

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NEKONVENČNÍ APLIKACE KERAMIKY S NÍZKOU TEPLOTOU VÝPALU

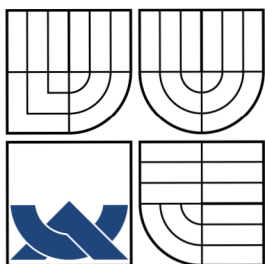
DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

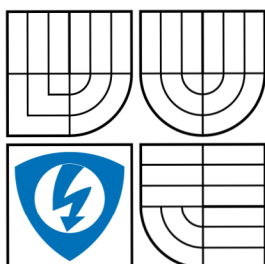
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN KLÍMA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS**

NEKONVENČNÍ APLIKACE KERAMIKY S NÍZKOU TEPLOU VÝPALU

NON-CONVENTIONAL APPLICATIONS OF LOW-TEMPERATURE CO-FIRED CERAMICS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MARTIN KLÍMA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2015

Abstrakt

Disertační práce se zabývá výzkumem aplikačních možností keramiky s nízkou teplotou výpalu se zaměřením na její nekonvenční využití. Řeší dílčí problémy spojené s konstrukcí pouzdra pro elektrické čipy. Dotýká se také uplatnění této keramiky v optoelektronických senzorických aplikacích.

Klíčová slova

LTCC, tlustovrstvová technologie, pouzdření, 3D rezistor, kontaktování, hermetičnost, optoelektronický senzor.

Abstract

The doctoral thesis is aimed at research of application possibilities of low-temperature co-fired ceramics, especially its non-conventional usage. It deals with particular topics ensue from electronic chips package design. The thesis also touches optoelectronic sensor application of this ceramics.

Keywords

LTCC, thick film technology, packaging, 3D resistor, wire bonding, hermeticity, optoelectronic sensor.

Bibliografická citace

KLÍMA, M. *Nekonvenční aplikace keramiky s nízkou teplotou výpalu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 92 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci na téma „Nekonvenční aplikace keramiky s nízkou teplotou výpalu“ vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Ivana Szendiucha, CSc. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 15.10.2015

.....

Ing. Martin Klíma



Tato práce vznikla v rámci centra CEITEC - Středoevropského technologického institutu s intenzivní pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za jeho odborný dohled a zkušenosti, které mi předal, a také za mnoho příležitostí k prezentování výsledků mé práce. Mé díky zajisté patří také všem kolegům, se kterými jsem spolupracoval. Ing. Jakubovi Somerovi za pomoc s experimenty během distanční části mého studia, Ing. Boleslavovi Psotovi za tvůrčí podněty a za podporu v oblasti simulací, Ing. Petrovi Kosinovi, PhD. za uvedení do problematiky LTCC technologie a Ing. Michalovi Nicákovi za pragmatické rady. Dále děkuji za bezprostřední spolupráci mým kolegům Ing. Jaromírovi Žákovi, Ing. Jiřímu Sedláčkovi, Ing. Ladislavovi Macháňovi, Ing. Janovi Pekárkovi, PhD., Ing. Vojtěchovi Svatošovi a Ing. Milanovi Holíkovi.

Děkuji také spolupracovníkům z Fakulty chemické za to, že mi umožnili část experimentů realizovat na své půdě. Zejména Ing. Lucii Blahové a Ing. Michalovi Procházkovi.

Velký díky patří bezesporu rodině za podporu ve vzdělání, především otci a matce. Zvláštní dík patří mé ženě Editě Johance, neboť pokud jsem něčeho dosáhl, byl to pouze důkaz platnosti rčení, že za úspěšným mužem stojí silná žena.

Za přízeň děkuji také Mokoši a všem trpaslíkům.

Tato práce vznikla za podpory grantů a v návaznosti na ně:

- FRVŠ 304 /2013 - Implementace simulačního programu ANSYS do výukového procesu,
- FEKT-S-14-2168 - Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice,
- CZ.1.05/1.1.00/02.0068 - CEITEC - Středoevropský technologický institut.

Obsah

1 ÚVOD.....	10
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	12
2.1 NÁVRHOVÉ A KONSTRUKČNÍ MOŽNOSTI LTCC	12
2.2 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY ELEKTRICKÝCH OBVODŮ A STRUKTUR NA LTCC	18
2.3 VLASTNOSTI POUŽITÉHO LTCC SUBSTRÁTU HERAEUS HERA LOCK 2000	20
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	23
4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	24
4.1 VYTVÁŘENÍ TROJROZMĚRNÝCH REZISTORŮ V LTCC TECHNOLOGII	24
4.1.1 <i>Testovací struktura a možné uspořádání prokovů.....</i>	<i>25</i>
4.1.2 <i>Výroba testovací struktury.....</i>	<i>27</i>
4.1.3 <i>Defekty v substrátu.....</i>	<i>31</i>
4.1.4 <i>Diskuse výsledků.....</i>	<i>32</i>
4.1.5 <i>Shrnutí a závěr.....</i>	<i>34</i>
4.2 ŽIVOTNOST DRÁTOVÝCH PROPOJŮ VE VYSOKOTEPLŮTNÍCH APLIKACÍCH	35
4.2.1 <i>Návrh testovacího vzorku.....</i>	<i>36</i>
4.2.2 <i>Simulace.....</i>	<i>37</i>
4.2.3 <i>Měření.....</i>	<i>40</i>
4.2.4 <i>Shrnutí.....</i>	<i>43</i>
4.3 FOTOODRAZIVÁ VRSTVA NA LTCC PRO OPTICKÉ APLIKACE	44
4.3.1 <i>Výroba.....</i>	<i>46</i>
4.3.2 <i>Měření.....</i>	<i>47</i>
4.3.3 <i>Měření odrazivosti.....</i>	<i>48</i>
4.3.4 <i>Shrnutí.....</i>	<i>52</i>
4.4 HERMETICKÉ VLASTNOSTI APLIKACÍ REALIZOVANÝCH KERAMIKOU S NÍZKOU TEPLOTOU VÝPALU	53
4.4.1 <i>Senzorické aplikace využívající LTCC membránu.....</i>	<i>56</i>
4.4.2 <i>Struktura použitých substrátů.....</i>	<i>56</i>
4.4.3 <i>Návrh a příprava vzorku.....</i>	<i>58</i>
4.4.4 <i>Měření nasákavosti.....</i>	<i>61</i>
4.4.5 <i>Popis měření nasákavosti LTCC keramiky.....</i>	<i>61</i>
4.4.6 <i>Diskuse výsledků měření nasákavosti.....</i>	<i>62</i>
4.4.7 <i>Měření propustnosti kyslíku substrátem LTCC.....</i>	<i>63</i>

4.4.8	<i>Průběh měření OTR substrátu LTCC</i>	65
4.4.9	<i>Diskuse výsledků měření OTR substrátu LTCC</i>	65
4.4.10	<i>Měření závislosti OTR na hustotě prokůvů v LTCC substrátu</i>	66
4.4.11	<i>Vyhodnocení mikrovýbrusů</i>	67
4.4.12	<i>Závěr</i>	69
5	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	VLASTNÍ PUBLIKACE	81
	TVŮRČÍ AKTIVITY	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	87
	SEZNAM TABULEK	90
	CURRICULUM VITAE	91

1 Úvod

Keramika s nízkou teplotou výpalu, z anglického *Low-Temperature Co-Fired Ceramic* (LTCC), je materiálem používaným v technologii tlustých vrstev (TLV) pro realizaci elektrických obvodů a funkčních bloků nevakuovým způsobem. Jejím charakteristickým přínosem je možnost vytváření elektrických obvodů s pasivními obvodovými prvky na plastickém keramickém substrátu s možností propojení struktur vytvořených na více vrstvách. Teplota jejího výpalu se pohybuje do 1000 °C, na rozdíl od keramiky s vysokou teplotou výpalu (HTCC – *Hi-Temperature Co-Fired Ceramic*), jež se vypaluje při teplotě nad 1000 °C. Nízká teplota výpalu LTCC ji činí dostupnější pro laboratorní použití, a to především díky nižším nárokům na technologické vybavení. Na zařízení určeném k výpalu TLV past v konvenčním procesu využívajícím jako substrát HTCC je rovněž možné běžně vypálit LTCC.

LTCC nabízí velmi zajímavou možnost tváření a dalšího zpracování v nevypáleném stavu. Surové substráty, také označované jako listy (z angl. *sheets*), jsou dodávány nanesené na plastovém nosiči. Po oddělení je možné je řezat či jinak tvarovat a vrstvit na sebe. Oproti HTCC substrátům tak lze vytvářet téměř libovolné trojrozměrné (3D) struktury, které vznikají vrstvením jednotlivých listů substrátu, a vícevrstvé obvody umožňující navíc integraci pasivních obvodových prvků. Další výhodou, zejména ve výrobním procesu, je výpal substrátu spolu s vodivým motivem a dalšími funkčními vrstvami najednou. LTCC významně rozšiřuje aplikační možnosti TLV technologie při zachování stěžejních vlastností HTCC substrátů, nejčastěji na bázi korundu (Al_2O_3), také označovaným jako alumina. Elektrickými vlastnostmi se LTCC však více blíží epoxidovým substrátům FR4 používaným pro technologii povrchové montáže než alumině, kombinuje však v sobě výhody obou substrátů – jak FR4, tak aluminy.

Vedle propojovacích struktur, kde LTCC slouží jako nosný substrát, je možné realizovat i různé mechanické části, membrány a složitější systémy s vyšší spolehlivostí, životností, výkonovou zatížitelností a mechanickou, tepelnou a chemickou odolností v porovnání s nekeramickými substráty určenými především pro spotřební elektroniku. LTCC umožňuje vytvářet vedení pro mikrovlnné signály a přesné pasivní sítě. Využití tak nalézá při realizaci elektrických obvodů používaných v nepříznivých podmínkách s vysokými nároky na přesnost (automobilový průmysl, letectví, kosmonautika), v pouzdření nebo v senzorce.

Oblasti použití LTCC se stále rozšiřují, především její nekonvenční aplikace. Spolu s tím roste i nabídka nových materiálů kompatibilních s LTCC, jako jsou kontaktovatelné pasty, pasty pro plnění prokovů či feromagnetické pasty. Na vypálenou LTCC je rovněž možné nanášet klasické TLV pasty pro korundové substráty nebo deponovat tenké vrstvy. U mnohých z těchto postupů však není ověřena kompatibilita s LTCC ani optimalizován proces, zvláště pak u aplikací, ve kterých se dostupné materiály nepoužívají standardním způsobem. Jednou z oblastí, kam se vývoj aplikací na LTCC ubírá, jsou aplikace s vyšší provozní teplotou. Zejména

se jedná o senzory a pouzdra pro výkonové součástky a čipy na bázi karbidu křemíku (SiC) nebo nitridu galia (GaN).

Technologie pro zpracování LTCC je na Ústavu mikroelektroniky (FEKT, VUT v Brně) v běžném rozsahu dostupná, včetně základních zařízení pro technologický proces. Využívaná materiálová základna je dodávána firmou především Heraeus. Konkrétně jsou to nízkosmrštivé substráty Hera Lock 2000 (HL2000) a s nimi kompatibilní vodivé TLV pasty určené pro vytváření vnitřních vrstev, vytváření vnějších pájitelných vrstev, k plnění prokovů a pasty pro kontaktování. Nízká smrštivost zvoleného substrátu v osách x a y během výpalu je značnou výhodou při návrhu struktur a jejich realizaci. Téměř nulová smrštivost také umožňuje kombinovat LTCC s jinými prvky (HTCC substráty, konstrukční prvky aj.), což přináší nové pole možností v nekonvenčních aplikacích.

LTCC je velmi zajímavým materiálem skýtajícím mnoho aplikačních možností a realizaci nových řešení. Na základě současných trendů byl také zvolen směr disertační práce, která je zaměřena zejména na problematiku aplikací LTCC s vyšší provozní teplotou, především na dílčí problémy spojené s návrhem pouzdra pro čip na bázi SiC a možnostmi propojování a spojování substrátů.

2 Současný stav problematiky

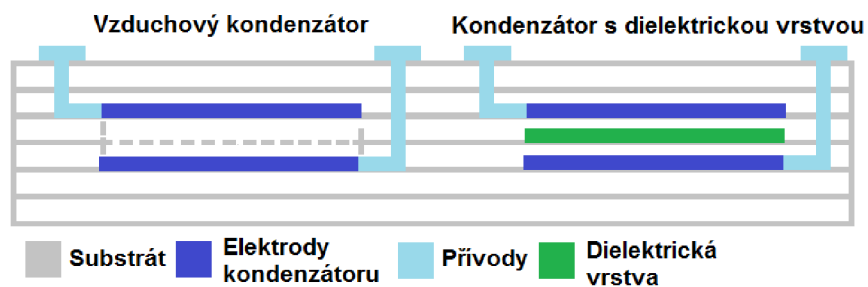
Keramické materiály tvoří nezbytnou část materiálové základny pro mikroelektronické technologie, kde jsou nezbytné zejména pro výkonové, mikrovlnné a vysoce spolehlivé aplikace. Patří sem do ní nejen substráty technologie na bázi HTCC, ale také později vyvinuté LTCC. Přitom je zřejmé, že aplikace LTCC se velmi prolínají s aplikacemi HTCC. Primárně tyto keramické substráty slouží jako nosič elektrických obvodů, funkčních bloků a také celých systémů. Jsou úzce spjaty s tlustovrstvou technologií. Ta umožňuje integraci pasivních obvodových prvků na substrát. Byla hojně používána k realizaci tzv. hybridních integrovaných obvodů, které do nástupu křemíkové planární technologie představovaly nejvyšší stupeň integrace. V současné době existuje mnoho různých kombinací pasivních a aktivních prvků v jediném celku, ale ze základního pohledu na ně můžeme nahlížet jako na systémy na modulu (SOM – *System on Module*), nebo systémy na pouzdře (SOP – *System on Package*), případně systémy v pouzdře (SIP – *System in Package*) [1]. LTCC tyto koncepty integrace nabízí, neboť základním principem v procesu výroby LTCC obvodů a struktur je možnost skládání více vrstev na sebe v ose z. To umožňuje vytváření vícevrstvých obvodů s elektronickými komponentami integrovanými v trojrozměrné struktuře. Tím dochází k výraznému zvýšení hustoty integrace.

Mezi další využití LTCC patří sensorické aplikace, mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Systems*), pouzdra pro elektrické obvody, fluidické aplikace a mnoho dalších. V současné době je věnována pozornost aplikacím s vysokou provozní teplotou. Tou se rozumí teplota vyšší, než je standardní rozsah použití elektroniky, tzn. nad 125 °C pro civilní aplikace a nad 150 °C pro vojenské aplikace. Je to způsobeno především rozvojem v oblasti širokopásmových polovodičů, konkrétně čipů na bázi karbidu křemíku (SiC) a nitridu galia (GaN), jejichž provozní teplota je díky nízké intrinziční koncentraci nosičů teoreticky až 800 °C. Dosud nejvyšší prakticky ověřená teplota provozu je 600 °C [2] [3]. Na rozdíl od TLV technologie ve spojení s HTCC, kde je prokázána použitelnost až do teploty 850 °C (i více v závislosti na použitých pastách), chování LTCC při vyšších teplotách není dostatečně popsáno a je předmětem výzkumu [4]. Použití LTCC v aplikacích s vysokou provozní teplotou se však neomezuje pouze na nosiče SiC čipů. Zajímavé zůstávají i sensorické aplikace určené pro použití např. ve spalovacích motorech, kde je provozní teplota rovněž vysoká. Díky možnosti vytváření 3D struktur pomocí LTCC lze do návrhu aplikací začlenit pasivní chlazení nebo aktivní chlazení využívající mikrokanálků pro cirkulaci chladící kapaliny. Podobným způsobem je možné konstruovat např. chemické reaktory s nastavením teplotního pracovního bodu různých dějů [5].

2.1 Návrhové a konstrukční možnosti LTCC

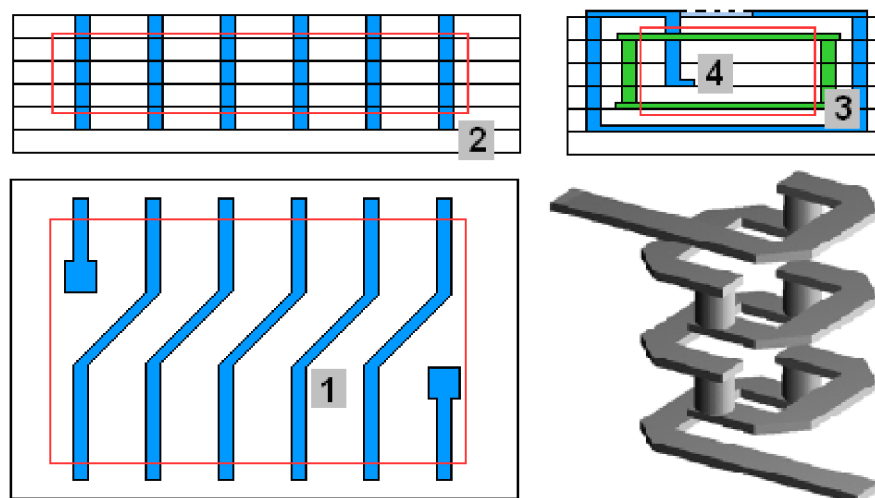
V současné době je LTCC využívána k realizaci elektrických obvodů se všemi výhodami TLV technologie. Umožňuje vytváření vícevrstvých struktur pro realizaci vodivého motivu na keramickém substrátu. Výhodou je možnost poměrně snadného

vytvoření vnějších i vnořených pasivních součástek. Rezistory, stejně jako u obvodů na alumině, lze navrhovat planárně (přímé, meandry), tzn. že rozměr v ose z je vůči rozměrům x a y zanedbatelný, ale také 3D, kdy je součástka navržena přes více vrstev. To vede k úspoře místa na vnějších vrstvách, a tím ke zmenšení rozměrů, resp. plochy substrátu. Podobně se postupuje při návrhu kondenzátorů, jež také vycházejí z klasických postupů pro TLV technologii. S využitím dielektrických past je možné vytvářet vnější planární kondenzátory. Navíc však existují možnosti vytvořit 3D kondenzátor vnořený, jehož elektrody jsou v různých vrstvách struktury nad sebou (viz obr. 1). Pro toto uspořádání jako dielektrikum může být využita dielektrická vrstva tvořená dielektrickou pastou, vzduchem v dutině mezi vrstvami, samotným substrátem nebo kombinací uvedených.



Obr. 1: Řez šestivrstvou strukturou na LTCC se dvěma možnými uspořádáními kondenzátorů.

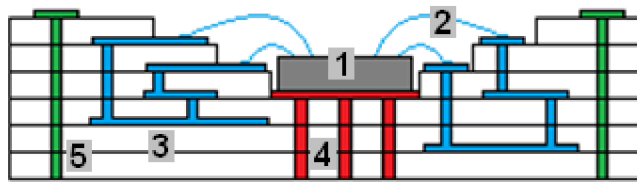
Rovněž induktory lze navrhovat planární nebo 3D. LTCC bývá často využívána pro konstrukci transformátorů, které jsou vnořeny do celého objemu struktury. U některých aplikací slouží vytvořené cívky jako antény nebo jsou součástí bezkontaktně napájených obvodů, jak je naznačeno na obr. 2 [6].



