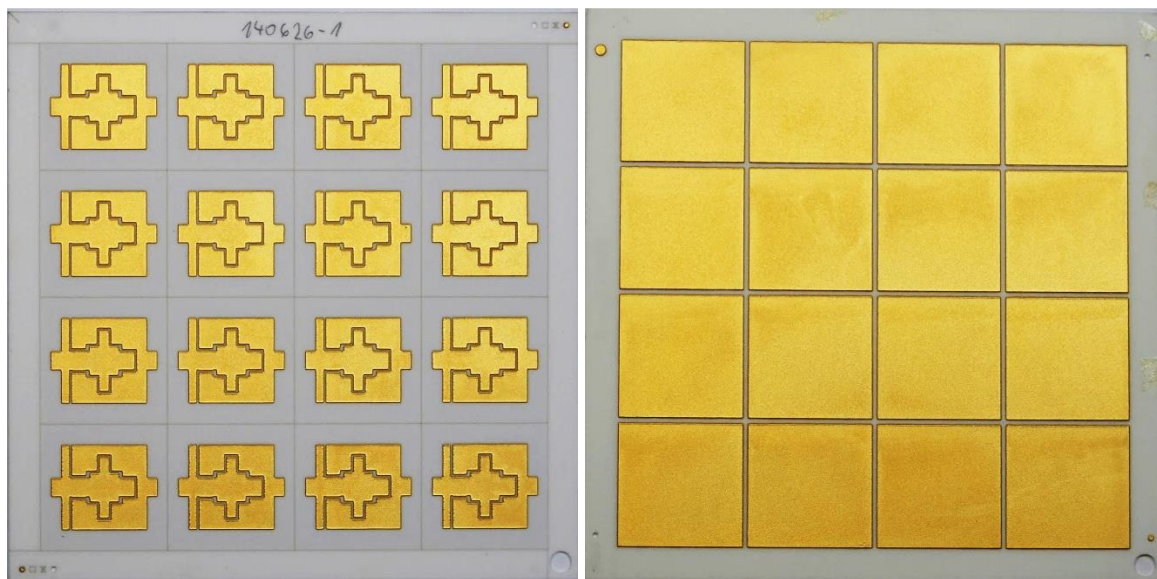
Potištěné substráty po sušení (125 °C po dobu 10 min) jsou vertikálně založeny do speciálních držáků a vloženy do pece. Před vlastním procesem výpalu je pec několikrát cyklicky vakuována po dobu cca pěti minut a poté vždy napuštěna dusíkem tak, aby tlak v peci dosáhl opět tlaku atmosférického. Po tomto dílčím procesu, který pomůže odstranit většinu nečistot z pece, přívodních hadiček apod. je pec zahřívána rychlostí 10 °C/min až na teplotu 400 °C. Během celé této doby je do pece vháněn dusík rychlostí 7 l/min a pec je zároveň vakuována na hodnotu tlaku kolem 40 mbar. Po dosažení tohoto tlaku v peci a teploty 400 °C je pec zahřívána rychlostí 30 °C/min při stálém udržování stejné atmosféry. Maximální teplota v peci při výpalu se pohybuje kolem 950 °C a trvá 20 min. Po dvaceti minutách na této maximální teplotě je vypnuto topení a pec nejrychlejším možným způsobem chladne. Při teplotě 250 °C je vypnut přívod dusíku a pec je vakuována na ještě nižší tlak (až $5 \cdot 10^{-2}$ mbar). Při teplotě kolem 50 °C je možné pec napustit vzduchem až na atmosférický tlak, otevřít ji a vyjmout vzorky. Všechny vzorky bývají po výpalu zpravidla čištěny slabým vodným roztokem kyseliny citrónové.

7.3 Finalizace povrchu výkonových substrátů

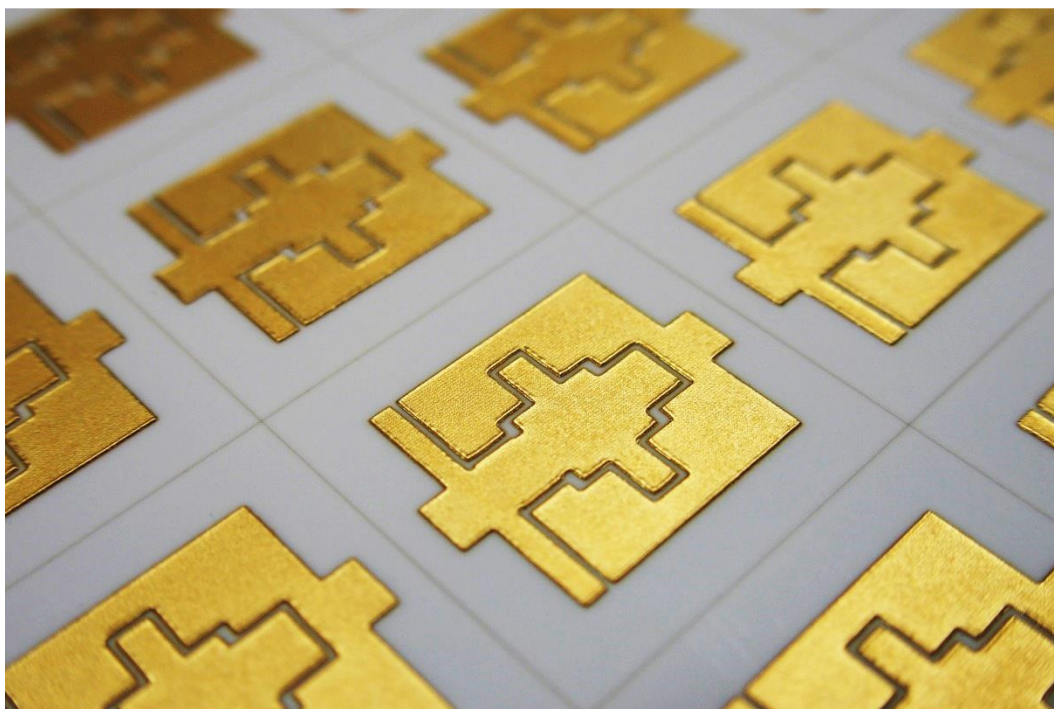
Pro zajištění dlouhodobé pájitelnosti a svažitelnosti kontaktních ploch vodivého měděného motivu a kvůli minimalizaci nežádoucí oxidace povrchu celé měděné vrstvy je nutné tuto vrstvu opatřit ochrannou povrchovou vrstvou. Ochranná vrstva může být například tvořena vrstvou ENIG nebo tištěnou vrstvou Ag – Pd.

7.3.1 Povrchová úprava dvojrstvou ENIG

Povrchová úprava ENIG je standardně používanou technologií při výrobě desek plošných spojů. Touto technologií je na celém měděném povrchu bezproudovým chemickým procesem vytvořena vrstva niklu s tloušťkou vrstvy 3 μm až 6 μm , na které je následně chemicky vytvořena vrstva imerzního zlata o tloušťce minimálně 0,05 μm (dle normy IPC-4552). Povrchová úprava ENIG přináší výhody dlouhodobě dobré svažitelnosti a pájitelnosti povrchu spolu s ověřeným technologickým procesem používaným v hromadné výrobě. Tato povrchová úprava byla realizována společností Pragoboard s.r.o. [51]

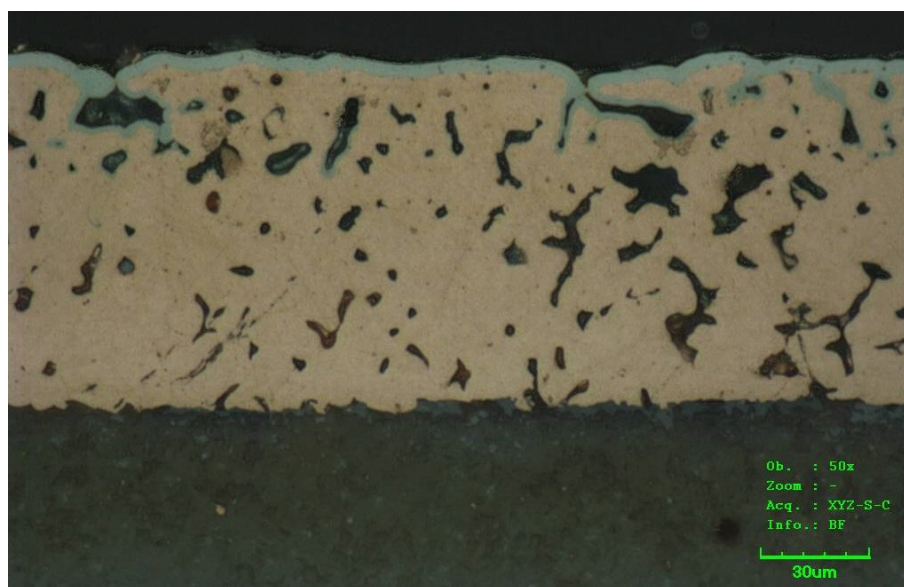


Obr. 65 Korundový substrát se šestnácti experimentálními CPV přijímači. Měděný motiv na lícové straně s ochrannou dvojrstvou ENIG je zobrazen vlevo, měděný motiv na rubové straně s ochrannou dvojrstvou ENIG je zobrazen vpravo.