Obr. 2: Řez 3D cívkou napájecího obvodu s červeně vyznačenou oblastí pro umístění vnořených obvodů : (1) závity na horní straně struktury, (2) spojovací prokovy, (3) stínění vnitřních obvodů, (4) vodivé spojení vnitřních obvodů s cívkou; 3D cívka se třemi závity (vpravo dole) [8][9].

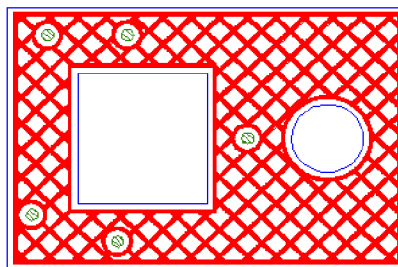
Na LTCC lze kompletně realizovat vodivý motiv včetně pasivních součástek. Ty je možné dále dostavovat pomocí trimovacího laseru nebo elektrickými pulsy (u vnořených součástek), čímž lze dosáhnout jejich vysoké jakosti [8].

Další elektronické součástky se do obvodu připojují pomocí technologie povrchové montáže (SMT – *Surface Mount Technology*). Často jsou na LTCC osazovány také holé čipy (*bare die*). Díky variabilitě technologie je možné návrh plně přizpůsobit požadavkům a vytvořit tak nosič nebo celé pouzdro na míru. Tato pouzdra jsou označována jako vícečipové moduly na keramických substrátech (MCM-C – *Multi-Chip Module on Ceramic*). LTCC nabízí možnost vytvořit všechny návrhové prvky, které se běžně používají v návrhu na desce plošného spoje (DPS), jak je ukázáno na obrázku 3.



Obr. 3: Řez strukturou se zanořeným čipem: (1) čip, (2) kontaktovací mikrodrátky, (3) vnitřní vodivá struktura, (4) chladičské prokovy, (5) stínící prokovy [6].

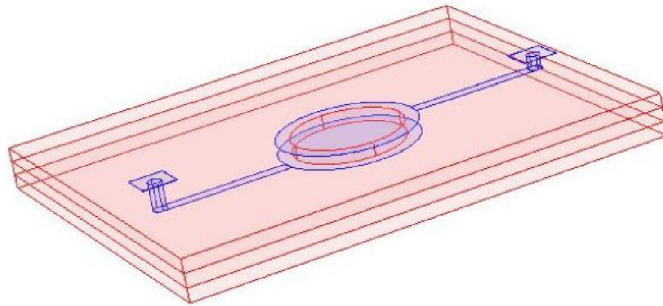
U vícevrstvých obvodů jsou včleňovány stínící vrstvy podobně jako u DPS. Jejich úkolem je zabránit šíření elektromagnetického rušení mezi vrstvami. Často bývají zároveň vrstvou zemnicí. U LTCC je tato plocha tvořena šrafy kvůli lepší adhezi při laminaci (obr. 4). Stínící vrstvou obvykle procházejí prokovy spojující stíněné části obvodu nebo další prvky struktury, jak je vidět na obr. 3. Stínící vrstvy lze také využít k rozvodu tepla podobně jako chladičských prokovů.



Obr. 4: Ukázka stínící vrstvy s otvory pro prokovy a zapuštěné součástky [10].

Kromě obvodových aplikací nachází LTCC uplatnění v senzorických aplikacích. Nejrozšířenější princip detekování měřené veličiny je totožný se substráty HTCC. Sensory využívají speciálních past, jejichž charakteristická vlastnost (např. vodivost nebo kapacita) je citlivá na měřenou veličinu. Mezi méně tradiční patří membránové senzory. Membránu tvoří vrstva LTCC (Obr. 5). Existuje více způsobů vyhodnocení jejího vychýlení. Nejčastěji vzniklá dutina mezi membránou a zbylou strukturou tvoří dielektrikum kondenzátoru. Jedna elektroda je pohyblivá (umístěna na membráně), druhá pevná (na struktuře). Vychýlením membrány dochází ke změně kapacity kondenzátoru. Změna je dále vyhodnocována. Citlivost senzoru je dána plochou

membrány a tuhostí použitého substrátu, potažmo velikostí výchylky membrány pro daný rozsah měřené veličiny. Senzor bývá nejčastěji využit k měření teploty nebo tlaku. Membrána může být i z jiného materiálu dodatečně spojeného s již vypálenou strukturou. V tomto případě je nutné vhodně zvolit materiál membrány i spojovacího materiálu, kvůli eliminaci pnutí. Často se využívá křemíkových substrátů (*wafér*), které mají podobnou délkovou roztažnost jako LTCC.

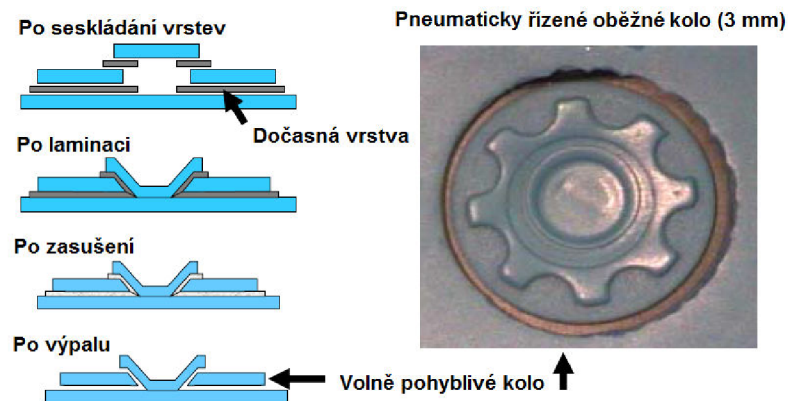


Obr. 5: Příklad konstrukce senzoru tlaku na LTCC [5].

Díky tomu, že LTCC umožňuje integrovat pasivní součástky přímo na substrát, může být membrána deformována řízeně. Toho se využívá v optických aplikacích, kdy jsou na membráně rozmístěny topné elementy (např. TLV pasta na bázi platiny). Vlivem definovaného vyhřívání membrány dochází k jejímu vychýlení. Na vnější straně membrány je nanášena odrazivá vrstva, jejímž vychýlením může být nastavován odraz dopadajícího paprsku. Tento princip je používán ke korekci chyby laserů [11]. Další aplikace LTCC v optoelektronice se objevují především ve spojení s mikro-fluidickými kanálky, kdy jsou vyhodnocovány změny optického prostředí, kterým se nechá procházet paprsek. Tímto způsobem lze například stanovit složení kapalin, množství částic, transmitance, fluorescence apod. Stejně jako membránové senzory jsou optické aplikace používány v nepříznivých podmínkách, mezi které spadá i vysoká teplota. Kromě odolnosti je výhodou i možnost vytvoření komplexního vestavěného (*embedded*) systému v jediné struktuře [9].

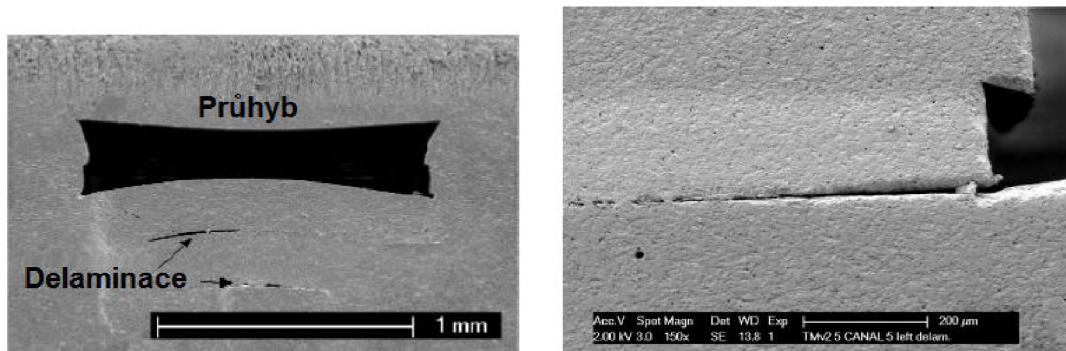
Univerzálnost LTCC dokládá i relativně snadná konstrukce mikro-mechanických prvků dále skládaných do systémů MEMS. Využití MEMS nalézají především v sensorických aplikacích, jako jsou akcelerometry, gyroskopy, senzory tlaku apod., dále pak mikro-čerpadla, mikro-pohony, mikro-cívky, spalovací komory aj. Technologie MEMS je nejčastěji užívána ve spojení s křemíkovou technologií, kdy jsou MEMS vytvářeny přímo na čipu, včetně elektronických obvodů, které data z MEMS vyhodnocují. Stejně koncepte lze využít i v technologii LTCC. Výroba mikro-mechanických prvků nevnáší do standardního procesu žádné další kroky. Základní substrát je obroben do požadovaného tvaru a standardně seskládán pro laminaci. K tomu, aby nedošlo ke spojení pohyblivých prvků s nosnými, jsou od sebe vrstvy při laminaci odděleny dočasnou výplní na bázi uhlíku (SVM – *Sacrificial Volume Material*). Tato vrstva při výpalu vyhoří, čímž vznikne pohyblivé spojení. Příklad postupu výroby mikro-mechanického prvku je uveden na obrázku 6. LTCC tak nabízí

jednoduché a levné řešení některých aplikací MEMS, na které není kladen důraz na miniaturizaci, při zachování jejich odolnosti [12][13].



Obr. 6: Oběžné kolo realizované pomocí LTCC [9].

Dalším velmi zajímavým uplatněním LTCC jsou mikro-fluidické aplikace. Tím se rozumí vytvoření takové struktury, kterou může protékat kapalina. Struktura je sestavena tak, aby v ní uvnitř vznikly vzájemně propojené dutiny – mikro-kanálky. Mezi výhody LTCC pro tyto aplikace patří chemická i tepelná odolnost, hermetičnost, stabilita a materiálová kompatibilita s křemíkem. Z toho vyplývají oblasti použití, jako např. průtokoměry, mikro-pumpy, mikro-ventily, mikro-mixéry, mikro-reaktory aj. Ve spojení s dalšími možnostmi, které LTCC nabízí, lze vytvořit kompletní systém pro proudění kapaliny zahrnující senzory a regulační i řídicí prvky. Pro zajištění vysoké spolehlivosti a životnosti je u mikro-fluidických aplikací velmi důležité správné nastavení laminace. Její špatné nastavení vede k deformaci dutin, které pak nemají definovaný průřez. V místě nedokonalé laminace dochází ke ztrátě těsnosti (viz obr. 7). Řešení často nabízí použití výplně SVM, za cenu možné kontaminace dutiny [15] [16].



Obr. 7: Příklad průhybu laminovaných vrstev mikro-kanálku a jejich delaminace [16].

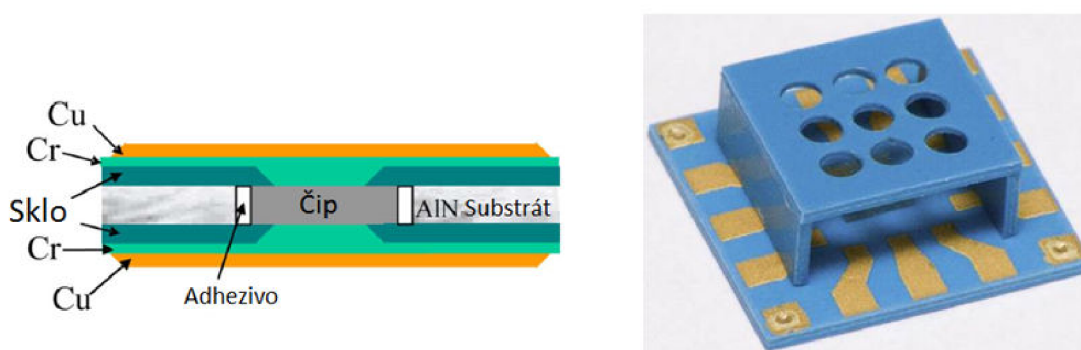
Mikro-kanálky jsou často využívány i jako chlazení LTCC struktury kapalinou. Mohou mít různé uspořádání – přímé, meandrické, spirálovité, fraktální aj., které má vliv na účinnost chlazení a rozložení tepla v substrátu [17]. Stejně jako u ostatních aplikací s mikro-kanálky je nezanedbatelným problémem prosákavost. Chlazeny bývají pouze součástky na povrchu struktury, a to právě kvůli průsaku mezi vrstvami.

Protože je LTCC odolnější v porovnání se substráty pro povrchovou montáž, je používána v aplikacích s vyšší provozní teplotou. Ty se principiálně nijak neliší od výše popsaných, je u nich však třeba sáhnout k odolnějším návrhovým řešením, neboť na vyšších teplotách vyvstává mnoho problémů, které jsou předměty výzkumu. Problematickou oblastí je například propojování. K připojení přívodů ke struktuře se v méně náročných aplikacích používá lepených nebo pájených spojů a samy přívody bývají z materiálů teplem degradujících. S aplikacemi s vyšší provozní teplotou jsou spojeny i problémy s kapalinovým chlazením. V literatuře jsou popsány pouze aplikace LTCC s vodním chlazením a s provozní teplotou do 300 °C. Pro aplikace s již zmíněnými širokopásmovými polovodiči, jejichž provozní teplota teoreticky dosahuje až 800 °C (viz tab. 1), zatím nebyla nalezena a testována vhodná kapalina pro chlazení v LTCC struktuře [18][19].

Tab. 1: Maximální pracovní teploty polovodičových součástek podle materiálu [20].

Materiál	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Diamant
Max. pracovní teplota [°C]	150	350	600	700	750	>700	1100

Aplikace s SiC čipy se nejčastěji řadí mezi senzory nebo obvody s výkonovými diodami a tranzistory. Jako nosič jsou použity zejména HTCC substráty, které mohou tvořit i plnohodnotné pouzdro. Pracovní teplota používaných čipů se pohybuje v rozmezí 200 ÷ 300 °C [21]. Substráty LTCC jsou rovněž používány, avšak zatím pouze jako nosič s vnitřní strukturou nebo jako nekompletní pouzdro (obr. 8). Často je přítomnost čipu pouze simulována nebo nahrazena topným prvkem. Je zkoumáno pouze rozložení tepla. Spojování SiC čipů s LTCC substrátem a jeho zapojení do obvodu zatím nebylo publikováno.



Obr. 8: Příklady konstrukce pouzder pro SiC: Kompletní pouzdro na HTCC (vlevo); Neplnohodnotné pouzdro na LTCC s vnitřní strukturou (vpravo) [21] [22].

Jak je uvedeno v tabulce 2, maximální teplota použití LTCC se liší u každého typu a je dána složkou s nejnižší teplotou tání. Bohužel, pro používaný substrát HL2000 tato teplota není stanovena. Mimo mechanického hlediska je také třeba zohlednit změny vodivosti keramiky v závislosti na teplotě.

Tab. 2: Maximální pracovní teploty vybraných LTCC substrátů podle změny struktury [23].

LTCC	DuPont 951	DP 943	Heratape AHT01-005	Heraeus' CT 800
Max. pracovní teplota [°C]	575	650	740	>850

Kromě odpovídajícího substrátu je třeba zvolit i vhodný způsob montáže čipu. Pro použití při vysokých teplotách se využívá tvrdé pájení, pájení sklem a spojování keramikou. Běžně prodávaná adheziva nelze pro vysoké teploty použít. Důležitým parametrem je stálost pevnosti spojení, izolačních vlastností a stejná nebo blízká délková tepelná roztažnost [24]. Nejvhodnější se tedy jeví keramické spoje, avšak je nutné ověřit kompatibilitu s LTCC HL2000.

Samotné propojování čipu se substrátem může být realizováno buď kontaktováním, nebo pevnými kontakty. V laboratoři Ústavu mikroelektroniky jsou k dispozici hliníkové a zlaté mikro-drátky, přičemž Al mikrodrátky jsou použitelné pouze do 250 °C a Au se na základě výsledků vlastních pokusů jeví použitelné až do 850 °C. Kvůli zajištění spolehlivosti spoju se u aplikací s vysokou teplotou doporučuje používat platinový nebo palladiový mikrodrátek [24][25]. Kvůli eliminaci komplikací během výrobního procesu může být vhodné propojit čip se substrátem pomocí pevných kontaktů, resp. patice [21]. Vzájemnému propojení jednotlivých modulů zatím nebyla věnována pozornost, přesto by také mohlo být řešeno pomocí patice.

2.2 Technologický postup výroby elektrických obvodů a struktur na LTCC

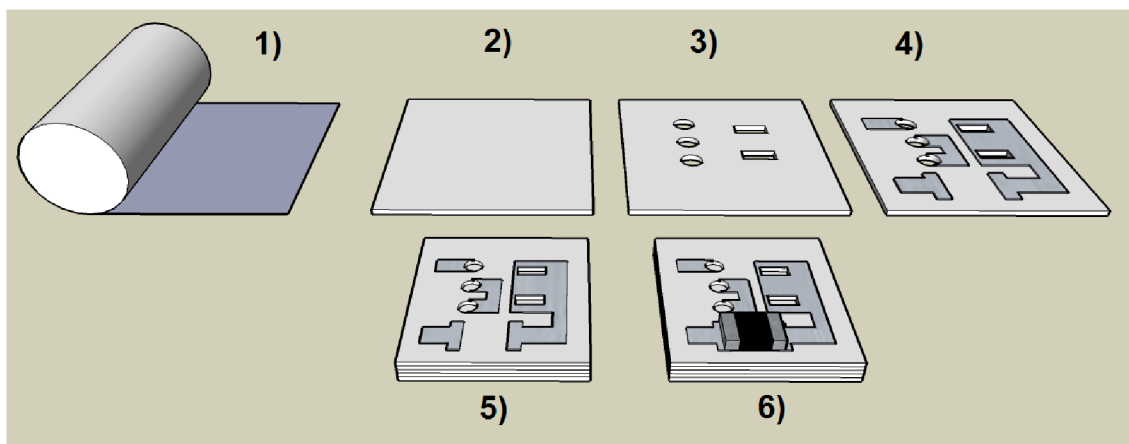
Výroba obvodů a struktur na LTCC je nevakuumový proces. Základní operace vycházejí z TLV technologie. Do procesu výroby je ale možné zařadit i úkony z technologie tenkých vrstev, povrchové montáže, kontaktování nebo pouzdření. Vytváření elektrických obvodů probíhá na substrátech v nevypáleném stavu. Takový substrát je snadno přizpůsobitelný a je možné jej lehce dělit.

Pro pochopení výhod a omezení aplikací na LTCC je důležité znát výrobní proces elektrických obvodů nebo struktur (viz obr. 9). Prvním krokem je válcování surové keramické směsi na nosič. Tento krok probíhá u výrobce LTCC substrátů. Velikost navalených listů se liší, např. list HL2000 má rozměry 177,8 x 177,8 mm. Postup výroby elektrického obvodu na LTCC je následující:

- 1) navalování keramické hmoty na plastový nosič,
- 2) dělení substrátu,
- 3) vytváření otvorů a prokovů,
- 4) depozice, vyrovnání a zasušení TLV vrstev,
- 5) skládání a laminování jednotlivých vrstev struktury a výpal,

6) osazení SMD součástek.

V posledním kroku mohou být zahrnuty i další operace, např. depozice tenkých vrstev, kontaktování, pouzdření, elektrické testování apod. [9].



Obr. 9: Proces výroby obvodu na LTCC substrátu: 1) Válcování keramiky na nosič, 2) dělení substrátu, 3) řezání nebo ražení prokovů, 4) tisk TLV past a jejich zasušení, 5) laminace vrstev, 6) další kroky (osazení SMD součástek, pouzdření apod.) [26].

LTCC je možné dělit několika způsoby – řezáním, ražením nebo laserem. Nejvhodnější metoda pro průmysl je ražení. Umožňuje vyražení více tvarů najednou, ale náklady na výrobu raznice a na zařízení jsou vysoké. Pro laboratoř je tento způsob nevhodný. Častěji se proto používá řezání na souřadnicové rezačce. Ta je limitována svým rozlišením a neschopností vyřezání kulatých otvorů s malým průměrem. Nejuniverzálnějším způsobem dělení je řezání laserem. Vytváření otvorů probíhá v následujícím kroku, ale v závislosti na metodě jej lze provést již během dělení substrátu (např. u laseru). Minimální velikost a kvalita otvoru, resp. hran, je dána způsobem přípravy. Po řezání nebo vrtání se mohou objevit praskliny v substrátu. Při řezání laserem dochází k opalu, částečnému odprášení materiálu, odpaření pojiv v místě řezu a vzniku otřepů. Zmíněné problémy omezují minimální dosažitelný průměr otvorů, který se pohybuje 100 μm . Mají také negativní vliv na laminaci.

Po dělení substrátu následuje depozice TVL past. Pasty se nanášejí sítotiskem, šablonovým tiskem nebo dispenserem. Obvykle jsou nejprve plněny prokovy. Po nanesení vrstvy vždy následuje její vyrovnání a zasušení. Poté je možná depozice další pasty. Deponované vnitřní vrstvy musejí mít stejnou teplotu výpalu, protože jsou vypalovány po laminaci v jednom kroku. Vnější vrstvy s nižší teplotou výpalu mohou být deponovány po výpalu dodatečně. Rozlišení tisku, kterého je možné dosáhnout, se pohybuje do 100 μm . Použitím past *Fodel*, což jsou fotocitlivé pasty, lze rozlišení zvýšit až na 10 μm .

Až jsou nadeponovány TLV pasty na všechny substráty vícevrstvé struktury, přichází na řadu jejich seskládání. Substráty se mohou skládat ručně do matrice opatřené trny pro sesouhlasení nebo lze využít zařízení pro předslisovací kontrolu. Po té přichází na řadu laminace. Nastavení procesu laminace se liší pro každou strukturu a použitý typ

substrátu. LTCC lze laminovat pomocí axiálního lisu, kde je sestava substrátů vyhřívána na 40 – 80 °C. Tlak na sestavu působí pouze v jednom směru. Tento typ je vhodný pro sestavy s menším počtem vrstev. Více vrstev je třeba laminovat po částech. Dalším typem lisu pro laminaci je lis izostatický. Sestava opatřená těsným obalem je ponořena do kapalné lázně za působení tlaku ve všech směrech. Tímto způsobem mohou být laminovány sestavy tvořené až padesáti vrstvami. Při výběru metody laminování a jejich parametrů je nutné uvažovat rozmístění a rozsah dutin, aby nedocházelo k jejich deformaci. Pro snížení počtu defektů struktur s rozsáhlými dutinami během laminace je možné tyto dutiny vyplnit dočasným materiálem (SVM). SVM brání zhroucení struktury vlivem působícího tlaku a při výpalu zcela vyhoří [6].

Zlaminovaná sestava je připravena k výpalu. Teplota výpalu se pohybuje mezi 800 a 900 °C. Výpal typicky trvá jednu nebo více hodin. Teplotní profil se liší pro každý typ LTCC. Pro zajištění rovinnosti vypalované struktury je doporučeno použití keramických podložek. Pro minimalizování defektů vícevrstvých struktur vzniklých během výpalu jsou dostupné pece s čelistmi, ve kterých je vypalovaná struktura sevřena. Tímto způsobem lze rovněž regulovat smrštitost LTCC. S vypálenou 3D strukturou se dále pracuje stejně jako se substráty HTCC.

2.3 Vlastnosti použitého LTCC substrátu Heraeus Hera Lock 2000

LTCC substrát Hera Lock 2000 společnosti Heraeus je využíván v laboratoři Ústavu mikroelektroniky (FEKT, VUT) kvůli snadnému zpracování a zejména pro jeho nízkou smrštitost během výpalu. Protože se práce zaměřuje především na aplikace s jeho využitím, následující kapitola je věnována jeho vlastnostem.

Základem LTCC je nevyhřívána keramika na bázi SiO_2 , Al_2O_3 nebo cordieritu s dalšími příměsemi. Přidáním dalších příměsí lze u substrátu získat vlastnosti piezoelektrické, feromagnetické nebo vlastnosti varistoru [5]. Substrát tvoří dvě složky, a to skelná a pojivová. Konkrétní složení LTCC není známo a liší se podle typu a výrobce. Pro některé vybrané substráty bylo složení dodatečně stanoveno rentgenovou spektrální analýzou, avšak pro substrát HL2000 není dostupné [23].

LTCC HL2000 je substrát s takovou vnitřní strukturou, které vede k jeho téměř nulové smrštitosti v osách x a y . Umožňuje výrobu elektrických obvodů a struktur bez nutných dalších operací nebo opracování. HL2000 má vlastnosti vhodné pro její využití v pouzdření, v aplikacích pro automobilový průmysl a RF aplikacích s požadavky na malé ztráty na vysokých frekvencích. Je použitelná až do 6 GHz [27]. HL2000 se od ostatních LTCC substrátů liší unikátními vlastnostmi smrštitosti během výpalu. U volně vypalované, tzn. bez použití lisu v průběhu výpalu, HL2000 dochází ke zhuštění, resp. ke smrštění, pouze v ose z .

HL2000 je v souladu se směrnici RoHS. Jedná se o bezolovnatý a bezkadmiový substrát. Je kompatibilní s pájitelnými pastami, které je možné vypalovat spolu se substrátem. Díky nízké smrštitosti (0,2 %) v osách x a y nedochází během výpalu k praskání otvorů v substrátu nebo ke zhroucení dutin ve struktuře [28].

Tab. 3: Vybrané parametry vypálené LTCC Heraeus Hera Lock 2000 [29].

Dielektrická konstanta (2,5 GHz)	$7,3 \pm 0,3$
Ztrátový úhel (2,5 GHz)	$< 0,0026$
Teplotní součinitel délkové roztažnosti	$6,1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Stejnoseměrné průrazné napětí	$450 \div 600 \text{ V/mil}$
Hrúbost povrchu	$0,7 \text{ }\mu\text{m}$
Izolační odpor ($25 \text{ }^\circ\text{C}$)	$10^{13} \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

Doporučené nastavení pro zpracování:

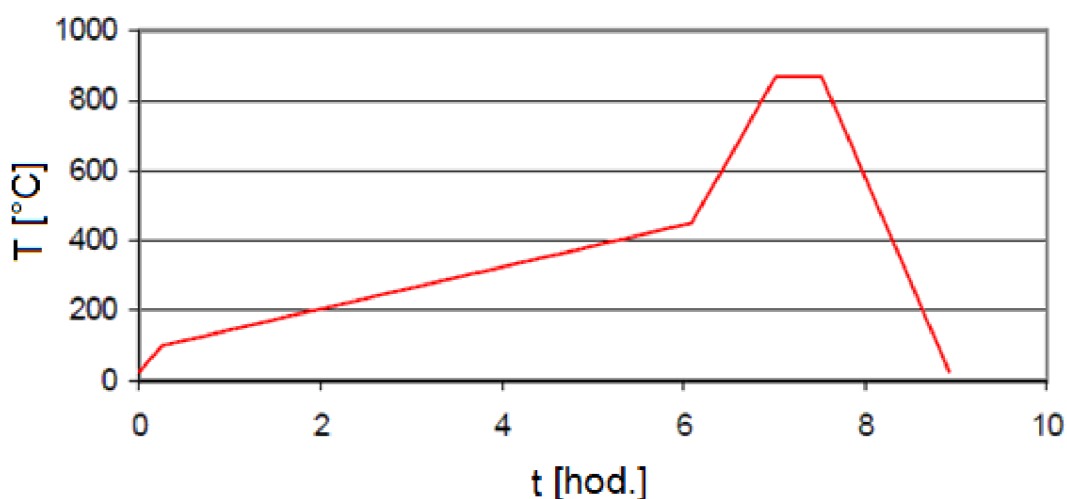
Tisk – TLV pasty mohou být na LTCC nanášeny před i po odstranění mylarového nosiče. Pro tisk je přednostně určena matná strana substrátu, může však být použita i hladká strana. Doporučená hustota síta je $9\,025 \div 16\,400 \text{ ok/cm}^2$.

Sušení – Doporučená teplota sušení je $80 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 10 min.

Laminace – K sesouhlasení vrstev je vhodný kovový přípravek. Je doporučena isostatická laminace (pozn. na Ústavu mikroelektroniky je využíváný axiální list s vyhřívanou čelistí) s nastavením: tlak $10,3 \text{ MPa}$, teplota $75 \text{ }^\circ\text{C}$, čas v optimu 90 s a čas cyklu 10 min.

Výpal – Teplotní profil pro výpal je uveden na obrázku 10 níže. Pro výpal je vhodné použít jako podložku pórovitou keramiku (v angl. literatuře honeycomb). Smrštivost keramiky během výpalu je $0,2 \%$ v osách x a y a 32% v ose z .

Vypalovací profil LTCC HL2000



Obr. 10: Teplotní profil pro výpal LTCC substrátu Heraeus Hera Lock 2000 [29].

Tab. 4: Vybrané vlastnosti substrátu LTCC Heraeus Hera Lock 2000 před a po výpalu. [29].

	Nevypálený substrát	Vypálený substrát
Hustota	2,3 g · cm ⁻³	2,9 ± 0,5 g · cm ⁻³
Tloušťka	130 ± 5 μm	90 ± 5 μm
Pevnost v tahu	1,655 MPa	-
Pevnost v tlaku	-	>200 MPa

Pro LTCC HL2000 jsou dostupné kompatibilní TLV pasty:

- stříbrná vodivá vnější (TC0307),
- stříbrná vodivá vnitřní vč. plnění prokovů (TC0308),
- stříbrná vodivá vnější pájitelná (TC0306),
- stříbro palladiová pro plnění prokovů (TC0401),
- zlatá vodivá vnější kontaktovatelná (TC8101),
- nepáživá maska (TO2002) [29].

3 Cíle disertační práce

Obecným cílem a posláním této práce je ověření a rozšíření dosavadních skutečností a získání nových poznatků v oblasti aplikačních možností substrátů na bázi keramiky s nízkou teplotou výpalu (LTCC). Práce je zaměřena na použití v pouzdření elektronických obvodů a funkčních bloků určených pro provoz na vyšších teplotách. V průběhu řešení je kladen důraz definování takových technologických kroků a postupů, které zajistí nejen funkčnost, ale také spolehlivost a reprodukovatelnost realizovaných konfigurací. S ohledem na velký rozsah této problematiky, jak je tomu konečně ve většině oblastí moderních mikroelektronických technologií tvořených heterogenními strukturami, byla práce zaměřena na následující dílčí cíle:

- definování technologických limitů substrátů LTCC a stanovení jednotlivých působících faktorů,
- experimentální ověření a definování možnosti aplikace realizace substrátů s propojovacími otvory pro struktury LTCC,
- výzkum spojování substrátů LTCC s dalšími anorganickými substráty (Al_2O_3 , SiC),
- návrh, optimalizace a realizace 3D rezistorů v technologii LTCC,
- experimentální ověření techniky kontaktování pro struktury LTCC,
- experimentální ověření těsnosti keramiky LTCC pro konstrukci pouzder elektrických obvodů,
- studium možností aplikace LTCC substrátů pro optické aplikace.

Tyto cíle představují hlavní směry, na které bylo zaměřeno studium, výzkum a následně také experimenty. Technologie pro elektronické systémy se vyznačuje z obecného pohledu tím, že v průběhu probíhajících procesů působí velké množství technologických faktorů, z nichž jen některé jsou předem známy a mohou být definovány, zatímco jiné se objevují až v průběhu probíhajících experimentů. I v průběhu řešení této práce přistupovala postupně řada nových vlivů, na něž bylo třeba zaměřit pozornost, a často je řešit, nebo s nimi experimentovat, aniž by byly přímo uvedeny v definovaných cílech této práce.

4 Výsledky disertační práce

V této kapitole jsou popsány dílčí problémy, kterým byla v rámci této disertační práce věnována pozornost. Jedná se především o problematiku propojování vrstev v rámci jedné struktury na LTCC, vzájemné propojování struktur a vybrané problémy spojené s návrhem pouzdra pro čipové součástky určené pro provoz na vyšších teplotách. V neposlední řadě jsou v kapitole zahrnuty nekonvenční aplikace a řešení.

4.1 Vytváření trojrozměrných rezistorů v LTCC technologii

Jak již bylo popsáno v úvodu, LTCC ve spojení s tlustovrstvou technologií nabízí relativně jednoduché vytváření 3D struktur včetně vnořených pasivních komponentů. Ty jsou obvykle planární a s ostatními vrstvami jsou propojeny vodivou sítí a prokovy. Prokovem se rozumí otvor napříč jednou nebo více vrstvami vyplněný vodivým materiálem. V LTCC technologii se však jako plnivo může použít i pasta s jinou charakteristickou vlastností. Princip vytvoření prokovu zůstává stejný jako pro pastu určenou pro vytváření prokovů. Teoreticky je tedy možné vytvořit prokovy vyplněné rezistivní pastou. Takovýto prokov potom lze chápat jako 3D rezistor. Přínosem prokovu tohoto typu je úspora plochy substrátu, resp. zvýšení hustoty integrace. 3D rezistory integrované do LTCC struktury již byly předmětem několika článků, ale jejich praktická realizace nebyla dosud nikde popsána [30].

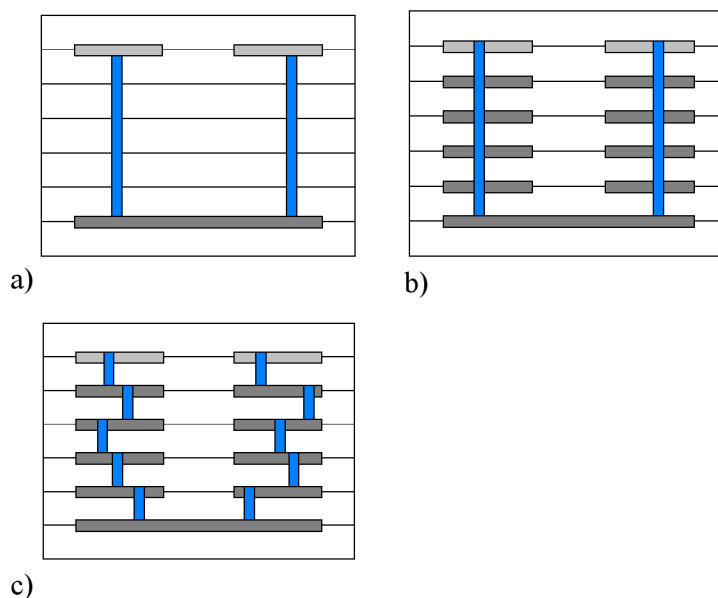
Hlavním cílem této části výzkumu bylo nalézt způsob, jakým lze vytvořit 3D rezistor, který by byl spolehlivý a opakovatelný. V dostupných pramenech není popsáno, jakým způsobem se v objemu prokovu během procesu vyrovnání vrstev, sušení a výpalu uspořádá nosná a funkční složka pasty. Na rozdíl od vyrovnání vrstev natištěných na substrátu materiál, ke kterému se pasta váže prostřednictvím tavivové složky, prokov obklopuje a není nutné, aby byl prokov ve spodní části uzavřen. Zjištění uspořádání složek v prokovu je jedním ze stěžejních úkolů tohoto experimentu. Na základě zjištěných faktů je pak možné stanovit vztah pro výpočet odporu 3D rezistoru.

Výsledky předchozích experimentů s korundovými vzorky ukázaly, že aktivní délka planárního rezistoru je reálně z každé strany až o 200 μm menší než navržena. Na vině je difúze vodivé pasty z plošek pro rezistor do rezistivní pasty. Vliv difúze na výsledný odpor 3D rezistoru lze také předpokládat. Vzhledem k jeho malým rozměrům – tloušťka jedné vrstvy základního substrátu LTCC se po výpalu pohybuje okolo 100 μm ; bude tento jev pravděpodobně ještě více patrný.

Jako způsob plnění byl zvolen šablonový tisk, především pro svoji dostupnost a možnost současného plnění více prokovů najednou. Prokovy byly navrženy třemi způsoby: přímé, přímé procházející vodiči ve vnějších vrstvách a nepřímé (obr. 11).

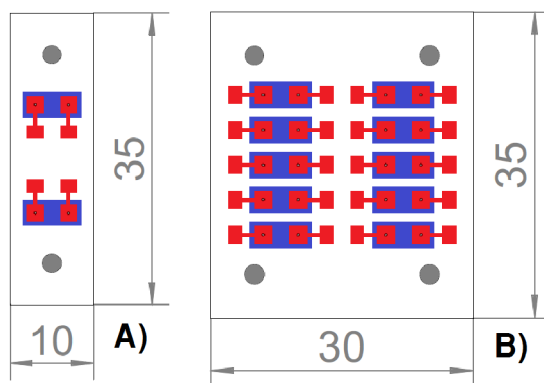
4.1.1 Testovací struktura a možné uspořádání prokovů

Hlavní funkcí prokovu je vodivé spojení dvou nebo více vrstev tvořících LTCC strukturu. Stejně tak tomu je v případě rezistivních prokovů. Hlavní charakteristickou vlastností prokovu však není vodivost, ale odpor. Prokovy mohou propojovat vnitřní vrstvy s vnějšími, nebo pouze vnitřní vrstvy u prokovů vnořených. Prokovy procházející více vrstvami lze navrhnout několika různými způsoby (viz obr. 11). První způsob propojení vrstev je přímý, druhý je rovněž přímý s tím rozdílem, že prochází natištěnými vodivými vrstvami ve struktuře. Prokov je v tomto případě možné chápat jako sérii krátkých prokovů přes jednu vrstvu. U těchto prokovů je očekáván velký vliv difúze vodivé pasty do rezistivní, a tím i snížení celkového odporu [31]. Poslední obrázek ukazuje uspořádání struktury cik-cak. Jednotlivé elementy jsou také vzájemně oddělené. Zároveň jsou mezi sebou vzájemně posunuty v osách x a y . I u tohoto typu je předpokládán vliv difúze.



Obr. 11: Uspořádání prokovů: a) přímý; b) přímý přes vodiče ve vnitřních vrstvách; c) cik-cak (vnější vodivá vrstva je znázorněna světle šedou, vnitřní vodivá vrstva tmavě šedou a rezistivní prokov modrou barvou).