Obr. 66 Korundový substrát s experimentálním CPV přijímači – měděný motiv s ochrannou dvojvrstvou ENIG.

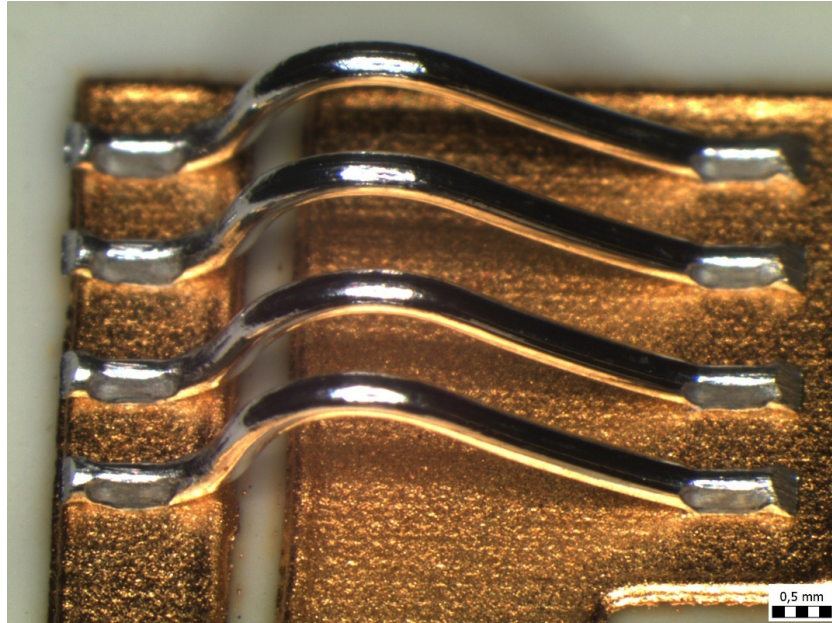
Na obr. 67 je zobrazen metalografický výbrus pokoveného substrátu měď – keramika. Pomocí konfokálního mikroskopu byla změřena průměrná tloušťka niklové vrstvy 4,11 μm .



Obr. 67 Metalografický výbrus substrátu chemicky pokoveného vrstvou Ni a Au.

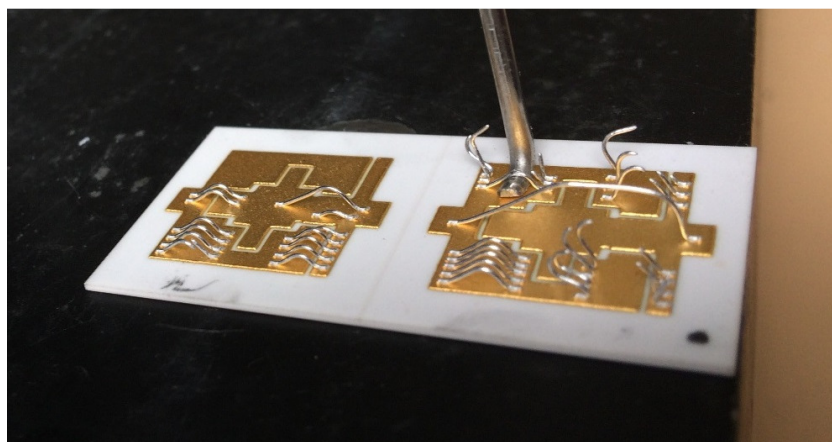
Ultrazvukové svařování na dvojvrstvě ENIG

Metodou wedge – wedge byly ultrazvukově přivařeny hliníkové drátky na měděnou vrstvu opatřenou dvojvrstvou ENIG. Drátky byly svařovány automatickou stanicí 5650 – Semi-automatic Heavy Wire–Wedge–Bonder ve společnosti F&S Bondtec v Rakousku. Protože hlavní využití těchto substrátů bude především ve výkonových aplikacích, kde se pracuje s vysokými proudy, byl průměr drátků zvolen 200 μm .



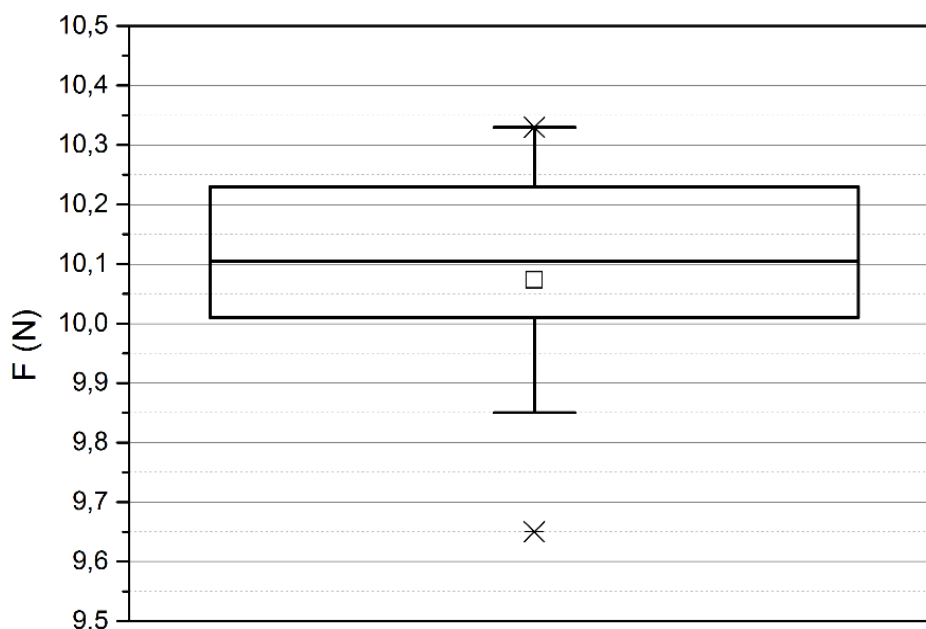
Obr. 68 Hliníkové drátky, které byly ultrazvukově přivařeny na měděnou vrstvu opatřenou dvojvrstvou ENIG.

Hliníkové drátky byly na trhacím zařízení namáhány silou pomocí speciálně vyrobeného trhacího nástroje, dokud nedošlo k přetržení (obr. 69).



Obr. 69 Fotografie z trhací zkoušky, kde je zobrazen měděný substrát pokovený dvojvrstvou ENIG s přivařenými hliníkovými drátky. Drátky byly trhány pomocí speciálního háčku.

Drátek se přerušil vždy uprostřed, při síle, která se pohybovala kolem 10 N. Graf z trhací zkoušky pro 10 vzorků je uveden na obr. 70. Z obrázku je zřejmé, že rozptyl naměřených hodnot je velmi malý a síla potřebná k odtržení je dostatečně velká, aby mohl být tento proces použit pro kontaktování ve výkonové elektronice.



Obr. 70 Krabicový graf zobrazující výsledky trhacích zkoušek pro hliníkové drátky s průměrem 200 μm , které byly ultrazvukově svařeny s měděnou vrstvou opatřenou dvojvrstvou ENIG.