Pro ověření vlastností zmíněných typů prokovů byla vytvořena testovací struktura (obr. 12). Každá vrstva je opatřena technologickými otvory pro sesouhlasení. Samotnou strukturu tvoří dva páry prokovů stejného typu. Jeden propojuje horní vrstvu s poslední vnitřní vrstvou, druhý poslední vnitřní vrstvu s horní. Oba jsou vzájemně propojeny vnitřním vodivým motivem (na obrázku modře). Červená barva reprezentuje vodivý motiv horní vrstvy. Ten je navíc překryt krycí vrstvou s otvory pro připojení měřících hrotů nad kontaktními ploškami (v oblasti mimo prokovy). Právě kvůli měření byly testovací vzorky navrženy tímto způsobem. Druhým důvodem bylo předejít problémům s žádnými nebo špatnými kontakty mezi kontaktními ploškami a prokovem na spodní straně vzorku. Celá struktura může být chápána jako dva rezistory zapojené do série.



Obr. 12: Topologie navržených testovacích struktur typu A a B (rozměry jsou uvedeny v mm).

Mezi výše popsány vrstvami jsou vloženy buď holé vrstvy s vyplněným prokovem nebo s motivem stejným jako na horní vrstvě, a to v závislosti na typu realizovaných prokovů.

4.1.1.1 Návrh 3D rezistoru

Kvůli neznámé struktuře prokovu po výpalu je možné provést výpočet 3D rezistoru pouze se zjednodušením, že jeho výsledný měrný odpor bude stejný jako u planárního rezistoru. Jeho reálná hodnota bude pravděpodobně vyšší. Důvodem je možnost nerovnoměrného rozložení tavivové složky, kterou lze chápat jako izolant, v objemu prokovu. Reálný průměr funkční složky prokovu by byl menší.

Výpočet vychází ze vzorce pro výpočet odporu vodiče:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (1)$$

kde R je odpor prokovu, ρ měrný elektrický odpor, l délka vodiče a S plocha průřezu vodiče.

Odpor na čtverec R_{sq} TVL rezistivní pasty je uváděn výrobcem pro planární rezistory, které mají obdélníkový průřez. Plocha průřezu je tak dána součinem jejich šířky w a výšky h . Vzorec pro výpočet odporu TLV planárního rezistoru udává vzorec 2:

$$R = R_{sq} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

Odpor na čtverec, nazývaný také vrstvý odpor, odvozený na základě dvou předešlých rovnic, je:

$$R_{sq} = \frac{\rho}{h} \quad (3)$$

Výpočet byl proveden pro použitou rezistivní pastu ESL R-314-A s odporem $10 \text{ k}\Omega/\square$. Průměrná tloušťka vypálené rezistivní vrstvy na LTCC substrátu při dodržení doporučení výrobce pasty byla použita pro výpočet $13 \mu\text{m}$ [32]. Navrhovaný 3D rezistor

prochází pěti vrstvami. Pro výpočet byla použita tloušťka jedné vypálené vrstvy substrátu 90 μm (Hera Lock 2000: výrobcem uváděná tloušťka po výpalu je 3,5 ÷ 3,75 mils).

Výpočet měrného odporu pasty podle planárního rezistoru:

$$R_{sq} = \frac{\rho}{h}$$

$$\rho = R_{sq} \cdot h = 10^4 \cdot 13 \cdot 10^{-6} = 0,13 \quad \Omega \cdot m$$

Odpor rezistivního prokovu s průměrem $d = 500 \mu\text{m}$:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 0,13 \frac{5 \cdot 90 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot \left(\frac{500 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2} \cong 297,94 \quad \Omega$$

Odpor prokovu s průměrem $d = 300 \mu\text{m}$:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 0,13 \frac{5 \cdot 90 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot \left(\frac{300 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2} \cong 827,61 \quad \Omega$$

S ohledem na zanedbání vlivu struktury jsou výsledky odporu rezistivních prokovů pouze orientační. Rovněž zde není uvažován vliv difúze vodivé pasty do rezistivní pasty, který způsobuje zkrácení aktivní délky rezistoru.

4.1.2 Výroba testovací struktury

V dalších podkapitolách je popsán postup při dílčích operacích zhotovení vzorku s 3D prokovy. Jsou zde zmíněny problémy, které se v průběhu procesu objevily, a jejich možná řešení.

4.1.2.1 Řezání a vytváření prokovů

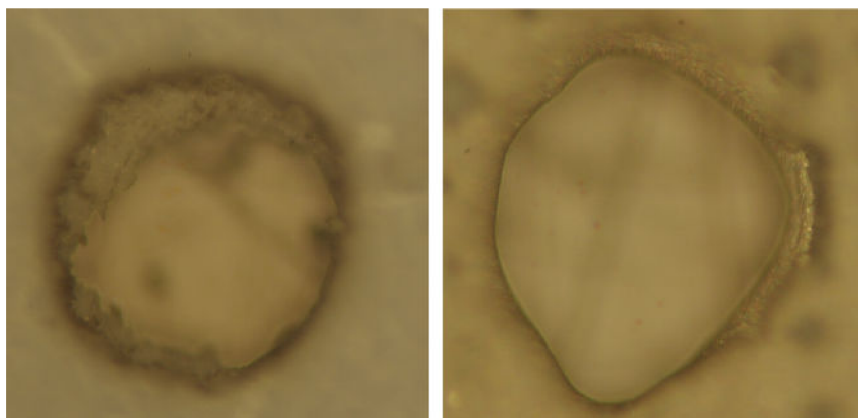
Použitý LTCC substrát (Heraeus Hera Lock 2000) byl rýhován pomocí pulsního NdYAG laseru určeného k trimování, a po té rozdělen. Při řezání přímých otvorů je kvůli pozdějšímu sesouhlasení důležité vyřezat zároveň prokovy. Prokovy typu cik-cak byly řezány v pozdější fázi.

Prokovy byl vytvořeny dvěma způsoby: řezáním laserem (průměr 0,3 mm) nebo vrtáním (průměr 0,5 mm). Vrtání prokovů vrtáky s malým průměrem (0,3 a 0,15 mm) bylo neúspěšné. Po delším vrtání došlo vlivem namáhání ke zlomení vrtáku. Vrtání takto tenkými vrtáky je velmi citlivé na preciznost polohovacího systému vrtačky.

První zmíněný způsob je z pohledu pozicování prokovu přesnější, avšak obtížné je nastavení výkonu laseru, tedy i zajištění opakovatelnosti. Při stejném nastavení parametrů laseru (budící proud, frekvence, rychlost posuvu) nebylo dosaženo stejné

kvality a hloubky řezu. Na řezání má vliv např. opotřebení optické aparatury. Nejvíce však řezání ovlivňuje různá odrazivost LTCC substrátu, a to jak u různých listů LTCC, tak u různých částí listu.

Při řezání prokovu laserem se objevoval další negativní jev, a to opálení v oblasti řezu. Tuto oblast je možné chápat jako znečištěnou, navíc jsou z ní pravděpodobně odpařená či vysušená pojiva. Z tohoto důvodu v oblasti prokovu nemusí být dosaženo ideálního slaminování materiálu. Opálená oblast také brání vytvoření optimální kontaktní plošky, která po natištění nemá požadovaný tvar. Rovněž průřez není shodný s navrhovaným. Tímto způsobená chyba musí být uvažována při stanovení rovnice pro výpočet odporu prokovu. Nedokonale vyřezané prokovy naleznete na obrázku 13.



Obr. 13: Pohled na možné poruchy prokovu o průměru 0,3 mm (vlevo přítomný opal po řezání laserem; vpravo nedokonale vyřezaný prokov po tisku kontaktní plošky).

Prokovy zhotovené vrtáním nebyly vhodné pro svůj velký průměr. Během zasušení pasty po tisku po jedné vrstvě docházelo k protržení pasty. Prokov tak nebyl vyplněn v celém svém objemu. Během vrtání docházelo k poškození substrátu (drobné praskliny v oblasti vrtání). Otřepy a špony vznikající během vrtání rovněž znečišťovaly substrát. Z tohoto důvodu je třeba zařazovat vrtání mezi první kroky zpracování LTCC před tiskem a substrát očistit např. stlačeným vzduchem, aby nedocházelo ke kontaminaci natištěných vrstev. Mechanické poškození okolí otvoru menšího rozsahu je plně napravitelné laminací. Během vrtání totiž nedochází k opalu, resp. k odpaření pojiv ze substrátu.

4.1.2.2 Plnění prokovů

Ve všech provedených experimentech byl jako způsob plnění použit šablonotisk. Prokovy byly tištěny přes měděnou fólii tloušťky 0,3 mm. Soutisk byl zajištěn rovnáním vzorku k technologické hraně šablony (pravoúhlé výřezy v každém rohu vzorku). Byly zkoumány tyto tři způsoby plnění:

- tisk přes více vrstev s nalaminovanou spodní vrstvou,
- tisk přes více vrstev s nenalaminovanou spodní vrstvou,
- plnění prokovu v každé vrstvě zvlášť a následná laminace.

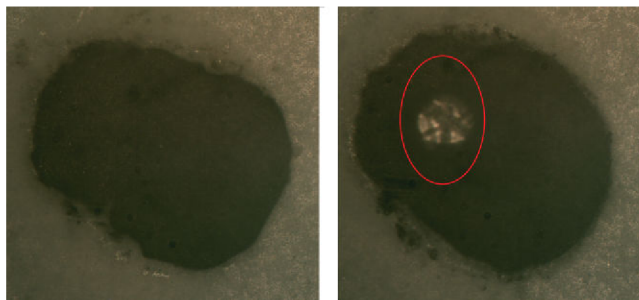
První způsob představuje plnění prokovu zlamínované vícevrstvé struktury s vodivým motivem v každé vnitřní vrstvě, kterými prokov prochází. Prokov je ze spodní strany uzavřen nalaminovanou spodní vrstvou. Lze hovořit o tisku do uzavřené kavity. Takto lze plnit strukturu tvořenou až třemi vrstvami. Při tisku do struktury tvořené více vrstvami substrátu není otvor prokovu naplněn zcela, a to kvůli vzduchové kapse, jež se tvoří ve spodní části kavity. Rezistivní spojení mezi horní a spodní vrstvou se tedy neutvoří – výplň prokovu nemá kontakt s vodivým propojovacím motivem v poslední vrstvě struktury.

Druhý zmíněný způsob je téměř totožný s prvním. Ke struktuře však není přilaminována zaslepující vrstva substrátu. Tento způsob se potýká se smrštivostí pasty během procesu vyrovnání. Pasta se smrštěním vtáhne do otvoru, a po dodatečném přilaminování propojující spodní vrstvy se neutvoří kontakt.

Poslední zmíněný způsob zastupuje postupné plnění prokovu – je plněna každá vrstva substrátu zvlášť. Po vyrovnání a zasušení pasty následoval proces laminace. Tlakem laminárního lisu se jednotlivé části prokovu spojily - vytvořily 3D rezistor. Tato metoda dosahuje nejvyšší opakovatelnosti. Počet vrstev, přes které je možné prokov vytvořit, je omezený pouze procesem laminace. V případě vytváření přímých prokovů je třeba dbát zvýšené pozornosti během sesouhlasení před laminací. Nevýhodou metody je zejména její pracnost.

U této metody bylo pozorováno protržení výplně po vyplnění prokovu, příp. během procesu vyrovnání a zasušení. Po vyplnění otvoru pastou dochází během k pohybu materiálu ke stěnám prokovu působením kohezních a adhezních sil. Pohyb ovlivňují zejména průměr prokovu, hloubka prokovu a viskozita pasty. Ve špatné konfiguraci může dojít ke ztenčení výplně ve středu prokovu nebo až k jejímu protržení. Protože viskozitu pasty bezprostředně po natištění určuje proces tisku, je nutné správně zvolit průměr prokovu a jeho hloubku. Čím větší je průměr prokovu, tím je větší pravděpodobnost protržení výplně. Dalším rozhodujícím faktorem je správné nastavení teplotního profilu pro zasušení s pomalým náběhem.

Při plnění otevřených prokovů, tj. plnění každé vrstvy zvlášť nebo prokovů spojujících dvě vnější vrstvy, protlačená pasta ulpívá na podložce, na které je vzorek umístěn. Během zasušení může dojít ke kontaminaci pasty, nebo k jejímu přischnutí k podložce, což zpravidla vede k poškození prokovu v průběhu manipulace se vzorkem. Z tohoto důvodu je nutné vhodně zvolit podložku.



Obr. 14: Pohled na vyplněný otvor prokovu (vlevo správně vyplněný prokov rezistivní pastou; vpravo protržená rezistivní výplň prokovu v průběhu vyrovnání vrstev).

Částí experimentu bylo rovněž zkoumání vlivu pořadí, v jakém jsou tištěny vodivá a rezistivní pasta na horní vrstvě struktury. V případě tisku vodivé pasty jako první v pořadí, dosahujeme výsledku zobrazeného na obrázku 13 vpravo. Vodivá pasta může srovnat nerovnosti způsobené opalem vzniklém při řezání laserem. Nerovnoměrný přesah do části otvoru však vede k nižšímu odporu prokovu, než k navrženému. Průřez po tisku vodivé pasty není kruhový, což zvyšuje nepřesnost a variabilitu vytvořených prokovů. Tisk vodivé pasty jako druhé v pořadí vede k poškození prokovu, a to zejména kvůli vmáčknutí rezistivní pasty hlouběji do struktury.

Pro tisk vnitřních i vnějších vrstev byly použity vodivé pasty systému Heraeus (TC0307 a TC0306). Rezistivní pasty pro použitý substrát Heraeus Hera Lock 2000 nejsou dostupné, proto byly použity pasty ESL R-314-A nebo ESL 2914 s odporem $10 \text{ k}\Omega/\square$. Tyto pasty mají nekompatibilní vypalovací profil se substrátem, proto nebyl očekáván pozitivní výsledek experimentu po výpalu.

4.1.2.3 Vyrovnání a sušení rezistivní pasty

Vyrovnání vrstev spolu se zasušením po tisku jsou v procesu vytváření prokovů kritickými operacemi. U planárních rezistorů se návrh soustředí pouze šířku a délku. Tloušťka, resp. výška, vrstvy se během zasušení zmenší. Elektrické parametry, které jsou uváděny v jednotkách vztažených na plochu, zůstávají stejné jako navržené. U 3D rezistorů je podstatné zachování všech tří rozměrů. Ve fázi vyrovnání vrstev a především během zasušení dochází ke zmenšení objemu natištěné vrstvy vlivem výparu pojivové složky pasty. V průběhu smršťování pasty se rezistivní výplň prokovu vtahuje do struktury. U 3D rezistorů s malou výškou a velkým průměrem může dojít až k protržení jeho výplně. S tímto jevem je třeba počítat a volit pastu kompatibilní s použitým systémem, nebo dodatečně dotisknout chybějící materiál po prvním zasušení či záměrně prokov přeplnit. Pokud rezistivní pasta po zasušení nevyplňuje celý prostor, ale pokrývá pouze stěny otvoru, je obtížné obecně definovat rezistivitu prokovu. V ideálním případě je žádoucí, aby u prokovu docházelo ke stejnému smršťování jako se smršťuje substrát.

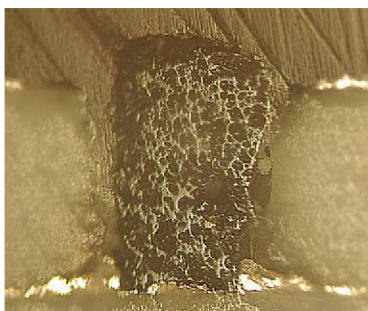
4.1.2.4 Laminace

Vzorky pro tento experiment byly laminovány pomocí axiálního lisu s vyhřívanou pevnou čelistí s následujícím nastavením: teplota $T = 50\text{ °C}$, čas $t = 10\text{ min.}$, tlak $p = 20\text{ kN}$.

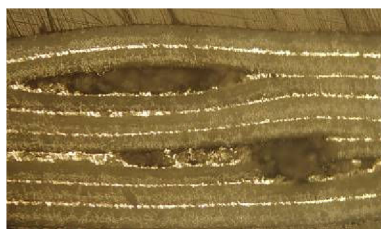
Sesouhlasení vrstev bylo zajištěno skládáním listů substrátu v požadovaném pořadí na trny ocelového přípravku pro laminování. Přípravek slouží k zajištění sesouhlasení vrstev. Tímto způsobem lze dosáhnout sesouhlasení s přesností $\pm 150\text{ }\mu\text{m}$, což vnáší do celého experimentu chybu.

4.1.2.5 Výpal

Zlaminované vzorky byly vypalovány ve vsázkové peci LAC LMH C7/12 s nastaveným teplotním profilem odpovídajícím požadavkům výrobce substrátu. Na obr. 15 je mikrovýbrus výsledného prokovu – 3D rezistoru. Jeho struktura je velmi porézní. Na vině mohou být dva faktory – nevyhovující oddělení funkční a tavivové složky pasty v objemu, nebo rozdíl v teplotních profilech pasty a substrátu. V prvním případě by tavivová – skelná; složka pasty neutvořila spojení se substrátem a funkční složka by tak vytvořila vzájemně izolované hloučky. Tlustá vrstva pasty by také bránila odchodu plynů vznikajících při výpalu, což by vedlo ke vzniku bublin. V druhém případě složky pasty oxidují nebo reoxidují, pasta křehne a rozsypá se a po ztuhnutí nevytvoří požadovanou strukturu.



Obr. 15: Mikrovýbrus prokovem po výpalu s patrnou porézní strukturou rezistivní pasty.



Obr. 16: Mikrovýbrus napříč rezistivním prokovem v cik-cak provedení.

4.1.3 Defekty v substrátu

V průběhu experimentu se objevilo několik deformací v okolí prokovů. Prvním z nich je praskání substrátu nad nebo pod prokovem (v případě, že se jedná o prokov propojující vnitřní vrstvy, tedy je překrytý souvislou vrstvou substrátu) – viz obr. 17.

K tomuto jevu dohází během výpalu. Jeho příčinou je zřejmě uvolňování zbytků pojivové složky pasty a případných dalších uvolňujících se složek pasty nebo substrátu.

Dále byl pozorován pokles krycí vrstvy substrátu v okolí prokovu (cca 1 mm od prokovu) způsobený rozdílnou smrštivostí použité pasty a substrátu. Pokles je téměř vždy provázen vystoupenutím substrátu. Na vzniku tohoto defektu se nejspíše podílí i hromadění plynů vypařující se organické složky. Vystoupenutí substrátu mělo menší rozsah v porovnání s poklesem. Častěji se objevovalo u prokovů s větším průměrem (0,5 mm), což ukazuje na původ odpařované složky především v rezistivní pastě. U prokovů s menším průměrem 0,3 mm, a tedy i menším objemem pasty, byl pozorován jak menší pokles, tak i menší vystoupenutí.



Obr. 17: Pohled na pokles materiálu v okolí prokovu a jeho vystoupenutí a prasknutí.

Posledním z pozorovaných defektů je vypouknutí hrany vzorku v okolí prokovu situovaného u okraje substrátu. Míra vypouknutí se pohybovala okolo 1 mm od původní hrany. Vzdálenost prokovu od okraje vzorku byla 2,5 mm. Tato deformace se vyskytovala především u přímo vrtaných prokovů. U prokovů cik-cak je četnost výskytu znatelně nižší. Defekt se objevuje, na rozdíl od výše uvedených, po laminaci.