7.3.2 Tištěná vrstva Ag – Pd

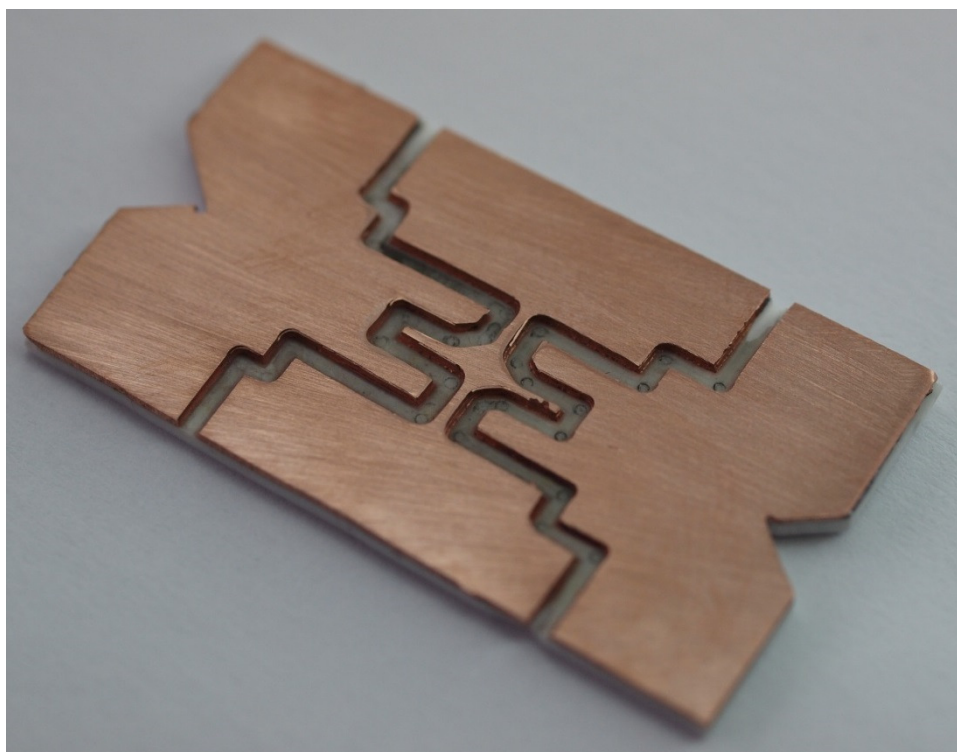
Jedná se o plně tištěnou variantu vytvoření ochranné vrstvy, která je přímo aplikovatelná ve společnosti ELCERAM. Ochranná Ag – Pd vrstva je selektivně nanášena sítotiskem a po sušení vypalována v inertní atmosféře. Vrstva je po výpalu je dobře pájitelná a svařitelná. Je možné ji nanášet na celou plochu tlusté měděné vrstvy, ale vzhledem k ceně Ag – Pd pasty je vhodnější tuto pastu aplikovat pouze na pájecí plošky, plošky určené pro ultrazvukové svařování a místa pod čipovými součástkami. Zbývající odhalené plochy měděné vrstvy mohou být před nežádoucí oxidací ochráněny skleněnou glazurou (např. Heraeus IP9038A), kterou je možné podobně jako Ag – Pd pastu nanést sítotiskem a následně vypálit v inertní atmosféře. Kombinací Ag – Pd vrstvy a glazury může být před nežádoucími vnějšími vlivy ochráněn celý povrch měděného motivu výkonového substrátu.

8 Praktické využití substrátů pro výkonové aplikace

Při řešení disertační práce byly navrženy a vyrobené substráty již úspěšně použity v několika aplikacích a také zavedeny do výroby ve společnosti ELCERAM. Technologie DBC byla mimo jiné využita při konstrukci speciálního fotoreaktoru, který obsahuje výkonové LED. Tento fotoreaktor je uveden v kap. 8.1. Technologie TPC byla využita pro realizaci fotovoltaického modulu s optickým koncentrátorem. Disertační práce umožnila také vzniknout dvěma funkčním vzorkům „Pokročilý CPV přijímač“ a „Řešení pouzdření CPV přijímače.“

8.1 Výkonové LED moduly

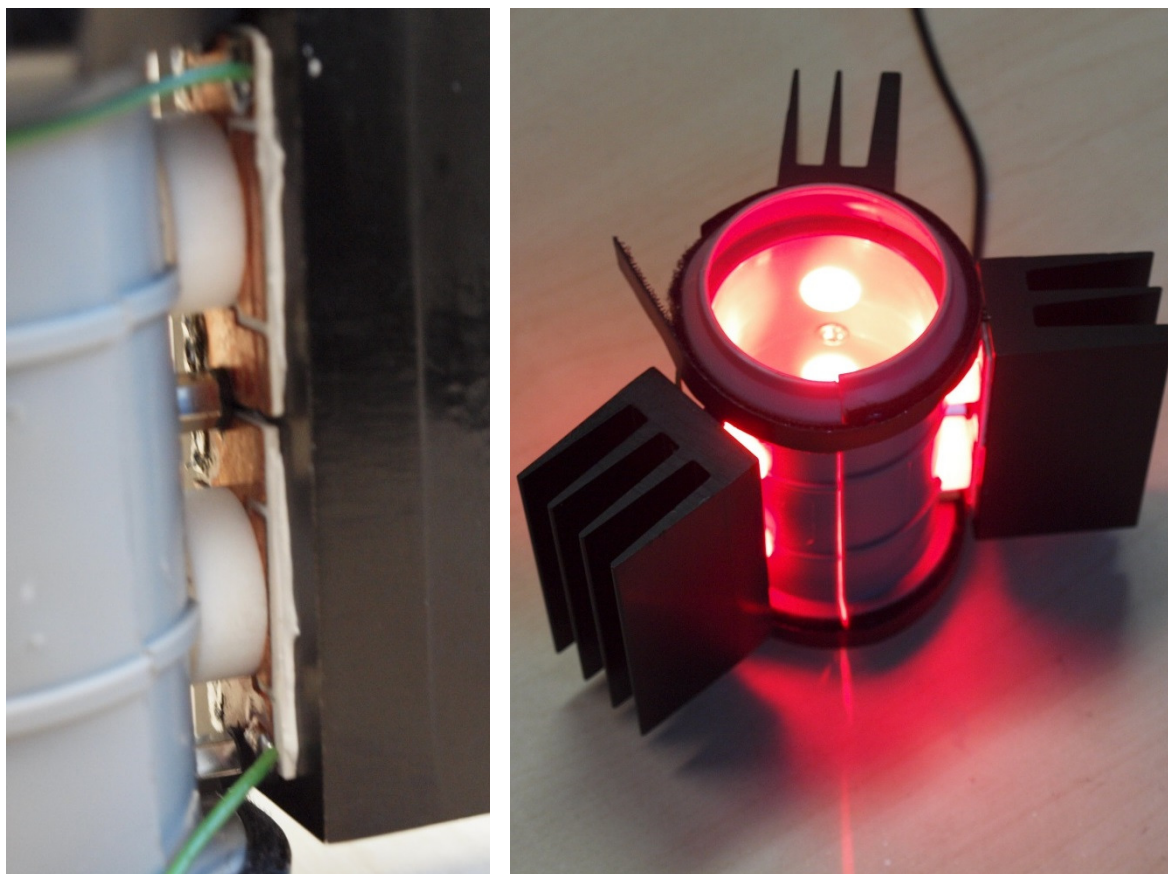
Substráty, které jsou realizovány technologií TPC nebo technologií DBC je možné s výhodou použít pro moduly, které jsou určeny pro výkonové LED. Substráty realizované technologií DBC ve speciální plynotěsné retortě (obr. 71) již byly použity pro realizaci funkčního vzorku fotoreaktoru pro osvit fotosenzitizátorů na bázi ftalocyaninů.



Obr. 71 Substrát realizovaný technologií DBC určený pro výkonové LED – rozměry substrátu jsou 31 mm x 18 mm.

Substráty zde napomáhají s odvodem ztrátového tepla z výkonových LED do pasivních chladičů, viz obr. 72. U předchozí verze fotoreaktoru byly použity sklo – epoxidové substráty.

Vzhledem k velké výkonové ztrátě LED nebylo možné provozovat diody na plný výkon, aniž by nedošlo k jejich zničení vlivem nadměrného zahřívání (dovolená teplota diod je 125 °C). Substráty, které byly vyrobeny technologií DBC, pomohly snížit teplotu diod při provozu zařízení z původních 130 °C na teplotu nižší než 70 °C a umožnily jejich spolehlivý provoz na jmenovitém výkonu.



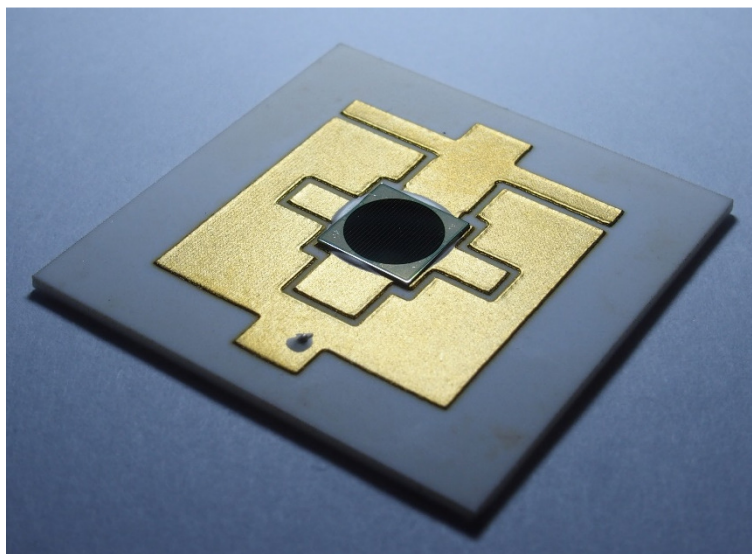
Obr. 72 Fotografie fotoreaktoru pro osvit fotosenzitizátorů na bázi ftalocyaninů. Obrázek vlevo demonstruje umístění substrátů vyrobeného technologií DBC. Obrázek vpravo zobrazuje zapnutý fotoreaktor, který slouží dále k nasazení na skleněnou trubku, v níž proudí médium s ftalocyaninem. Osvitem ftalocyaninu dochází k čištění této kapaliny.

8.2 Výkonové moduly pro koncentrovanou fotovoltaiku

Technologie TPC byla použita pro výrobu funkčního vzorku označeného jako „Pokročilý CPV přijímač.“ Funkční vzorek vznikl v přímé souvislosti s řešením projektu LF14029 „ASES – Chytrý solární alternativní zdroj elektrické energie o vysoké účinnosti“ a ED2.1.00/03.0094 „RICE – Regionální Inovační Centrum Elektrotechniky.“ Jedná se o elektronický funkční blok určený pro generaci elektrické energie ze slunečního záření. CPV přijímač je určen pro přímou

montáž do solárních panelů s čočkovým, popř. zrcadlovým koncentrátorem a umožňuje konstrukci pozemních koncentrovaných fotovoltaických systémů. Pokročilý CPV přijímač se skládá z korundového substrátu, který byl opatřen vodivým měděným motivem technologií TPC a povrchovou úpravou ENIG a více přechodového solárního článku s účinností větší než 38 %, který byl k měděné vrstvě ultrazvukovým svařováním kontaktován prostřednictvím hliníkových drátků. Tento pokročilý CPV přijímač je uveden na obr. 73.

Na čip fotovoltaického modulu dopadá koncentrovaný paprsek slunečního záření, který způsobuje velmi rychlé ohřívání relativně malé oblasti čipu. Toto teplo je nutné odvádět pryč z čipu do chladiče. Přestup tepla z čipu do chladiče musí být co nejvíce efektivní. Právě proto byl realizován základní substrát pro CPV přijímač technologií TPC, která umožňuje vynikající přestup tepla. Dalším argumentem pro toto řešení je také fakt, že obvodem, ve kterém je čip součástí, prochází vysoké proudy v řádu jednotek až desítek ampér, a proto musí být vodivá vrstva dostatečně tlustá, aby mohla takovéto proudy přenášet bez dalšího nežádoucího zahřívání.



Obr. 73 Funkční vzorek pokročilého CPV přijímače.

8.3 Výkonové inteligentní moduly

Technologie TPC může být použita jako alternativa k vodivé Ag – Pd vrstvě, která se standardně používá při výrobě korundových substrátů s tištěnou vodivou vrstvou. Několika násobně tlustější vodivá vrstva u technologie TPC umožňuje rozšíření oblasti použití například na výkonové inteligentní moduly, IGBT, zařízení pro spínání velkých proudů, výkonové LED apod. a také všude tam, kde se doposud standardně používala technologie DBC.

8.4 Zavedení technologie ve společnosti ELCERAM

Společnost ELCERAM již více než dvacet let vyrábí keramické substráty s elektronickými obvody, které jsou vytvořeny technologií tlustých vrstev s vodivou vrstvou Ag – Pd nebo Ag – Pt. Tloušťka této vrstvy se obvykle pohybuje od 12 μm do 16 μm . Pro vrstvy s větší tloušťkou byla ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni do společnosti ELCERAM zavedena nová technologie TPC se záměrem rozšířit výrobní technologie, které jsou poptávány zákazníky a postupně zavádět výrobu finálních výrobků z oblasti výkonové elektroniky, jako např. přijímače solárního záření, výkonové osvětlovací moduly s LED, výkonové moduly řízení elektromotorů apod. Nová technologie je podrobně popsána ve výrobních předpisech firmy ELCERAM. [52]

9 Závěr

Disertační práce se věnuje problematice korundových substrátů pokovených mědi pro výkonové aplikace, především z hlediska technologie jejich výroby, testování a praktického použití. Věnuje se také následnému transferu technologie do výroby. V práci je uveden popis současného stavu problematiky ve sledované oblasti a navržen směr řešení. Pozornost je věnována především technologii tisku tlusté vrstvy mědi (TPC), která má, v porovnání s technologií přímého spojování keramiky s mědi (DBC), celou řadu výhod. Obě tyto technologie byly v praktické části disertace testovány, a protože lepších výsledků bylo dosaženo s perspektivní a novou technologií TPC, bylo také této technologii věnováno více pozornosti.

Technologie TPC, která umožňuje vytváření vodivých sítí pro výkonové moduly, je novinkou posledních několika let. V současné době probíhá u výrobců past intenzivní vývoj nových materiálů pro tuto technologii. Paralelně probíhají u výrobců výkonových modulů první pokusy se zaváděním této technologie do výroby. Vývoj materiálů však není ukončen a ani výrobní procesy pro technologii TPC v současné době nejsou jasně definovány. Právě optimalizace výrobního postupu TPC a detailní zmapování parametrů dostupných past je největším přínosem této práce. Technologií TPC je při použití nových měděných past možné dosáhnout tloušťky vodivé vrstvy až 300 μm a vyrovnat se tak tím tloušťce vodivé vrstvy vytvořené technologií DBC. Tisk tlusté vrstvy mědi navíc umožňuje selektivní zvětšování tloušťky mědi v místech, kde je vyžadován průtok velkých proudů nebo v místech, kde je důležité dobře odvádět ztrátové teplo z výkonové součástky. Disertační práce byla řešena ve spolupráci s výrobní společností ELCERAM. Práce pomohla se zavedením technologie TPC do malosériové výroby v této společnosti.

Disertační práce se kromě spolupráce s výrobní firmou ELCERAM opírá také o mezinárodní projekt ASES (Chytrý solární alternativní zdroj elektrické energie o vysoké účinnosti) v programu Eureka. Tento projekt je čtyřletý a běží od roku 2014 do roku 2017. Cílem projektu je vytvořit nový výrobek – účinný fotovoltaický systém s optickým koncentrátorem. Protože je čip systému velmi ohříván dopadajícím koncentrovaným slunečním zářením, bylo pro účely chlazení, umožnění průtoku vysokých proudů a mechanické podložky součástek, zvoleno efektivní řešení korundového substrátu vytvořeného technologií TPC, které je blíže popsáno v textu této práce. Toto řešení navíc umožňuje zajistit přenos velkých proudů bez nežádoucích ztrát a kvalitní mechanickou oporu pro citlivé nezapouzdřené polovodičové součástky.

První úspěšné pokusy s technologií DBC, které jsou uvedeny v tezích disertační práce [37], byly jedním ze spouštěcích mechanismů celého mezinárodního projektu ASES.