4.1.4 Diskuse výsledků

Byly provedeny čtyři experimenty pro ověření závislosti vlastností prokovů na jejich uspořádání, velikosti otvoru, počtu vrstev, způsobu tisku pasty a dalších vlivů ovlivňujících kvalitu a opakovatelnost prokovů. Jako plnivo byla použita rezistivní pasta určená pro korundový substrát.

Pro první experiment byla použita struktura A (obr. 12). Každý pár prokovů byl vytvořen jiným způsobem, aby mohly být oba způsoby porovnány a předešlo se chybě vzniklé drobnými rozdíly ve zpracování jednotlivých vzorků. První pár prokovů (R_A) na této struktuře byl realizován jako přímý skrz pět vrstev substrátu. Byl zhotoven vrtáním. Jeho průměr byl 0,5 mm (obr. 11b). Druhý pár (R_B) byl vyřezán laserem s průměrem 0,3 mm. Byl uspořádán do cik-cak struktury (obr. 11c). V obou případech

byla každá vrstva plněna zvlášť. Pro tisk vnitřního vodivého motivu byla použita tlustovrstvá pasta Heraeus TC0307. Dosažené rezistivity prokovů byly $R_A = (50,98 \pm 45,72) \Omega$ a $R_B = (1704,43 \pm 2085,57) \Omega$. Výsledky měření byly získány měřením osmi vzorků. Výsledky měření jsou v tabulce 5 níže:

Tab. 5: Výsledky měření rezistivních prokovů (3D rezistorů).

č. vzorku	R_A		R_B	
	R [Ω]	Δ	R [Ω]	Δ
1	57,5	6,52	1395	309,43
2	x	x	1530	174,43
3	27,7	23,28	3790	2085,57
4	47,6	3,38	x	x
5	27,8	23,18	995	709,43
6	96,7	45,72	2489	784,57
7	48,6	2,38	x	x
8	x	x	27,6	1676,83
Φ	50,98	17,41	1704,43	956,71

Srovnání naměřených hodnot s vypočtenými 297,94 Ω pro R_A a 827,61 Ω pro R_B ukazuje řádově podobné výsledky. Rozdíl mohl být způsoben nestabilitou procesu, chybou měření, neočekávanou strukturou rezistivní pasty po výpalu nebo difúzí vodivé pasty do rezistivní. U cik-cak provedení (R_B) se navíc na výsledku může podílet větší počet přechodových odporů.

Ve druhém experimentu byla rovněž použita struktura A. Jeho záměrem bylo ověřit možnost plnění rezistivních prokovů tiskem přes více vrstev. Všechny použité vzorky v tomto experimentu měly otvory s průměrem 0,5 mm zhotovené vrtáním. Prokovy neprocházely vodivými vrstvami (obr. 11a). Plněné prokovy procházely přes pět vrstev, přičemž spodní vrstva byla otevřená – bez laminované vrstvy, resp. nejspodnější vrstvou byla vrstva s otvorem; uzavřená – s laminovanou spodní vrstvou bez otvoru; nebo otevřená se spodní vrstvou dolaminovanou po tisku rezistivní pasty.

U prvního typu vzorku nebylo dosaženo uspokojivého výsledku. Při tisku se nepodařilo protlačit pastu celou strukturou, pravděpodobně kvůli vzduchu, který neměl kam odcházet, a proto nedošlo ke spojení rezistivní pasty s vodivou vrstvou v poslední vrstvě struktury. U druhého a třetího typu vzorku se objevoval podobný problém, avšak na vině byla smrštivost pasty. Při zasušení pasta zmenšila svůj objem a došlo k jejímu smrštění směrem do otvoru. Rezistivní pasta tak opět neměla kontakt s vodivou vrstvou.

Třetí experiment byl zaměřen na zjištění vývoje výplně prokovů procházejících malým počtem vrstev v průběhu procesu. Byla použita struktura B. Vytvořené vzorky

byly dvouvrstvé, třívrstvé a čtyřvrstvé s vnitřním vodivým motivem, přes který prokov procházel.

Toto uspořádání se ukázalo jako nevhodné kvůli zkratování prokovu vodivou pastou, která difunduje do rezistivní pasty, nebo ji kontaminuje již během laminace.

Poslední experiment měl za cíl prověřit chování prokovu procházejícím přes více vrstev. Vzorek byl navržen pěti nebo šestivrstvý s přímým prokovem bez vnitřní vodivé vrstvy (obr. 11a). Celkem byly vyrobeny dva vzorky pětivrstvé a dva šestivrstvé. Pro experiment byla využita struktura B.

Dosažené odpory prokovů (20 pro každou variantu) pro tuto testovací strukturu byly $R = (12,8 \pm 8,0) \text{ k}\Omega$ pro pětivrstvý vzorek a $R = (12,2 \pm 9,0) \text{ k}\Omega$ pro šestivrstvý. Tento experiment ukázal postup zhotovení prokovu jako vhodný. Optimalizace procesu pro dosažení potřebné přesnosti a reprodukovatelnosti vyžaduje další experimenty.

S ohledem na malou přesnost výrobního procesu a použití nekompatibilních materiálů nebyl sledován vliv pořadí tisku vodivé a rezistivní pasty (vodivá – rezistivní; rezistivní – vodivá).

4.1.5 Shrnutí a závěr

Prokovy v LTCC substrátu se jeví jako zajímavý způsob zvýšení hustoty integrace. Cílem provedených experimentů bylo zejména vytvoření vědomostního základu a technologických podkladů pro jejich spolehlivou a opakovatelnou realizaci.

Postupný tisk prokovů po vrstvách se jeví jako vhodný postup výroby prokovů. Předchází utvoření špatného nebo žádného kontaktu s vodivou vrstvou. Omezuje také vtažení výplně dovnitř struktury během zasušení. Tento způsob je však náchylný na protržení výplně při manipulaci se vzorkem nebo při zasušení.

Difúze vodivé pasty do pasty rezistivní je možným problémem při realizaci rezistivních prokovů a je třeba ji zohledňovat v návrhu prokovu i při stanovení pracovního postupu. Vlivem difúze se snižuje rezistivita prokovu. Kritická délka byla u planárních prokovů v dřívějších experimentech stanovena na 0,2 mm, kdy dochází k jeho zkratování vodivou pastou. U 3D prokovů nebyla difúze jednoznačně prokázána. Na vině je malá opakovatelnost procesu a zanesené chyby. Ke zkratování prokovů mohlo v průběhu experimentů dojít kontaminací rezistivní pasty vodivou během procesu. V návrhu je však třeba s možnou difúzí počítat. Protože tloušťka jedné vrstvy LTCC substrátu je přibližně 0,1 mm, což je méně než kritická vzdálenost difúze, navržený prokov by měl být významně delší než je kritická délka. U takovýchto rezistivních prokovů je očekávána jejich větší přesnost. Vhodným návrhovým řešením je taktéž připojení rezistivního prokovu do obvodu rezistivní pastou namísto vodivé.

Jeden z hlavních cílů – zjištění uspořádání složek TLV pasty v 3D rezistoru, nebylo možné plně realizovat. Použité rezistivní pasty ESL R-314-A nebo ESL 2914 nejsou kompatibilní se substrátem LTCC Heraeus Hera Lock 2000 a kompatibilní pasta nebyla dostupná. U mikrovýbrusů 3D rezistorů byla zjištěna pórovitá struktura výplně,

jejíž původ nebyl plně objasněn. Mohlo jít o atypické uspořádání tavivové a funkční složky v porovnání s TLV planárními rezistory nebo o výplň poškozenou během výpalu s jiným teplotním profilem než doporučuje výrobce. Na vzniku pórů se rovněž mohou podílet unikající plyny vzniklé odpařováním pojivové složky během zasušení a výpalu.

V této oblasti je jistě prostor pro další výzkum. Zejména je třeba nalézt vhodnou materiálovou základnu, především rezistivní pastu pro vnitřní vrstvy kompatibilní s použitým substrátem Heraeus Hera Lock 2000. Dále optimalizovat výrobní proces vedoucí k realizaci opakovatelného rezistivního prokovu. Je rovněž nutné stanovit dosažitelné tolerance, proudovou zátěž a možnost trimování. Velmi zajímavé je rozložení proudové hustoty odvíjející se od struktury prokovu, resp. rozložení nosné a funkční složky rezistivní pasty po výpalu. Pozornost by bylo vhodné věnovat i výrobě prokovů plněním otvorů rezistivní pastou již vypálené struktury, ať už tiskem přes síto či šablonu nebo dispenserem.

4.2 Životnost drátových propojů ve vysokoteplotních aplikacích

Cílem následujících experimentů bylo ověření možnosti utváření vodivého spojení LTCC s čipovými součástkami určenými pro provoz na vyšších teplotách ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Experimenty se zaměřily pouze na spojení čipu se substrátem kontaktováním (wire-bonding). Substrát byl opatřen vodivým motivem naneseným pomocí TLV technologie.

Kontaktování je technika utváření spoje pomocí mikrodrátku (Al, Au aj.), který je přivařen pomocí tlaku a teploty nebo ultrazvuku na kontaktní plošky. Tato technika se standardně u hybridních obvodů na keramických substrátech využívá. Pro systém LTCC Hera Lock 2000 výrobce Heraeus je dostupná zlatá pasta TC8101 [33] určená přímo pro kontaktování. Mezi zvládnuté procesy laboratoře Ústavu Mikroelektroniky patří kontaktování hliníkovým nebo zlatým mikrodrátkem korundových substrátů se stříbrným vodivým motivem. I když se kontaktování LTCC a s ní kompatibilní pasty od zvládnutých materiálů v principu neliší, přesto zatím neproběhl žádný experiment, který by tuto domněnku potvrdil.

Do současné doby byly v laboratoři UMEL kontaktovány čipy na bázi křemíku (Si). Ty mají provozní teplotu obvykle do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky odolnosti keramických materiálů se nabízí jejich využití v aplikacích s čipovými součástkami na bázi karbidu křemíku (SiC) a nitridu galia (GaN), které mají vysokou provozní teplotu (stovky stupňů Celsia). Jsou určeny především pro výkonové aplikace. Jejich provozní teplota se běžně pohybuje na rozsahu teplot od 250 do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [34], což převyšuje možnosti běžně užívaných polovodičů. Návrhy pouzder pro tyto čipy vyžadují jiný přístup oproti stávajícím určených pro křemík. Standardní kontaktování čipu hliníkovým mikrodrátkem, používání silikonových tmelů a pájené spoje jsou nahrazovány. Důvodem je jejich nízká teplotní odolnost. Jedním z možných řešení je např. opatření čipu měděnými piny, které jsou k další propojovací struktuře připevněny stříbrným svárem [35]. Možnost využití LTCC a zlatých drátových propojů ke konstrukci pouzdra pro čipy SiC není v dostupných pramenech publikována.

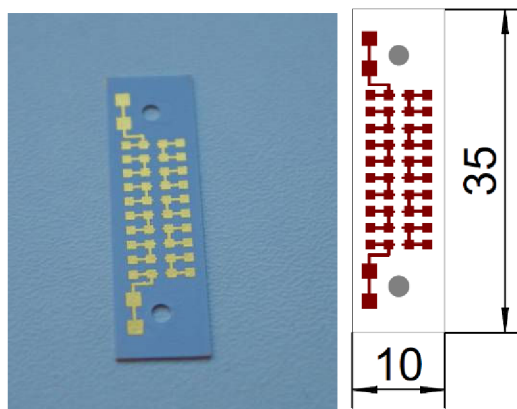
LTCC je ve spojení s SiC součástkami zajímavá především proto, že pomocí ní lze velice snadno přizpůsobit substrát dané aplikaci. Oproti korundovým substrátům je její výhodou možnost vytváření více vrstevných obvodů a 3D struktur. I když má menší odolnost v porovnání s korundovými substráty, její provozní teplota se může pohybovat až do 600 °C u většiny dostupných typů. LTCC také umožňuje vytváření chladičů – chladičí prokovy nebo kanálky pro chlazení kapalinou [22].

Nalezení spolehlivého propojení mezi polovodičovým čipem a elektrickým obvodem je jedna z nejdůležitějších věcí, která musí předcházet zahájení veškerých dalších experimentů [25]. Jak bylo zmíněno výše, existuje více možností provedení propojení čipu s pouzdrem. Pozornost ale bude nadále věnována kontaktování s využitím zlatých mikrodrátků, a to především kvůli dostupnosti již zavedené technologie.

Popisované experimenty měly ukázat zejména chování a spolehlivost drátových propojů. Byl zkoumán pouze svár na straně kontaktní plošky na LTCC. Čipová součástka nebyla do experimentu zahrnuta z důvodu nedostupnosti vzorků holých čipů. Byl navržen testovací vzorek, který byl v průběhu experimentu tepelně namáhán. Následovně byly zkoumány změny rezistivity drátových propojů a změny jejich pevnosti. Byly rovněž sledovány defekty způsobené tepelnou zátěží. Další vlastnosti, jako termomechanické napětí v materiálu pro různé teplotní profily, byly simulovány v software ANSYS.

4.2.1 Návrh testovacího vzorku

Pro výzkum spolehlivosti drátových propojů v aplikacích s vyšší provozní teplotou byl vytvořen vzorek (obr. 18). Jako substrát byl použit nesmrštivý LTCC substrát Heraeus Hera Lock 2000. Byl vybrán, protože je zavedený v laboratoři UMEL. Díky jeho téměř nulové smrštivosti bude ulehčen další návrh pouzdra pro SiC součástky. Vzorek byl tvořen třemi vrstvami LTCC, aby byla zajištěna jeho planarita během a po výpalu. Vzorky tvořené nižším počtem vrstev se mají tendenci ohýbat. Třívrstvý vzorek je současně již dostatečně pevný pro zkoušku pevnosti propojů trháním. Testovací vzorek s rozměry 10 x 35 mm byl opatřen dvěma otvory s průměrem 2 mm za účelem sesouhlasení vrstev během laminace. Rozměry se odvíjely od přípravku pro laminování. Ke zlamování byl použit axiální lis.



Obr. 18: Vypálený vzorek před vytvořením drátových propojů (nalevo) a jeho návrh [mm] (napravo).

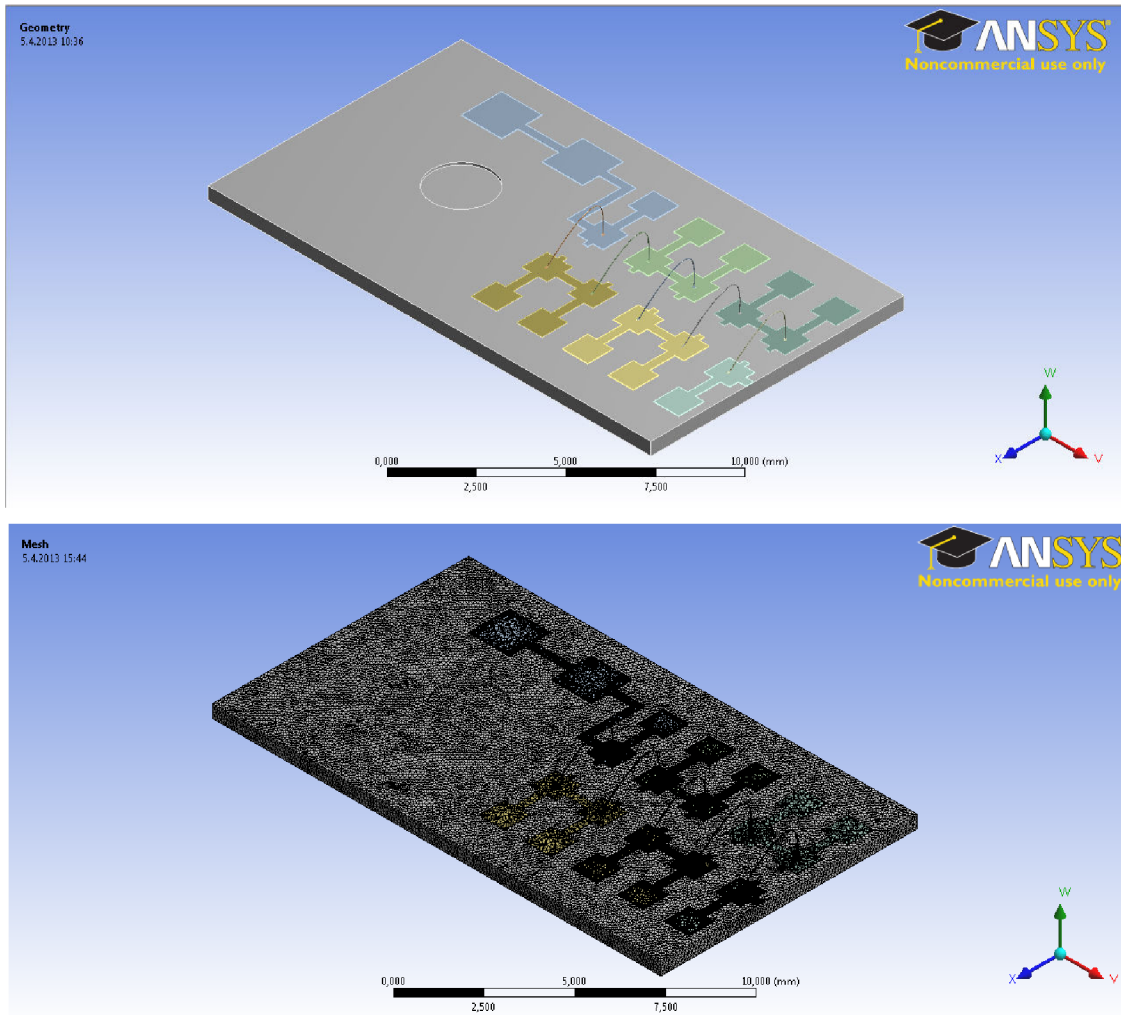
Vodivý motiv vzorku tvoří řetězec plošek pro nakontaktování deseti drátových propojů. Každá ploška je zdvojená, aby mohly být připojeny hroty měřicího přístroje pro měření odporu využívajícího čtyřbodovou metodu měření. Takto lze měřit odpor každého propoje. Vzorek navíc obsahuje další čtyři plošky sloužící k měření odporu celého vzniklého řetězce stejnou metodou.

Vodivý motiv byl vytvořen sítotiskem. Byla použita kontaktovatelná tlustovrstvá zlatá pasta Heraeus TC8101. Byla zvolena kvůli materiálové kompatibilitě se zlatým drátkem. Má rovněž výborné vlastnosti jako je odolnost proti korozi, migraci a má velmi dobrou vodivost [33] [36] [37].