Společnost ELCERAM nebude vyrábět substráty na bázi korund – měď pouze pro fotovoltaiku s optickým koncentrátorem, ale také pro další odvětví výkonové elektroniky, jako jsou výkonové LED moduly, spínací a inteligentní moduly s IGBT, měniče nebo další speciální aplikace například pro automobilový průmysl.

Technologie TPC je alternativou k technologii, která využívá Ag – Pd nebo Ag – Pt vrstvu pro tisk vodivých motivů. Tato technologie je již dlouhou dobu zavedena ve společnosti ELCERAM. Technologií tisku s Ag – Pd nebo Ag – Pt vrstvou je velmi obtížné a nákladné tisknout tlusté vrstvy v řádu stovek mikrometrů, proto bude pro aplikace vyžadující tlusté vodivé vrstvy používána technologie TPC.

Nutnost výpalu měděných vrstev v ochranné atmosféře či ve vakuu vede ke značné investiční náročnosti. Pro výpal substrátů byla proto nejprve navržena a vyrobena plynotěsná retorta, která se vloží do standardní muflové pece. Retorta může být použita pro technologii TPC, pro technologii DBC, ale i pro další technologie, kde je požadována nízká koncentrace kyslíku během výpalu. Celkové pořizovací náklady na retortu se pohybovaly kolem 50 000 Kč a celkové náklady na muflovou pec i s příslušenstvím byly do 100 000 Kč. Disertační práce tak pomohla vybavit Katedru technologií a měření na Západočeské univerzitě v Plzni nízkonákladovým a efektivním řešením pro kusovou výrobu výkonových substrátů jak technologií DBC, tak technologií TPC, které je zcela unikátní. Na základě zkušeností a výsledků z této retorty bylo navrženo řešení pro malosériovou výrobu do společnosti ELCERAM. Pořizovací náklady na pec, která kombinuje výpal ve vakuu s výpalem v dusíku, se pohybují kolem 1 500 000 Kč. Cena průběžné pece pro velkosériovou výrobu se pohybuje kolem deseti miliónů korun. Po pořízení obou pecí byly sérií experimentů s výpalem a testováním nalezeny optimální vypalovací procesy, které jsou uvedeny v kap. 7.

Během řešení disertační práce bylo již realizováno několik výrobků, které obsahují substrát korund – měď vyrobený technologií TPC nebo DBC ve speciální plynotěsné retortě nebo v peci, kombinující výpal ve vakuu s výpalem v dusíku. Jedním z příkladů těchto výrobků je substrát realizovaný technologií DBC, určený pro výkonové LED, které umožňují ve speciálním fotoreaktoru osvit fotosenzitizátorů na bázi ftalocyaninů. Substrát realizovaný technologií TPC byl použit pro základnu chytrého fotovoltaického modulu s optickým koncentrátorem.

Splnění cílů disertační práce

Disertační práce splnila všechny stanovené cíle:

1. **Realizace substrátu na bázi korund – měď vhodného pro výkonové aplikace se specifickými vlastnostmi.**

Tento substrát byl vyroben v laboratorních podmínkách technologií DBC a technologií TPC. Následně proběhl transfer technologie TPC také do komerční sféry ve společnosti ELCERAM.

2. **Porovnání technologie přímého spojení mědi s korundem (DBC) a technologie tisku tlusté vrstvy mědi (TPC).**

V rámci řešení disertační práce byly otestovány obě technologie. Technologie tisku tlustých měděných vrstev přinesla oproti technologii DBC celou řadu výhod jako např. možnost selektivního zesílení tloušťky měděné vrstvy, možnost křížení vodivých cest, vyšší rozlišitelnost vodivých obrazců, možnost vytváření pokovených otvorů nebo jednodušší a méně nákladný proces výroby. Technologii TPC byla proto věnována větší pozornost.

3. **Realizace a optimalizace technologie DBC i technologie TPC pro kusovou výrobu.**

Byl navržen jednoduchý a efektivní postup vytváření vodivých obrazců technologií TPC i pro spojení mědi s keramikou technologií DBC, které má minimální pořizovací náklady. Tento postup využívá speciálně navrženou plynotěsnou retortu, která je vložena do standardní muflové pece.

4. **Vytvoření metodiky testování substrátů pro výkonové aplikace.**

Disertační práce obsahuje souborný postup pro testování výkonových substrátů. Výsledky některých navržených testů jsou také obsaženy v praktické části této práce.

10 Literatura

- [1] ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická. *Výkonová elektronika I.* [online]. [cit. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1B14VE1T/-AD1B14VE1.pdf>.
- [2] ČEŘOVSKÝ, Z., R. GRIC a J. PAVELKA. *Výkonová elektronika I.* Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 196 s. ISBN 80-010-0723-5.
- [3] Electorevue. *Výkonové elektronické součástky* [online]. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.electorevue.cz/clanky/00014/index.html>.
- [4] PAVELKA, J., Z. ČEŘOVSKÝ a J. LETTL. *Výkonová elektronika*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [5] HARPER, CH. A. *High performance printed circuit boards*. Boston: McGraw-Hill, c2000, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 00-702-6713-8.
- [6] SUN, Y.S. a J.C. DRISCOLL. *A new hybrid power technique utilizing a direct Copper to ceramic bond*. IEEE Transactions on Electron Devices. roč. 23, č. 8, s. 961-967. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/T-ED.1976.18517. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/-wrapper.htm?arnumber=1478530>.
- [7] Curamik electronics gmbh. *DBC Substrates* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.curamik.com/en/product-types/1/DBC-Substrates.aspx>.
- [8] BARLOW, F. D. a A. ELSHABINI. *Ceramic interconnect technology handbook*. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2007, 441 p. ISBN 978-142-0018-967.
- [9] Dupont. *Benchmark study of metal core thermal laminates* [online]. [cit. 2013-06-10]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/LED_Lighting/en_US/assets/downloads/pdf/-MetalCoreThermallaminate_Benchmark.pdf.
- [10] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991, 463 s. ISBN 80-030-0617-1.
- [11] KOTLÍK, B. a K. RŮŽIČKOVÁ. *Chemie I. v kostce: [obecná a anorganická chemie, výpočty v oboru chemie] : pro střední školy*. 4. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2005, 119 s. ISBN 80-253-0031-5.

- [12] TRNKA P., M. BUJALOBOKOVÁ. *Progresivní keramika v elektronických aplikacích*. Advances in electrical and electronic engineering. 2007, vol. 6, no. 3, p. 440-443.
- [13] IWASE, N., K. ANZAI, K. SHINOZAKI, O. HIRAO, H. TROUNG THANH, Y. SUGIURA, K. EXEL a A. UTZ-KISTNER. *Thick Film and Direct Bond Copper Forming Technologies for Aluminum Nitride Substrate*. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. IEEE, 2003, roč. 8, č. 2, s. 253-258. ISSN 0148-6411. DOI: 10.1109/TCHMT.1985.1136501. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/-wrapper.htm?arnumber=1136501>.
- [14] RADOSAVLJEVIC, G., A. MARIC, G. STOJANOVIC, L. ŽIVANOV, W. SMETANA, M. UNGER a H. HOMOLKA. *Application of the LTCC Technology for the Fabrication of the RF 3D Inductor*. Romanian journal of information science and technology [online]. Bucharest: Publishing house of the Romain Academy, 2008, 11: 193-202 [cit. 2015-07-07]. ISSN 1453-8245. Dostupné z: http://www.imt.ro/romjist/Volum11/Number11_2/pdf/09-Radosavljevic.pdf.
- [15] ESL Electro Science. *Materials for planar oxygen sensors and other HTCC multilayer structures*. Thick-film materials & ceramic tapes [online]. 2015 [cit. 2015-07-12]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/sensormaterials.html>.
- [16] Semiconductor Wafer, Inc. *Ceramic Wafer* [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.semiwafer.com/products/ceramic.htm>.
- [17] Azonet Work UK LTD. *Zirconia (ZrO₂) - Material, Properties and Applications of Zircalon Ceramics by International Syalons* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4507>.
- [18] CARTER, C a M NORTON. *Ceramic materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 2013, xxxiii, 766 s. ISBN 9781461435228.
- [19] HANYKÝŘ, V. a J. KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Vyd. 2., V Silikátovém svazu 1. Praha: Silikátový svaz, 2008, 387 s., [9] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [20] GUPTA, T. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2003, xv, 406 p. ISBN 04-712-7229-9.
- [21] NCAB Group. *IMS – Insulated Metal Substrate* [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2011/09/NCAB_Group_IMS.pdf.

- [22] ESL Electro Science. *Thick-film pastes for the manufacture of low-cost, insulated aluminum substrates suitable for use as heat sinks for high-power LED applications*. *ESL ElectroScience* [online]. 2015 [cit. 2015-08-02]. Dostupné z: <http://electroscience.com/thickfilmonal.html>.
- [23] Heraeus. *Dielectric for Aluminum Substrates*. *Heraeus circuits components* [online]. 2015 [cit. 2015-08-02]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/celcion_pastes_on_aluminum/IP6075.pdf.
- [24] Heraeus. *Dielectric Paste for Chromium Steel / DPIS*. *Heraeus circuits components* [online]. 2015 [cit. 2015-08-02]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/pastesonmetal/SD_1010_300112.pdf.
- [25] IHLEFELD, J.F., J-P. MARIA a W. BORLAND. *Dielectric and microstructural properties of barium titanate zirconate thin films on copper substrates*. *Journal of Materials Research* [online]. 2005, 20(10): 2838-2844 [cit. 2015-07-07]. DOI: 10.1557/JMR.2005.0342. ISSN 0884-2914. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0884291400095121.
- [26] BURGESS, J. F., C. A. NEUGEBAUER, G. FLANAGAN a R. E. MOORE. *The Direct Bonding of Metals to Ceramics and Application in Electronics*. *ElectroComponent Science and Technology*. roč. 2, č. 4, s. 233-240. ISSN 0305-3091. DOI: 10.1155/APEC.2.233. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/apec/1976/428415/abs/>.
- [27] ENQUIST, P., G. FOUNTAIN, C. PETTEWAY, A. HOLLINGSWORTH, H. GRADY, A. ROGG, K. EXEL a A. UTZ-KISTNER. *Low Cost of Ownership scalable copper Direct Bond Interconnect 3D IC technology for three dimensional integrated circuit applications*. *2009 IEEE International Conference on 3D System Integration*. IEEE, 2009, roč. 23, č. 8, s. 1-6. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/3DIC.2009.5306533. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5306533>.

- [28] SCHULZ-HARDER, J., J.B. DEZORD, C. SCHAEFFER, Y. AVENAS, O. PUIG, A. ROGG, K. EXEL a A. UTZ-KISTNER. *DBC (direct bond copper) substrate with integrated flat heat pipe*. Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium. IEEE, 2006, roč. 23, č. 8, s. 152-156. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625221. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/-wrapper.htm?arnumber=1625221>.
- [29] SCHULZ-HARDER, J., J.B. DEZORD, C. SCHAEFFER, Y. AVENAS, O. PUIG, A. ROGG, K. EXEL a A. UTZ-KISTNER. *DBC substrates as a base for power MCM's*. Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456). IEEE, 2000, roč. 23, č. 8, s. 315-320. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/EPTC.2000.906393. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/-wrapper.htm?arnumber=906393>.
- [30] ESL Electro Science. *Resinates: Resinate Pastes, Resinate Powders and Resinate Solutions* [online]. 2015 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/en/products_and_applications/resinates/circuits_and_components_resinates.aspx.
- [31] Heraeus. *Heraeus Circuits & Components* [online]. 2015 [cit. 2015-08-02]. Dostupné z: http://heraeus-thickfilm.com/en/productsapplications/copper_pastes/copper_pastes_1.aspx.
- [32] Heraeus. *Products and Applications* [online]. 2013 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/en/products_and_applications/products_and_applications.aspx.
- [33] Heraeus.. *Copper Conductor / DPIS: C7720* [online]. 2015 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/copper_pastes/C_7720_LPA_913-236_en.pdf.
- [34] SCHULZ-HARDER, J., K. EXEL, C. PETTEWAY, A. HOLLINGSWORTH, H. GRADY, A. ROGG, K. EXEL a A. UTZ-KISTNER. *Recent developments of direct bonded copper (DBC) substrates for power modules*. Fifth International Conference on Electronic Packaging Technology Proceedings. 2003. ICEPT2003. IEEE, 2003, roč. 23, č. 8, s. 491-496. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/EPTC.2003.1298787. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/-lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1298787>.

- [35] SCHULZ-HARDER, J. a J.C. DRISCOLL. *Advanced DBC (direct bonded copper) substrates for high power and high voltage electronics*. Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium. IEEE, 2006, roč. 23, č. 8, s. 230-231. ISSN 0018-9383. DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625233. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1625233>.
- [36] NEUMANN, J. P., T. ZHONG a Y. A. CHANG. *The Cu–O (Copper-Oxygen) system*. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. 1984, (Volume 5): 136-140. Dostupné také z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02868948>.
- [37] HROMADKA, K. *Perspektivní substráty pro výkonové aplikace*. 1. vyd. 2013, 45 s.
- [38] Heraeus. *Heraeus Copper Pastes for Hybrid Electronic Circuits* [online]. 2015 [cit. 2015-07-10]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/broschueren/Heraeus_Copper_Pastes_for_Hybrid_Electronic_Circuits.pdf.
- [39] DAVIS, J. *Copper and copper alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 2001, vii, 652 p. ISBN 0871707268.
- [40] OGWU, A., T. DARMA a E. BOUQUEREL. *Electrical resistivity of copper oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering*. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering* [online]. Gliwice, Poland: International OCSCO World Press, 2007, 24(1) [cit. 2015-07-09]. ISSN 1734-8412. Dostupné z: http://www.journalamme.org/papers_vol24_1/24121.pdf
- [41] Pubchem: Open Chemistry database. *Copper oxide*. [online]. 2015 [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14830#section=Top>.
- [42] Pubchem: Open Chemistry database. *Cupric oxide* [online]. 2015 [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/cupric_oxide#section=Top.
- [43] DORRANIAN, D., L. DEJAM, A. H. SARI a A. HOJABRI. *Structural and optical properties of copper nitride thin films in a reactive Ar/N₂ magnetron sputtering system*. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2010, (Volume 50). DOI: 10.1051/epjap/2010040. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/231975974_Structural_and_optical_properties_of_copper_nitride_thin_films_in_a_reactive_ArN2_magnetron_sputtering_system.

- [44] DU, Y., L. GAO, CH. R. LI a A. L. JI. *Thermal stability and electrical properties of copper nitride with In or Ti*. Chinese Physics B [online]. 2013, 22(6) [cit. 2015-08-11]. DOI: 10.1088/1674-1056/22/6/066804.
- [45] Heraeus. *Heraeus Thick Copper Conductor Pastes*. [online]. 2015 [cit. 2015-07-09]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/broschueren/Heraeus_Thick_Copper_Conductor_Pastes.pdf.
- [46] ESL Electro Science. *2312-G* [online]. 2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/pdf/2312-G.pdf>.
- [47] ESL Electro Science. *Specialty Conductor Pastes* [online]. 2015 [cit. 2015-07-09]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/specialty.html>.
- [48] Chemicalelements.com. *Periodic table: bismuth* [online]. 2015 [cit. 2015-07-09]. Dostupné z: <http://www.chemicalelements.com/elements/bi.html>.
- [49] CHAKRABARTI, D. J. a D. E LAUGHLIN. *The Bi–Cu (Bismuth-Copper) System. Bulletin of alloy phase diagrams*. Issue 2. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1980, 1984(Volume 5): 148-155. ISSN 0197-0216.
- [50] KITTEL, CH. *Introduction to solid state physics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1956, xv, 617 s.
- [51] HEŘMANSKÝ, V., J JOHAN a J ŘEBOUN. ELCERAM A.S. *EUREKA ASES - Chytrý solární alternativní zdroj elektrické energie o vysoké účinnosti*. Výzkumná zpráva za rok 2014. Hradec Králové, 2014.
- [52] JOHAN J. *Výrobní předpis technologie TPC*. ELCERAM a.s. Hradec Králové. 2015.