Použitý zlatý drátek (s průměrem 25 μm) byl kontaktován ultrazvukovou kontaktovačkou. Vlastnosti kontaktování byly nastaveny – první svár: $P = 270 \text{ mW}$ (výkon), $F = 300 \text{ mN}$ (přítlačná síla), $t = 320 \text{ ms}$ (čas svařování), $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (teplota); druhý svár: $P = 290 \text{ mW}$, $F = 320 \text{ mN}$, $t = 250 \text{ ms}$, $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

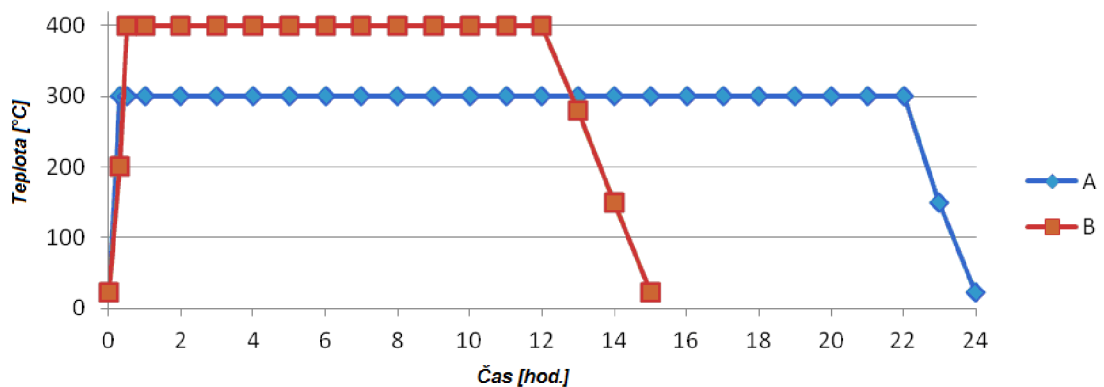
4.2.2 Simulace

Jako první krok v této studii byla provedena simulace chování drátových propojů po jejich vystavení tepelné zátěži. Cílem simulace bylo popsání deformace a nalezení nejvíce namáhaných částí spoje. Pro simulaci byl použit simulační nástroj Ansys Workbench, který nabízí vhodnou kombinaci tepelné a strukturální analýzy. Protože je navržený vzorek symetrický a protože bylo předpokládáno jeho symetrické chování, vytvořený model reprezentuje pouze jednu polovinu vzorku, jak je ukázáno na obrázku 19. Tento postup se u simulací symetrických struktur používá standardně. Zjednodušení vede k uvolnění výpočetní kapacity. Díky němu je možné použít hustší síť bodů pro výpočet, což vede k přesnějším výsledkům, v kratším výpočetním čase oproti simulaci celého vzorku.



Obr. 19: Vytvořený model struktury (nahore) a použitá síť bodů pro výpočet (dole).

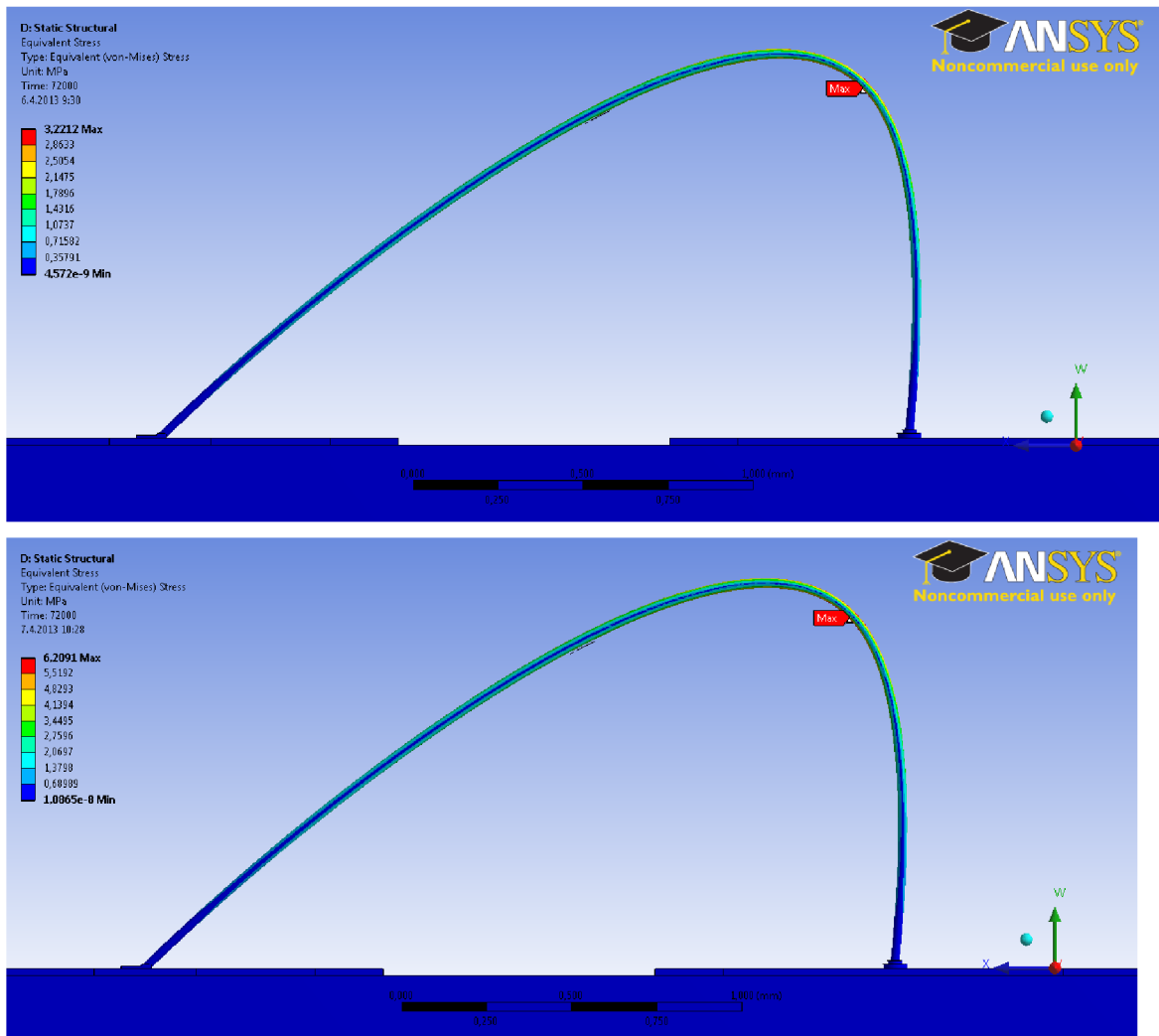
Byly vytvořeny dva teplotní profily pro aplikovanou tepelnou zátěž, které odpovídají později použitým teplotním profilům pro nastavení vsázkové pece. Maximální teploty pro experiment byly zvoleny 300 a 400 °C. Profily jsou zobrazeny na obrázku 20.



Obr. 20: Teplotní profily použité pro simulaci.

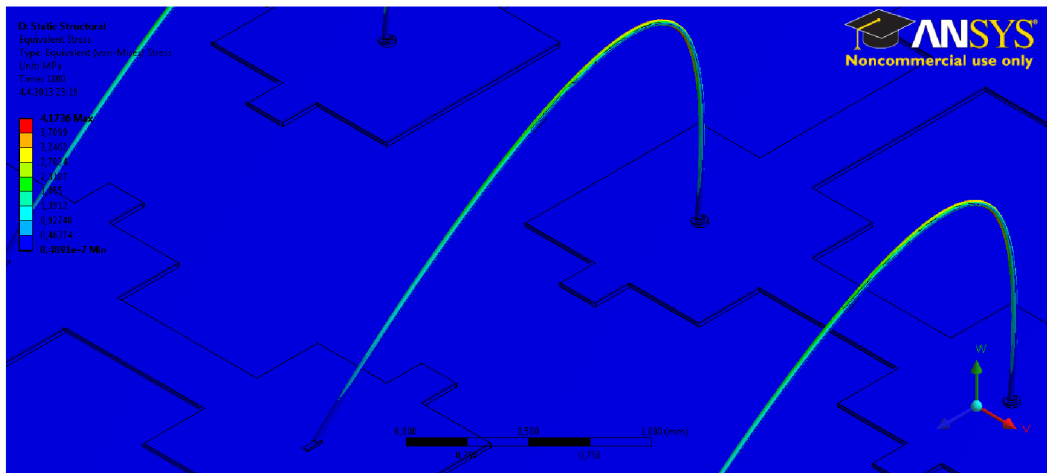
Simulace byly provedeny pro dva materiály propojů – hliník a zlato; které jsou využívány v laboratoři UMEL. Po nastavení teplotního profilu byla monitorována

úroveň pnutí a deformace materiálu. Zlaté propoje dosahovaly lepších výsledků na obou teplotních profilech, co se pnutí týče, a navíc i úroveň deformace byla menší. Nejvyšší ekvivalentní stres dosahoval 3,22 MPa u zlatého propoje. U hliníkového to bylo přibližně dvojnásobně, tedy 6,21 MPa. Rozložení ekvivalentního stresu je zobrazeno na obrázku 21.



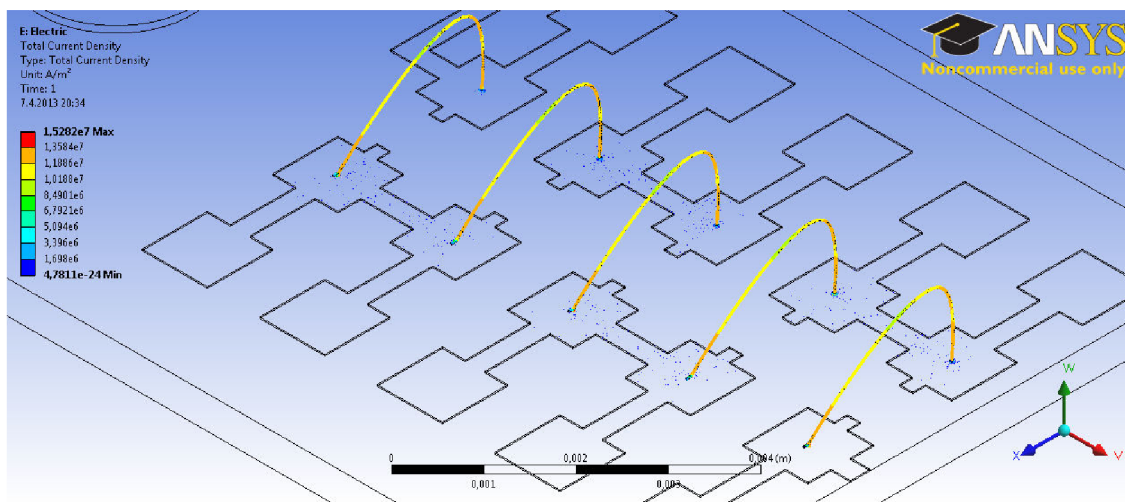
Obr. 21: Ekvivalentní stres zlatého (nahore) a hliníkového (dole) mikrodrátku namáhanými teplotou s průběhem dle teplotního profilu A.

Bylo zjištěno, že čas cyklu, po který je vzorek namáhán, nemá žádný významný efekt na velikost pnutí v mikrodrátku. Nicméně, pro analýzu nebyl uvažován případný proud, který by spojem v reálné aplikaci protékal a mohl by významně ovlivnit výsledek analýzy. Simulace také nezahrnuje vliv atmosféry nebo jiné zdroje tepla. Na obrázku 22 je zobrazen výsledek Von Mises analýzy pnutí mikrodrátku po aplikaci teplotního namáhání s profilem B.



Obr. 22: Ekvivalentní pnutí zlatého mikrodrátku po aplikaci tepelné zátěže s teplotním profilem B.

Jak je z obrázku výše patrné, nejvíce namáhaným bodem spoje je vrchol smyčky. Tento bod navíc dosahuje i nejvyšší teploty, což je způsobeno malou plochou chlazení a velkou proudovou hustotou (obr. 23). Z těchto faktů vyplývá i možné opatření zvyšující spolehlivost spoje, a sice jeho krytí vhodným materiálem, např. epoxidem nebo skelnou pájkou, pro vyšší teploty. Při návrhu takového řešení je třeba správně zvolit použitý krycí materiál se stejnou teplotní roztažností, jako má použitý mikrodrátek.



Obr. 23: Rozložení proudové hustoty v řetězci propojů.

4.2.3 Měření

Po vytvoření kontaktů na připraveném vodivém motivu byly na všech vzorcích změřeny odpory všech propojů (celkem 20) i celého řetězce. Dávky vzorků byly cyklovány ve vsázkové peci. Délka cyklů byla 24 hodin. Teploty cyklů byly vybrány z rozsahu teplot 300 – 550 °C. Na těchto teplotách se zásadně nemění vlastnosti LTCC substrátu, a lze předpokládat spolehlivé plnění funkce. Cyklus na teplotě 850 °C

byl pouze informativní a trval pouze 1 hodinu. Na této teplotě totiž LTCC nemá stabilní mechanické vlastnosti a není ji tak možné použít v aplikacích s touto provozní teplotou.

Na konci každého cyklu byla dávka cyklovaných vzorků zmenšena o dva kusy, u kterých byl změřen odpor propojů. Pomocí zařízení Dage PC2400 byla následně otestována jejich pevnost destruktivním tahovým testem.

Nastavení testu bylo pro všechny trhané spoje stejné:

destruktivní, rozsah 20 g, fallback 20 %, rychlost 17 $\mu\text{m/s}$.

Změny kvality spoje byly posouzeny opticky. Dva vzorky nebyly vůbec cyklovány a byly použity jako reference.

Pro měření odporu spojů byla použita čtyřbodová měřicí metoda. Pro měření byl použit stolní multimetr Agilent U3402A. Měření rezistivity celého řetězce přineslo velmi podobné výsledky pro všechny vzorky. Průměrný odpor řetězce počítaný pro třinácti vzorků před cyklováním byl 833,13 m Ω . Průměrný odpor nakontaktovaného propoje před cyklováním byl 63,17 m Ω . Jak je vidět na obrázku 24, po vystavení vzorků tepelné zátěži došlo ke změně rezistivity spojů. Odpor propoje se vždy snížil řádově o jednotky miliohmů, přibližně o 4 m Ω . Necyklované vzorky znovu změřené po třiceti dnech od nakontaktování vykazaly změny $-0,5$ a 1,3 m Ω . Bohužel, kvůli časové náročnosti a nákladům na materiál (především zlatou TLV pastu) nebyl proveden dostatečný počet cyklů pro stanovení závislosti odporu propojů na počtu cyklů.

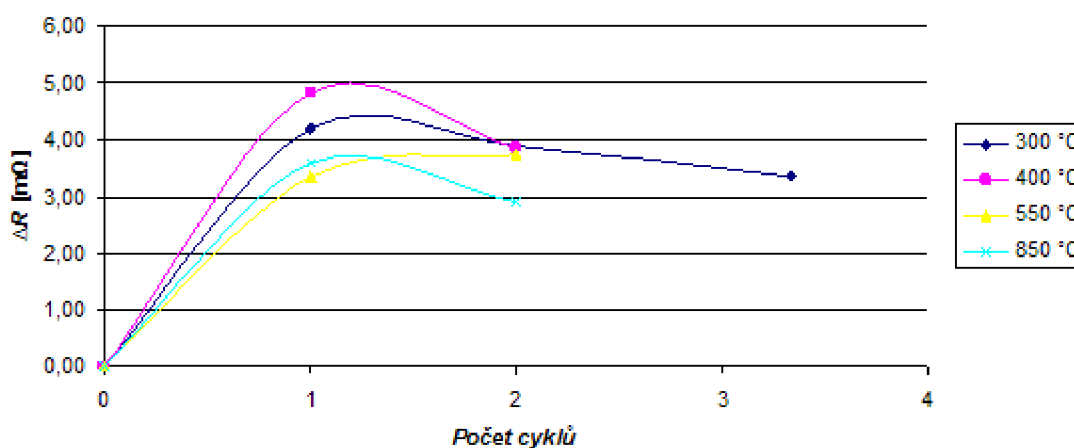
Pro každý vzorek byl veden záznam (viz tab. 6). Propoje byly číslovány shora dle obrázku 18. U každého propoje byl po nakontaktování změřen jeho odpor R_1 . Další měření odporu propoje (R_2) proběhlo až po dokončení cyklování, které definují údaje teplota a počet cyklů. Všechna měření odporu propojů probíhala v klimatizované místnosti se stálou teplotou 20 °C. Rozdíl naměřených ΔR odporů propoje byl vypočítán prostým rozdílem:

$$\Delta R = R_1 - R_2 \quad (4)$$

Posledním vedeným údajem je zatížení propoje m , při kterém došlo v průběhu destruktivní zkoušky k jeho přetržení.

Tab. 6: Ukázka výsledků měření odporu a destruktivní zkoušky pevnosti propojů v tahu. Výsledky jsou pro vzorek č. 1, který byl třikrát cyklován při teplotě 550 °C. Použité veličiny: R_1 – odpor propoje před cyklováním; R_2 – je odpor propoje po cyklování; ΔR – je rozdíl R_1 a R_2 ; m – zatížení propoje, při kterém došlo k jeho přetržení.

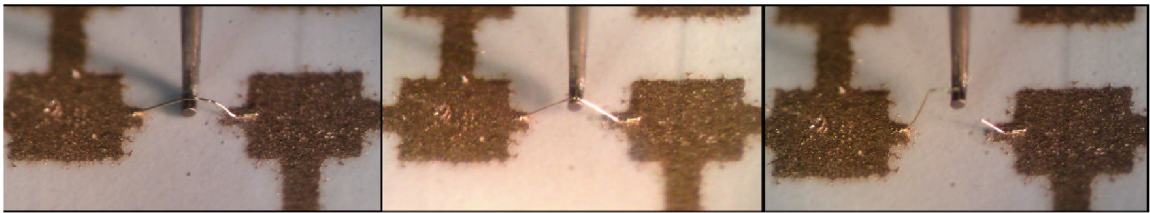
vzorek	Teplota	počet cyklů	číslo. propoje	R_1 [mΩ]	R_2 [mΩ]	ΔR [mΩ]	m [g]
1	550 °C	3	1	63,65	58,90	4,75	6,48
			2	64,23	59,42	4,81	4,51
			3	64,64	60,01	4,63	4,97
			4	63,50	61,21	2,29	4,05
			5	64,00	59,67	4,33	5,69
			6	63,80	61,32	2,48	5,36
			7	62,99	60,99	2,00	5,47
			8	62,90	57,88	5,02	4,47
			9	60,81	58,88	1,93	5,63
			10	60,07	58,92	1,15	X
			průměr	63,06	59,72	3,34	5,18
			řetězec	827,10	801,20	25,9	



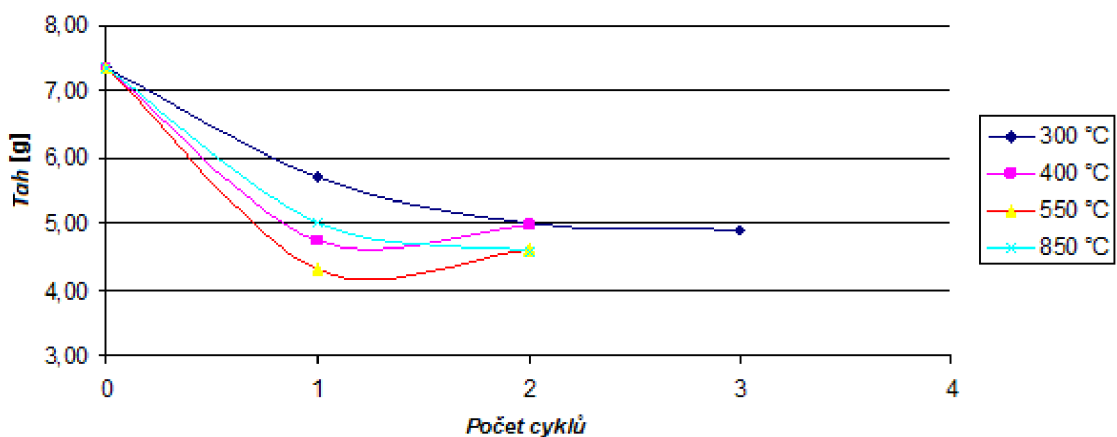
Obr. 24: Změna rezistivity spojů od referenčního měření v závislosti na počtu cyklů.