Seznam publikací autora

Publikace vztahující se k předmětu disertační práce

- [1] HROMADKA, K. *Perspektivní substráty pro výkonové aplikace*. 1. vyd. 2013, 45 s.
- [2] HROMADKA, K., HAMÁČEK, A., KROUPA, M., ŠTULÍK, J. *Přímé bondování mědi na keramický substrát*. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 35-36. ISBN: 978-80-261-0120-8.
- [3] HROMADKA, K. *DBC technologie pro výrobu substrátů určených pro výkonové aplikace*. In *Elektrotechnika a informatika 2013. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 41-44. ISBN: 978-80-261-0233-5.
- [4] HROMADKA, K., ŠTULÍK, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. *DBC Technology for low cost power electronic substrate manufacturing*. In *Procedia Engineering*. Vienna: Elsevier, 2014. s. 1180-1183, ISSN: 1877-7058.
- [5] HROMADKA, K., ŠTULÍK, J., ŘEBOUN, J. *Thick Printed Copper Conductors on Alumina substrates*. In *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2014)*. Piscataway: IEEE, 2014. s. 95-98. ISBN: 978-1-4799-4455-2, ISSN: 2161-2528.
- [6] HROMADKA, K., ŠTULÍK, J. *Testování substrátů keramika–měď s měděnou vrstvou vytvořenou pomocí sítotiskové pasty C7710*. 2014.
- [7] HROMADKA, K., ŘEBOUN, J., RENDL, K., WIRTH, V., HAMÁČEK, A. *Comparison of the surface properties of power electronic substrates*. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-963-313-177-0.

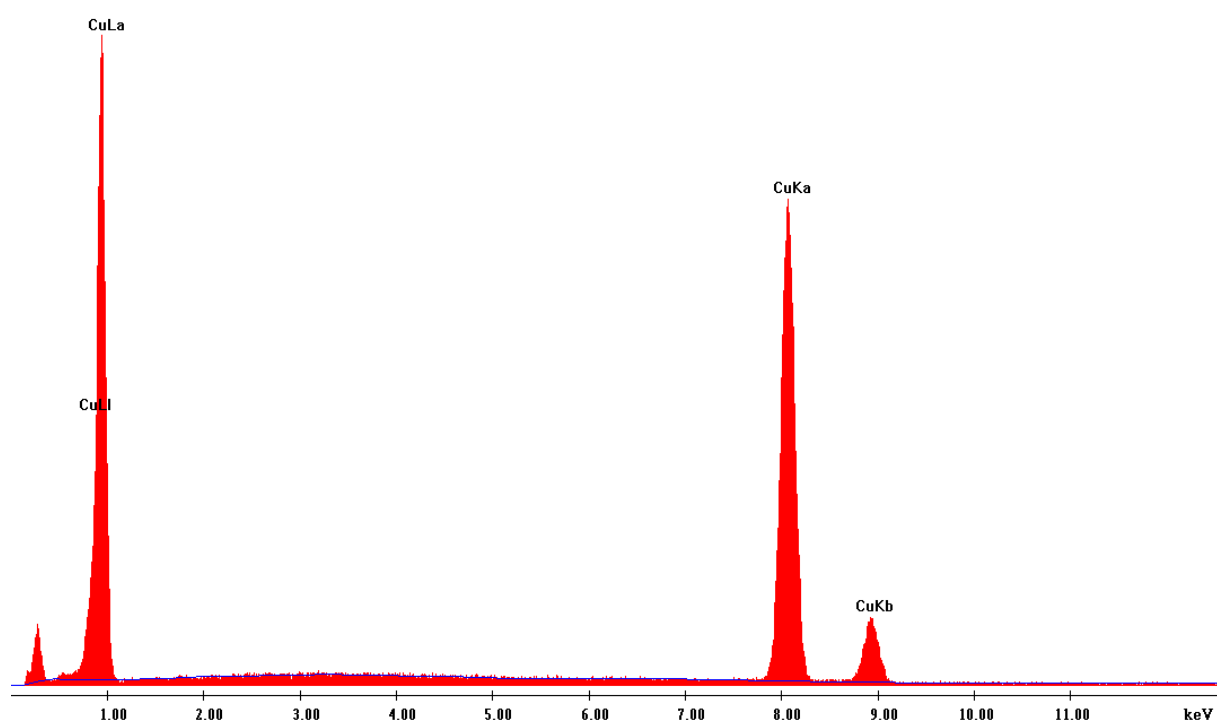
Funkční vzorky

- [1] ŘEBOUN, J., J. JOHAN, K. HROMADKA, A. HAMÁČEK. *Pokročilý CPV přijímač*. Česká republika. ZČU v Plzni, 2015.
- [2] ŘEBOUN, J., J. JOHAN, K. HROMADKA, A. HAMÁČEK. *Řešení pouzdrění CPV přijímače*. Česká republika. ZČU v Plzni, 2015.

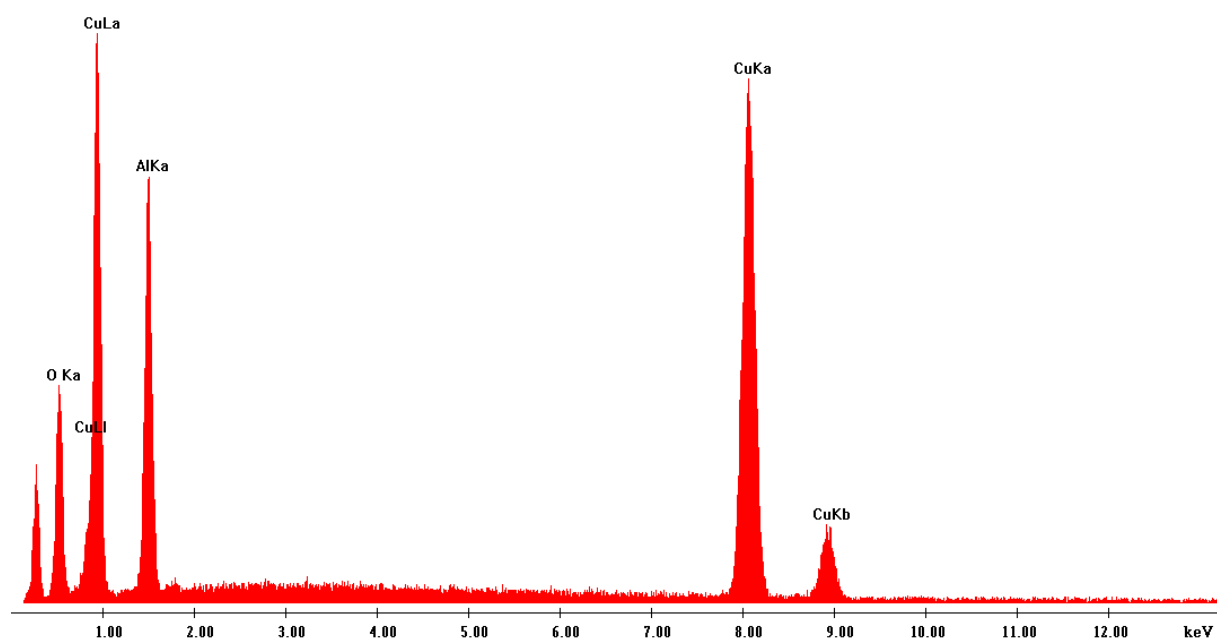
Ostatní publikace

- [3] HROMADKA, K. *Realizace přípravků pro laboratorní úlohy měření teplot.* In *Elektrotechnika a informatika 2010. Část 2., Elektronika.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 45 - 46. ISBN: 978-80-7043-914-2.
- [4] HROMADKA, K., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., DŽUGAN, T. *Tisk resinátových past.* In *Elektronika a informatika 2011; část první - Elektrotechnika.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 29-30. ISBN: 978-80-261-0016-4.
- [5] PRETL, S., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., DŽUGAN, T., HROMADKA, K. *Planar heterostructures based on organic semiconductor.* In *ISSE 2011.* Piscataway, NJ: Technical University of Košice, 2011. s. 73-78. ISBN: 978-1-4577-2111-3 , ISSN: 2161-2528.
- [6] HROMADKA, K., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., DŽUGAN, T., KRPAL, O. *Diagnostic of printed resin paste.* In *Diagnostika '11.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 13-16. ISBN: 978-80-261-0020-1.
- [7] DŽUGAN, T., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., HROMADKA, K., VIK, R. *Cross-sensitivity of humidity sensor layers based on organic materials.* In *Electronics Technology (ISSE), 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology - Power Electronics.* Piscataway: IEEE, 2012. s. 37-40. ISBN: 978-1-4673-2240-9 , ISSN: 2161-2528.

Přílohy



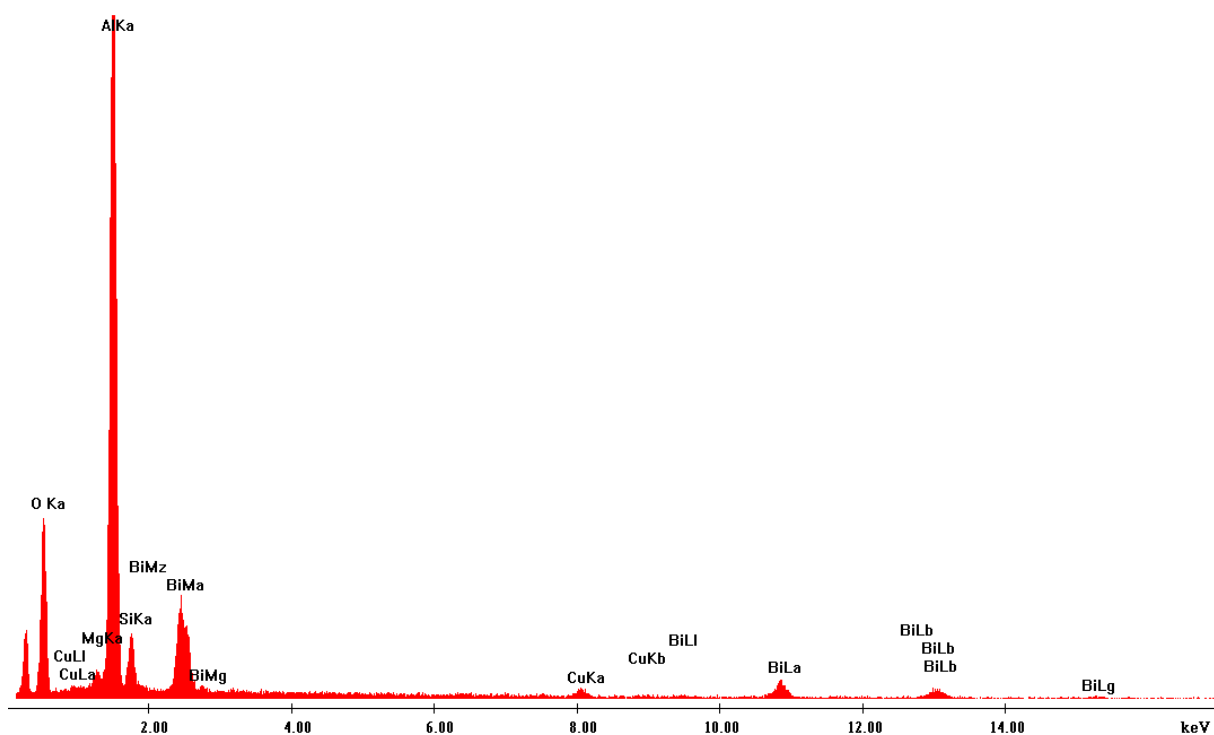
Obr. I. Prvkové složení v závislosti na energii – oblast 2.



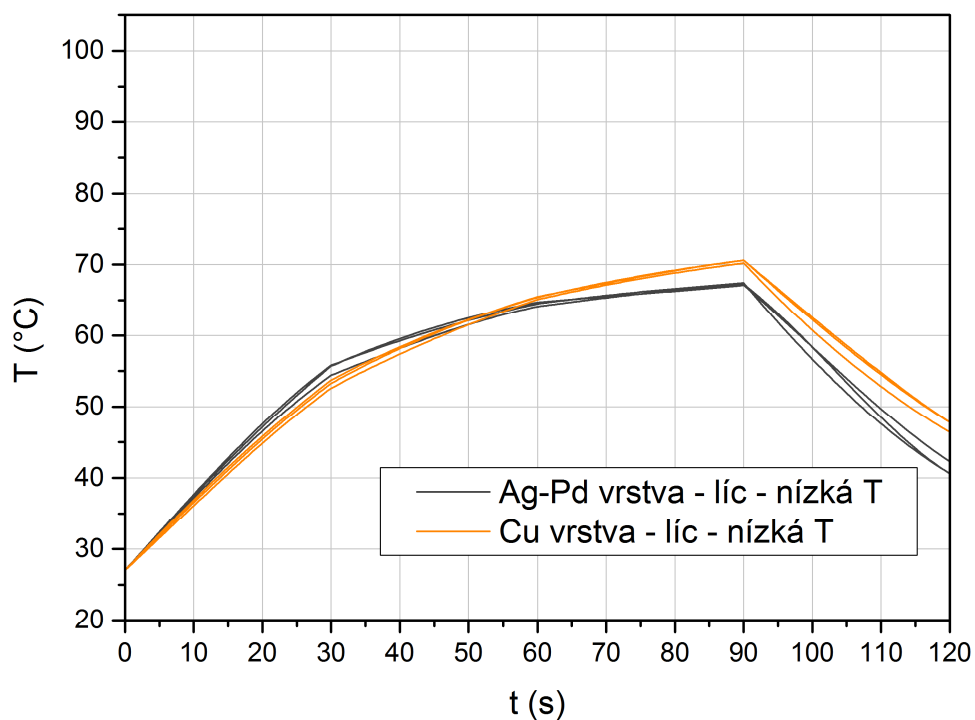
Obr. II. Prvkové složení v závislosti na energii – oblast 3.



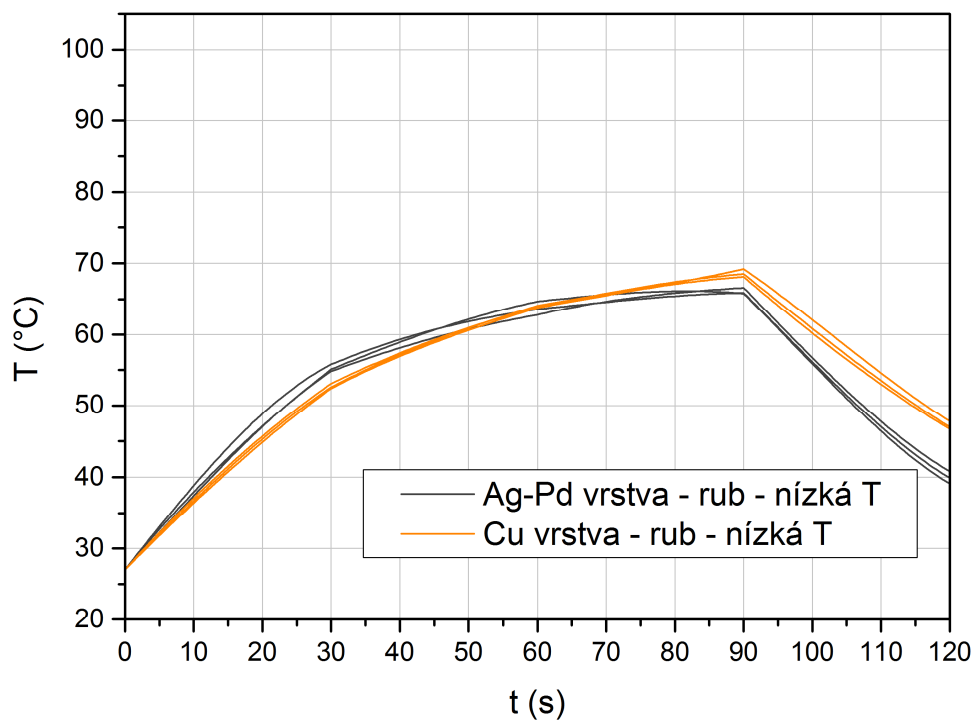
Obr. III. Prvkové složení v závislosti na energii – oblast 4.



Obr. IV. Prvkové složení v závislosti na energii – oblast 5.



Obr. V. Průběh teploty v čase pro nejnižší teplotu lícové strany substrátů.



Obr. VI. Průběh teploty v čase pro nejnižší teplotu rubové strany substrátů.