U propojů na TLV motivech je obvykle velký rozptyl pevnosti spojů. Je to způsobeno především velkou a nerovnoměrnou hrubostí povrchu motivu v porovnání např. s ploškami pro kontaktování na čipu. Spoje vytvořené na tlustých vrstvách v našich laboratorních podmínkách obvykle dosahují pevností v tahu $6 \div 14$ g (TLV motiv na korundovém substrátu). Podle výrobce má použitá kontaktovatelná pasta TC8101 pro mikrodrátek s průměrem $0,25 \mu\text{m}$ pevnost ≥ 8 g [33]. Výsledky testů

pevnosti v tahu u necyklovaných vzorků ukázaly pevnost 7,37 g. To je horší výsledek než očekávaný. Příčina může být v nezvládnutém procesu nebo chybě měření u trhacích zkoušek. Jak je zobrazeno na obrázku 26, pevnost spojů v tahu klesá tím více, čím je větší tepelná zátěž. Jako v předchozím případě nelze stanovit přesně závislost popisující pokles pevnosti. Lze však předpokládat, že vystavení spoje vyšší teplotě způsobí větší pokles odporu propoje a zároveň více sníží jeho pevnost v tahu. Zajímavým zjištěním plynoucím z tohoto experimentu je fakt, že spoje cyklované na nižších teplotách se při zkoušce pevnosti v tahu trhaly v místě sváru. Spoje cyklované při vyšších teplotách se trhaly v nejvyšším bodě smyčky, který koresponduje s nejvíce tepelně namáhaným místem propoje podle simulace.



Obr. 25: Zkouška pevnosti v tahu spoje cyklovaného při 550 °C – spoj se během zkoušky přetrhl ve smyčce.



Obr. 26: Závislost pevnosti spojů při destruktivní zkoušce pevnosti v tahu na počtu cyklů při různých teplotách.

4.2.4 Shrnutí

Cílem výše popsaných experimentů bylo prověření možnosti využití zlatých propojů na substrátu LTCC Hera Lock 2000 v aplikacích s vysokou provozní teplotou. Bylo zkoumáno pouze spojení LTCC-LTCC. Důvodem byl menší počet vlivů na chování propojů, dále pak nedostupnost holých SiC čipů. Pro experiment byl navržen vzorek. Jeho vodivý motiv byl uzpůsoben tak, aby po nakontaktování propojů tvořil řetěz. Při výrobě byla použita kontaktovatelná zlatá pasta Heraeus TC8101. Pro kontaktování byl použit zlatý mikrodrátek s průměrem 0,25 μm. Vzorek byl cyklován ve vsázkové peci, a poté podroben destruktivní zkoušce pevnosti propojů v tahu. Sledovanými parametry byly odpor každého propoje a odpor celého řetězce.

Měření probíhalo po nakontaktování a po dokončení cyklování. Poté byla testována pevnost.

Podmínky experimentů byly zároveň simulovány pomocí software ANSYS. Bylo srovnáváno chování zlatých a hliníkových mikrodrátků. Z výsledků simulací vyplynulo, že zlaté mikrodrátky jsou pro použití na vysokých provozních teplotách vhodnější díky nižší deformaci, k níž dochází během tepelného namáhání. Maximální pnutí ve zlatém propoji dosahovalo 3,22 MPa, což je polovina v porovnání s maximálním pnutím hliníkového propoje 6,21 MPa. Ze simulací také vyplývá, že nejnamáhavějším bodem spoje je vrchol smyčky. Tento fakt vysvětluje, proč docházelo u zkoušek pevnosti v tahu k přetržení spojů cyklovaných na vyšší teplotě právě v místě smyčky, a nikoli v místě sváru, jak tomu bylo u méně namáhaných spojů. U simulací nebyly uvažovány vlivy prostředí – atmosféry apod.

Měření změny rezistivity způsobené tepelnou zátěží neukázalo žádnou významnou změnu. Propoje zůstávaly vodivé. Nedochovalo k defektům způsobeným tepelnou zátěží. Bylo pozorováno snížení odporu propojů v řádu jednotek miliohmů. To lze považovat za zanedbatelné. Průměrný odpor propoje před cyklováním R_l byl 63,17 m Ω a průměrná změna ΔR přibližně 4 m Ω . U vzorků, které nebyly cyklované, byla po třiceti dnech od nakontaktování pozorována změna přibližně 1 m Ω . Nebylo prokázáno, že by odpor propoje byl tím větší, čím větší byla teplota v průběhu cyklování.

Výsledky zkoušky pevnosti v tahu ukázaly, že pevnost vytvořených spojů na LTCC se přibližuje očekávaným hodnotám. Naměřená průměrná pevnost byla $m = 7,37$ g. Minimální pevnost udávaná výrobcem pro mikrodrátek s průměrem 25 μm je ≥ 8 g. Pevnost spojů v tahu klesá s velikostí aplikované tepelné zátěže, a to v průměru o 2 g. Celková pevnost spojů pak nemusí být uspokojivá pro některé třídy aplikací (např. vojenské). U vzorků byla zjištěna změna pevnosti v místě smyčky propoje. Propoje cyklované při nižších teplotách byly během testu utrženy v místě druhého sváru. Ty, které byly cyklované při vyšších teplotách se trhaly ve smyčce.

Na základě výsledků výše popsaných experimentů lze říci, že zlaté spoje vytvořené kontaktováním na substrátu LTCC je možné využívat v aplikacích s vysokou provozní teplotou. Je však třeba ověřit spolehlivost během dlouhodobého provozu a vliv atmosféry na stárnutí. U cyklovaných substrátů nebyly pozorovány žádné defekty vzniklé působením vyšší teploty.

4.3 Fotoodrazivá vrstva na LTCC pro optické aplikace

Tato část práce se zabývá depozicí fotoodrazivé vrstvy na LTCC. Následující experimenty měly za úkol zmapovat možnosti LTCC a TLV technologie. Cílem bylo nalézt co možná nejméně náročný způsob přípravy vrstvy, který by umožňoval její integraci do struktury. Jsou tedy zahrnuty různé způsoby zhotovení vrstvy a možná optimalizace.

Pro svou odolnost je HTCC často využívána v senzorických aplikacích určených do nepříznivého prostředí. Ať už se jedná o použití v prostředí s vysokou teplotou

nebo chemicky agresivní [9]. LTCC díky možnosti snadného zpracování v surovém stavu a vytváření 3D struktur rozšiřuje aplikační možnosti keramických substrátů. Jednou z možných oblastí využití jsou optoelektrické aplikace, u kterých se rovněž předpokládá vyšší odolnost. Zpracování LTCC v nevypáleném stavu také umožňuje substrát před výpalem pro odrazivou plochu uzpůsobit. Teoreticky lze například vytvořit parabolické zrcadlo. Do struktury je možné přímo integrovat optická vlákna. Jsou také využívány odrazivé vrstvy vytvořené přímo na substrátu. Dosud zveřejněné publikace se zabývají pouze vrstvami vnějšími [11][38]. Optické aplikace využívající vnitřní odrazivé vrstvy zatím nebyly publikovány, přestože nabízejí široké pole aplikačních možností. Využití by mohly nalézt např. pro detekci plynů nebo kapalin proudících strukturou. Velkou výhodou tohoto uspořádání je oddělení odrazivé vrstvy od vnějších vlivů.

Do současné doby se jako odrazivé plochy využívaly především napařené vrstvy. Hlavním důvodem je malá hrubost povrchu a z ní vyplývající lepší odrazivost. Napařovaný materiál kopíruje substrát, který de facto určuje výslednou kvalitu. Hrubost substrátu je tedy určující pro výslednou kvalitu odrazivé plochy. Velkou nevýhodou napařených vrstev pro LTCC je jejich depozice až mezi posledními procesními kroky. Substrát je tedy třeba mít vypálený, což znemožňuje jeho další tváření. Integrace do vnitřních vrstev struktury za použití standardního procesu laminace je technologicky neproveditelná. Řešením, jak tento problém obejít, je dodatečné spojení jednotlivých částí struktury např. skelnou pájkou, tmelem apod. Celková odolnost tím však klesá. Proces zhotovení se tímto rovněž komplikuje, což zvyšuje náklady na výrobu takovéto struktury.

Z výše uvedených důvodů se zdá být výhodné využít TLV vrstvu zároveň jako vrstvu odrazivou. Odpadly by tak všechny vakuové procesy prodražující výrobu. Využily by se pouze standardní procesy pro zpracování LTCC. Vrstva by mohla být realizována jako vnější nebo vnitřní. Mezi limitující parametry se mimo hrubost substrátu přidává velikost částic v TLV pastě a její hrubost po výpalu. Jako možné řešení, jak minimalizovat hrubost povrchu pasty, je použití rezinátových past [39]. Ty však nejsou kompatibilní s LTCC, resp. nelze je zpracovávat spolu s nevypáleným substrátem. Resinátová pasta by musela být natištěna až po výpalu, čímž by nebyla možná její snadná integrace do struktury. Z tohoto důvodu nebude resinátovým pastám nadále věnována pozornost. Pro účely integrace do vnitřních vrstev je nezbytné nalézt kompatibilní tlustovrstvé pasty.

Na fotoodrazivou vrstvu vytvořenou na LTCC jsou kladeny požadavky na vysokou spekulární odrazivost. Požadavky na spektrální vlastnosti vrstvy vycházejí z vlastností optických vláken. Minimální optické ztráty jsou požadovány především na vlnových délkách $\lambda = 1310$ a 1550 nm, se kterými optická vlákna pracují [40]. Pro zajištění maximální spekulární odrazivosti musí být zajištěna co největší planarita vrstvy. Několik metod přípravy vrstvy bylo zahrnuto do hledání vhodného výrobního postupu. Vytvořené vrstvy byly měřeny pro stanovení jejich difúzní a spekulární odrazivosti,

a také hrubosti povrchu. Na základě získaných výsledků byla stanovena použitelnost jednotlivých typů vrstev v optických aplikacích.

Očekávaným výstupem této části práce bylo po zmapování možností vytvoření vnitřní fotoodrazivé vrstvy na elektricky, chemicky a tepelně odolném substrátu jednoduchým způsobem.

4.3.1 Výroba

Vzorek pro tento experiment tvořil holý LTCC substrát složený z více vrstev, na němž byla nadeponována různými způsoby fotoodrazivá vrstva. Po ošetření nadeponované vrstvy byl vzorek připraven k měření, které mělo ukázat, zda je použitá metoda vhodná pro vytváření vnitřních odrazivých vrstev jednoduchým způsobem.

Substrát pro následující experimenty byl připraven standardním procesem. Byl použit materiál Heraeus Hera Lock 2000. Základní tvar substrátu byl řezán pomocí laseru. Připravený substrát se sestával ze tří vrstev, které byly zlamínovány pomocí axiálního lisu s vyhřívanou pevnou čelistí.

Laminace byla nastavena s parametry:

- přítlak 15 kN,
- teplota 65 °C
- čas 10 min.

Substráty byly vypáleny ve vsázkové peci při 850 °C s průběhem odpovídajícím teplotnímu profilu stanovenému výrobcem. Jako standard byl použit keramický korundový substrát (Al_2O_3) z důvodu jeho dobré planarity.

Vrstvy byly nanášeny dvěma způsoby:

1) Vakuové napařování

Jako napařovaný materiál bylo použito zlato (Safina CZ 99,999 % Au). Heraeus TC-0306 tlustovrstvá pasta byla použita pro síťotisk. Použity byly korundové substráty HTCC (Ceramtec Rubalit 708S 96% Al_2O_3) a vypálená LTCC HL2000. Tloušťka napařené vrstvy byla 200 nm (Fyzikální depozice z plynné fáze - tepelné odpařování). Pro napařování vrstvy bylo využito zařízení BALZERS TCP121. Parametry napařování jsou uvedeny v tabulce 7 níže.

Tab. 7: Parametry napařování zlaté vrstvy pro odrazivou plochu.

Tlak před procesem	$2,5 \cdot 10^{-3}$ Pa
Tloušťka napařené vrstvy	205 nm
Rychlost depozice	$10 \div 20 \text{ \AA} \cdot \text{s}^{-1}$
Proud	$45 \div 50$ A
Čas depozice	98 s

2) Sítotisk

Tisk pasty Heraeus TC0306 proběhl pomocí sítotisku. Bylo použito ocelové síto (hustota síta 14 400 ok/cm²).

Vzorky byly připraveny různými postupy. Byla zkoumána závislost odrazivosti a hrubosti povrchu na způsobu přípravy vzorku (způsobu depozice a povrchové úpravě). Byly použity tyto způsoby:

- stříbrná pasta natištěná na surový LTCC substrát a vypálená bez ošetření povrchu,
- stříbrná pasta natištěná na vypálený LTCC substrát a vypálená bez ošetření povrchu,
- stříbrná pasta natištěná na leštěný vypálený LTCC substrát a vypálená bez ošetření,
- stříbrná pasta natištěná na vypálený LTCC substrát, vypálená, a po té leštěná (frézka, plstěný kotouč),
- stříbrná pasta natištěná na vypálený LTCC substrát, vypálená, a po té leštěná (leštička, smirkový papír hrubosti 2000).

4.3.2 Měření

Pro měření optických vlastností deponované vrstvy byla použita spektrometrická metoda využívající sférickou komoru. Za účelem zjištění závislosti odrazivosti na hrubosti byl využit profilometr k měření hrubosti povrchu. Na základě výsledků měření byla posuzována schopnost ftoodrazivé vrstvy odrážet světlo na požadovaných vlnových délkách. Zároveň byl podle dat z profilometru posuzován vliv leštění na planaritu vrstev.

4.3.2.1 Měření profilu povrchu deponované vrstvy

Měření profilu povrchu deponované vrstvy bylo nutné pro stanovení předpokladů pro přímé využití LTCC v optických aplikacích. K měření byl použit profilometr Bruker Dektak XT. Jedná se o kontaktní profilometr využívající k mapování povrchu stylus. Nastavení profilometru bylo stejné pro všechny měřené vzorky.

Nastavení profilometru bylo následující:

- standardní sken s rozsahem 65 μm byl zvolen s přihlédnutím k předpokládanému povrchu s vrcholy a jámami, pro které je tento mód nejvhodnější,
- byl použit stylus s poloměrem 12.5 μm ,
- rozlišení skenování < 1 μm ,
- přítlačná síla byla nastavena na 8 mg,
- délka trasy byla 2 000 μm ,

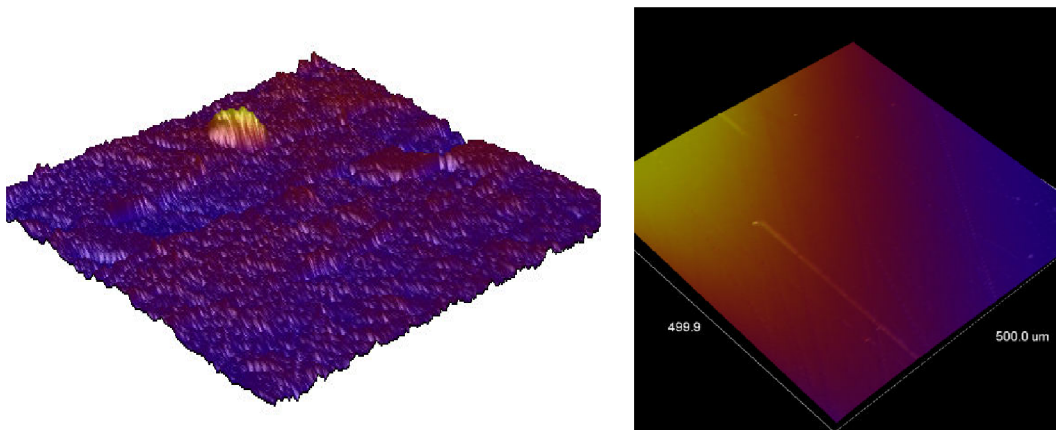
- čas na trasu 120 s [41].

Měření každého vzorku proběhlo na pěti různých trasách stylusu. Z naměřených výsledků byla vypočítána průměrná hrubost povrchu. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 8: Průměrné hodnoty hrubosti povrchu nanesených vrstev (A I-V – natištěná stříbrná pasta na korundovém substrátu; LTCC – vypálený LTCC substrát; AUI – napařená zlatá vrstva na vypáleném LTCC substrátu; AGI – natištěná stříbrná vrstva na vypálený LTCC substrát leštěná plstěným kotoučem; AG3 – natištěná stříbrná vrstva na vypálený LTCC substrát leštěná smirkovým papírem 2000;)

Vzorek	A I	A II	A III	A IV	A V	LTCC	AUI	AG I	AG3
Průměrná hrubost povrchu [μm]	1,96	0,99	1,32	1,01	1,33	1,86	1,52	1,92	0,24

Dalším krokem v analýze povrchu deponovaných vrstev byl 3D sken. Ten byl proveden na ploše vzorku o rozměrech 500 x 500 μm . Přítlačná síla stylusu byla 8 mg. Právě 3D skenem nanesené vrstvy na LTCC neleštěné a leštěné je možné popsat účinnost a rovnoměrnost ošetření povrchu. Odvíjí se od něj také nutnost zařazení povrchové úpravy do procesu výroby odrazivých vrstev pro optické aplikace. Rozlišení 3D skenu pro jednu trasu je 2 μm . Délka trvání jednoho testu byla 2 h 24 min. Výsledky 3D skenu jsou na obrázku níže.



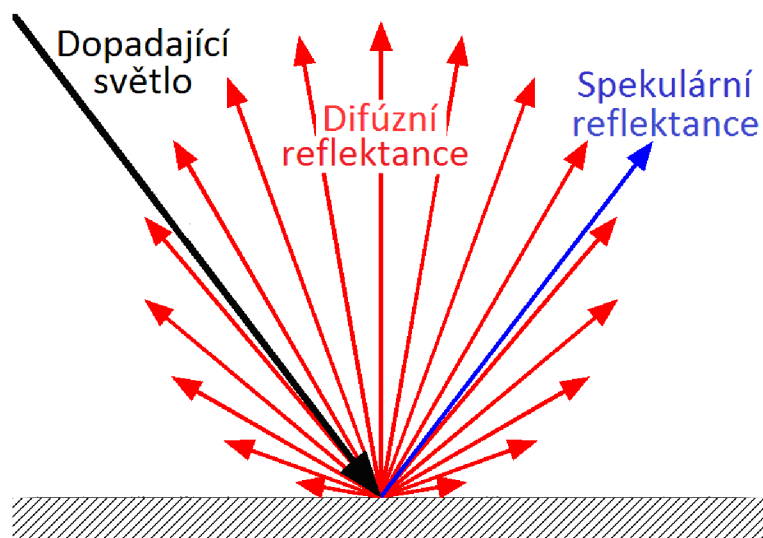
Obr. 27: Profily dvou povrchů o ploše 250 000 μm^2 (500 x 500 μm) získané 3D skenem stříbrné vrstvy na LTCC neleštěné (vlevo) a leštěné na leštičce smirkovým papírem 2000 (vpravo).

4.3.3 Měření odrazivosti

Po dopadu na odrazivý povrch se světlo odráží v podobě dvou složek – spekulární a difúzní (viz obr. 28). Spekulární, nebo-li zrcadlová či přímá, reflexe nastává u té části dopadajícího světla, která splňuje Snellův zákon - úhel odrazu je stejný jako úhel dopadu (posuzováno podle makroskopické roviny). Její intenzita závisí na úhlu dopadu,

optických (index lomu) a absorpčních vlastnostech vzorku a na morfologii povrchu. Na základě spekulárních vlastností bývají posuzovány tenké filmy materiálů nanesených na kovových podložkách a vzorky, které nemohou být měřeny na průchod nebo jinými technikami.

Difúzní složku – rozptýlenou; tvoří světlo, které se odráží pod jiným úhlem než úhlem dopadu. Tento rozptyl způsobuje struktura povrchu, která je v mikroskopickém měřítku nerovná.

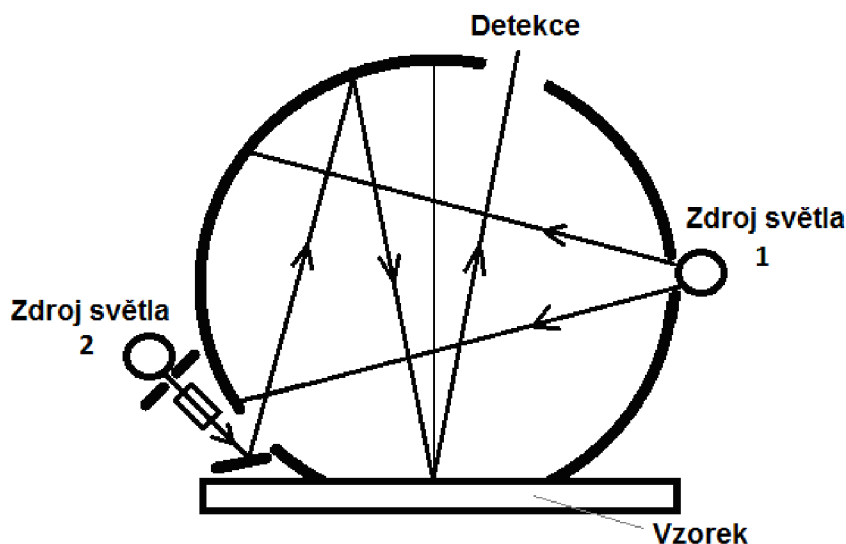


Obr. 28: Ilustrace difúzní a spekulární reflektance dopadajícího světla.

Při odrazu jsou přítomny vždy obě dvě složky světla. Pro optické aplikace je však zajímavá především složka spekulární, která nese nejvíce informací o dopadajícím paprsku světla. Její měření probíhá ve dvou fázích. K měření se využívá sférická komora. V první se měří intenzita odraženého světla se zahrnutou spekulární složkou (SCI – *Specular Component Included*). Pro měření je použit difúzní zdroj světla. Vzorek je osvětlen rovnoměrně ze všech stran. Detektor snímá pouze světlo, které se od vzorku odráží pod úhlem $< \pm 5^\circ$ vztáženému ke kolmici vztyčené od vzorku.

Ve druhé fázi je měřeno odražené světlo s vyloučenou spekulární složkou (z angl. SCE – *Specular Component Excluded*). Přímý zdroj světla ozařuje vzorek pod úhlem $< \pm 5^\circ$. Odražené světlo dopadá do světelné pasti, aby nedocházelo k dalším odrazům. Rozptýlená složka je následně detekována [42][43][44].

Měření odrazivosti nanesených vrstev proběhlo s využitím spektrometru Konica-Minolta CM 3600d. Tento spektrometr umožňuje současně měřit jak SCI, tak SCE.

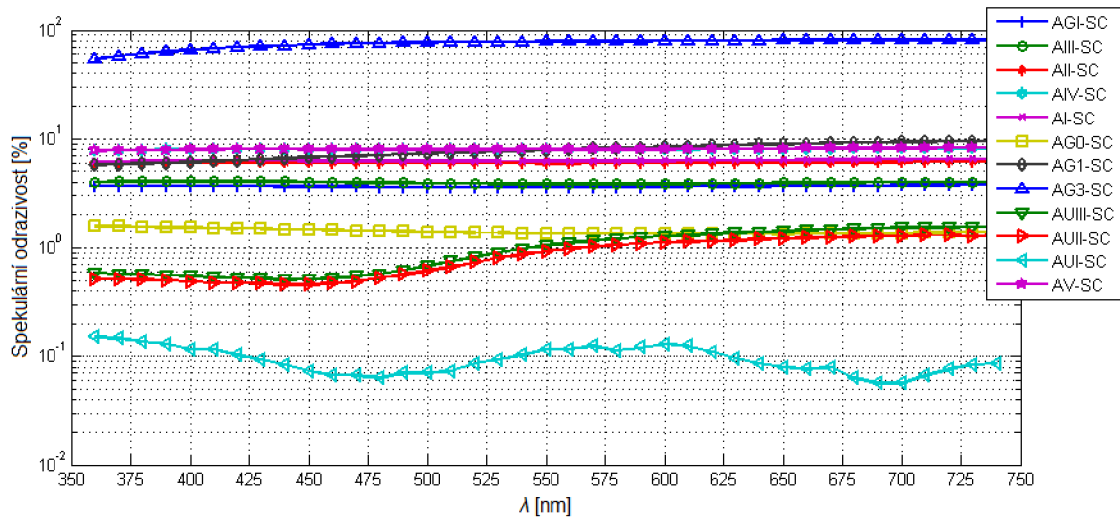


Obr. 29: Schéma paralelního měření SCI a SCE spektrometrem Konica-Minolta CM 3600d.

Spektrometr má dva zdroje světla umístěné dle schématu výše na obr. 29. Zdroj 1 je difúzní. Je spínán jedním pulsem jako první (jeden záblesk) a umožňuje měření SCI. Poté je pulsem sepnut druhý zdroj. Umožňuje numericky řídit odražené světlo. Data jsou opět získávána během záblesku zdroje (tj. množství světla na povrchu vzorku) a jsou použita pro výpočet SCE [45]. Spekulární složku odraženého světla SC (*Specular Component*) lze vypočítat podle rovnice (5):

$$SC = SCI - SCE \quad (5)$$

Rozsah pro měření odrazivosti byl nastaven <360 – 720> nm, tedy na viditelné části spektra. Vlnové délky vhodné pro vedení světla v optických vláknech nebyly měřeny z důvodu nedostupnosti zařízení. UV filtr detektoru byl nastaven na 100%. Výsledky měření jsou zobrazeny v na obrázku 30.

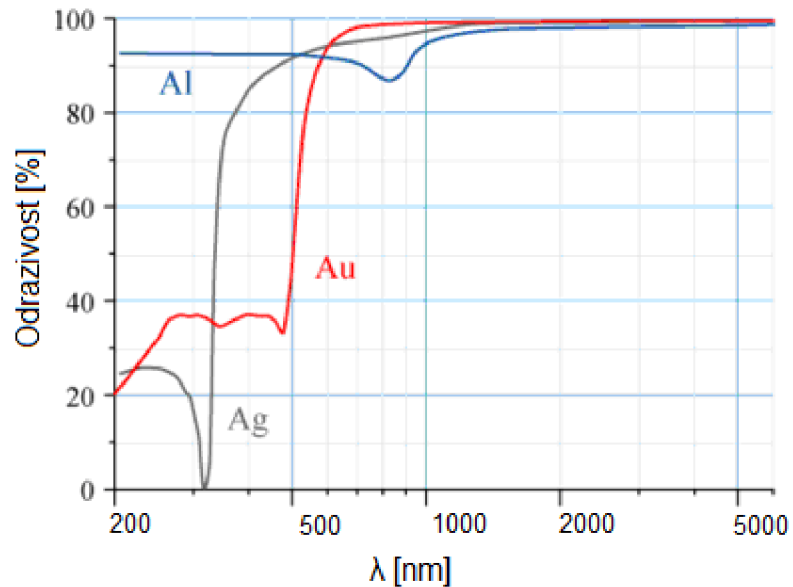


Obr. 30: Závislost spekulární odrazivosti na vlnové délce: AUI – vakuově napařená zlatá vrstva na LTCC; AUII, AUIII – vakuově napařená zlatá vrstva na korundový substrát; AGI – stříbrná pasta natištěná na LTCC; AI ÷ V – natištěná stříbrná vrstva na korundový substrát; AG0 – natištěná stříbrná vrstva na leštěnou LTCC; AG1 – natištěná stříbrná vrstva na LTCC leštěná plstěným kotoučem; AG3 – natištěná stříbrná vrstva na LTCC leštěná na leštičce smirkovým papírem 2000.

Z grafu spekulárních odrazivostí na obrázku 30 je patrný velký rozptyl dosažených výsledků. Spekulární odrazivosti se pohybují mezi 0,1 a 75 %. Minimální odrazivost pro využití odrazivé vrstvy v optických aplikacích je 50 % (pokles o 3 dB). Tuto podmínku splňuje pouze jediná kombinace materiálů a povrchové úpravy.

Nejhorších výsledků dosáhly napařené vrstvy. Jejich odrazivost se na měřeném rozsahu pohybovala přibližně do 1 %. U zlaté odrazivé vrstvy na LTCC substrátu bylo zjištěno nerovnoměrné spektrum odraženého světla (AUI). Na kratších vlnových délkách vykazovaly vzorky s napařenou zlatou vrstvou (AUII a AUIII) vyšší absorpci. Pokles intenzity odraženého světla nastával na vlnové délce 550 nm. To odpovídá obecně známému průběhu (viz obr. 31). Pokles je třeba brát v potaz při volbě operačního rozsahu vlnových délek při návrhu optických aplikací. Směrem k pracovním vlnovým délkám optických vláken lze předpokládat, že zlaté vrstvy bude možné použít. V porovnání se stříbrnými vrstvami dosahují na vlnových délkách 1310 a 1550 nm vyšší odrazivosti. Neuspokojivý výsledek pravděpodobně způsobila velká zrnitost substrátu. U vzorku AUI se mohla projevit i citlivost přístroje.

Pokles odrazivosti u stříbrných vrstev není tak výrazný jako u zlata. Porovnání vrstev leštěných a neleštěných ukazuje, že leštění výrazně zvyšuje odrazivost vzorku (AG0, AG1 a AG3). Nejlepšího výsledku dosáhl vzorek AG3 s LTCC substrátem a stříbrnou TLV vrstvou po výpalu leštěnou smirkovým papírem na leštičce. Jeho odrazivost byla přibližně 75 %. Tento způsob přípravy je jako jediný splňuje požadavky kladené na odrazivou plochu.



Obr. 31: Závíslost odrazivosti na vlnové délce pro materiály Al, Ag a Au [46].

4.3.4 Shrnutí

Bylo zkoumáno několik metod depozice a ošetření fotoodrazivé vrstvy na LTCC. Byla měřena jejich spekulární odrazivost a hrubost povrchu. Na základě výsledků lze říct, že hrubost povrchu zcela koresponduje s odrazivostí. U zlatých napařovaných vrstev má na spekulární odrazivost zásadní vliv hrubost substrátu. To se odvíjí od principu růstu vrstvy, která zcela kopíruje substrát. Pro zlepšení odrazivosti je třeba použití substrátu s hladkým povrchem, nebo do procesu přípravy vrstvy zařadit leštění.

Leštění substrátů určených pro depozici tlustovrstvých past neukázalo žádný efekt. Nejpravděpodobnějším důvodem je velikost částic obsažených v natištěné tlustovrstvé pastě, které jsou pro hrubost povrchu rozhodující. Leštění substrátu by tak mělo efekt, pokud by byla použita rezinátová pasta. Ta však není kompatibilní s LTCC procesem. Leštění povrchu plstěným kotoučem se neukázalo být účinným. Povrch odrazivé vrstvy je navíc po leštění kontaminován zbytky plsti. Nejvhodnějším způsobem ošetření povrchu odrazivé vrstvy je leštění na leštičce s jemným brusným kotoučem nebo smirkovým papírem. Pro tento experiment byl použit smirkový papír 2000. Touto metodou byla dosažena hrubost povrchu 250 nm a spekulární odrazivost 75 %. U ostatních vzorků byla hrubost větší než 1000 nm.

Spekulární odrazivost byla měřena ve viditelném spektru vlnových délek 350 ÷ 750 nm. Optická vlákna obvykle pracují na vlnových délkách $\lambda = 1310$ a 1550 nm. Pro měření spekulární odrazivosti uvedených vlnových délek nebylo k dispozici měřicí zařízení, proto nejsou zahrnuty. Stříbrné vrstvy mají vyrovnanou odrazivost na celém měřeném spektru. U napařených zlatých vrstev byl pozorován pokles spekulární odrazivosti na kratších vlnových délkách než $\lambda \approx 500$ nm. Důvodem je nárůst absorpce na těchto vlnových délkách. V aplikacích pracujících s většími vlnovými délkami je zlatou vrstvou možné použít. V porovnání se stříbrnými vrstvami na těchto délkách dosahuje lepších výsledků.

Limit průměrné spekulární odrazivosti pro senzorické aplikace byl stanoven na 50 %. Odvíjí se od poklesu intenzity světla o 3 dB, což je standardní dolní limit v optických aplikacích. Spekulární odrazivost běžných stříbrných zrcadel se pohybuje okolo 97 %.

Napařování zlaté odrazivé vrstvy se kvůli velké hrubosti substrátů pro TLV aplikace ukázalo jako nevhodné. Natištěné stříbrné vrstvy bez dalšího ošetření dosahovaly přibližně 6x lepších výsledků. Pro použití v optických aplikacích však dosahovaly nízké odrazivosti. Jako jediný dosáhl uspokojivých výsledků vzorek AG3 (vrstva leštěná na leštičce smirkovým papírem 2000). Měřená odrazivost dosáhla 75 %. Vrstvy připravené stejným způsobem jako vzorek AG3 tedy mohou být využívány v optických aplikacích LTCC pracujících se spekulárním odrazem.

Z porovnání leštěného vzorku s nejvyšší odrazivostí AG3 a neošetřených vzorků AI ÷ V a vzorku AG0 vyplývá, že rozhodujícím procesním krokem je leštění natištěné vrstvy. Neleštěné vzorky dosahovaly odrazivosti pouze 6 %. Tyto vzorky je však pravděpodobně možné použít v optických aplikacích, ve kterých figuruje difúzní odrazivost.

Jediným způsobem přípravy vnitřních odrazivých vrstev je depozice na vypálený substrát, dále vyleštění vrstvy, a poté spojení připravené vrstvy se zbytkem struktury, např. pomocí skelné pájky. Spoj odrazivé vrstvy se strukturou pak určuje celkovou odolnost kompletní struktury. Další nevýhodou je vyšší cena z důvodu vyššího počtu nutných operací. Pozitivním závěrem je, že není třeba používat vakuové způsoby depozice.

4.4 Hermetické vlastnosti aplikací realizovaných keramikou s nízkou teplotou výpalu

Tato část práce se zabývá použitím LTCC jako materiálu pro vzduchotěsné aplikace, např. senzory nebo pouzdra pro holé čipy. Pro jejich konstrukci byly vybrány dva typy LTCC substrátu - Heraeus Hera Lock 2000 a DuPont Green Tape 951PT. Pro porovnání vlastností materiálů a struktur byla využita metoda měření prostupnosti kyslíku (OTR – Oxygen Transmission Rate). Byla zkoumána také nasákavost a její velikost v závislosti na směru. Experimenty byly zaměřeny především na získání poznatků potřebných k návrhu hermetického pouzdra elektrických obvodů. Tomu odpovídaly i připravené vzorky, které měly simulovat vnitřní propojovací síť pouzdra BGA (*Ball Grid Array* – pouzdro s kulovými vývody na spodní straně) nebo LDA (*Land Grid Array* – pouzdro s pájecími ploškami na spodní straně). Byla zkoumána závislost těsnosti na tloušťce struktury, resp. na počtu vrstev; a hustotě prokovů [47].

Jak již bylo výše popsáno, LTCC je velmi variabilním materiálem umožňující vytváření 3D struktur. Kromě využití jako nosič hybridních integrovaných obvodů, LTCC přináší široké pole nekonvenčních aplikací. Díky své odolnosti bývá často používána v prostředí s nepříznivými podmínkami – vlhké či agresivní prostory nebo prostory s vysokou teplotou. Konkrétně se může jednat o nejrůznější senzory nebo fluidické aplikace jako chemické reaktory, ve kterých mohou probíhat řízené

chemické reakce. V neposlední řadě sem určitě patří keramická pouzdra pro elektrické obvody. U všech příkladů je kladen velký důraz na právě odolnost struktury. Často také hraje roli nepropustnost substrátu, resp. těsnost, zvláště pokud jsou ve struktuře integrovány citlivé elektrické prvky. V porovnání s HTCC má LTCC opět výhodu především v poměrně nenáročném vakuovém procesu, který přináší možnost plně přizpůsobit konečný výrobek konkrétním požadavkům. Díky nižší teplotě zpracování nejsou kladeny velké požadavky na vypalovací pec. Hlavní výhody keramických substrátů přesto zůstávají zachovány [48][49].

Keramika je používána pro konstrukci pouzder elektrických obvodů již dlouhou dobu. Nejčastěji se jedná o HTCC na bázi korundu (Al_2O_3). Má dobrou tepelnou vodivost. Bývá využívána ve spojení s kovy ve výkonových vzduchotěsných pouzdrech. S nástupem polovodičových součástek založených na karbidu křemíku (SiC) nebo nitridu galia (GaN), které mají teoretickou provozní teplotu až $850\text{ }^\circ\text{C}$, se v současné době věnuje keramickým nosičům zvýšená pozornost. Je to právě kvůli jejich dobré tepelné vodivosti a těsnosti, která zvyšuje životnost zapouzdřených čipů [34].

LTCC je rovněž používána v pouzdření. Umožňuje snadnější zpracování, a zejména tvarování. Ve srovnání s aluminou má LTCC výhodu v možnosti integrovat vodivý motiv a pasivní obvodové prvky přímo do struktury. Tím dojde ke zvýšení hustoty integrace, resp. efektivity pouzdření. Pouzdro může obsahovat prvky, které nebylo možné integrovat přímo na čip (např. rezistory s vyšší proudovou zatížitelností), a zároveň není nutné použití dalších součástek na desce plošného spoje, na kterou je pouzdro osazeno. Do pouzdra je rovněž možné integrovat další struktury, jako jsou chladičí prokovy, kanálky pro chlazení kapalinou, stínění, antény apod. Teoreticky lze konstruovat pouzdra bezvývodová, např. pro RFID aplikace. Keramická pouzdra na bázi LTCC by měla být schopná nalézt využití v aplikacích s vyššími nároky na spolehlivost a odolnost (senzory, automobilový průmysl, lékařství nebo kosmonautika) [50].

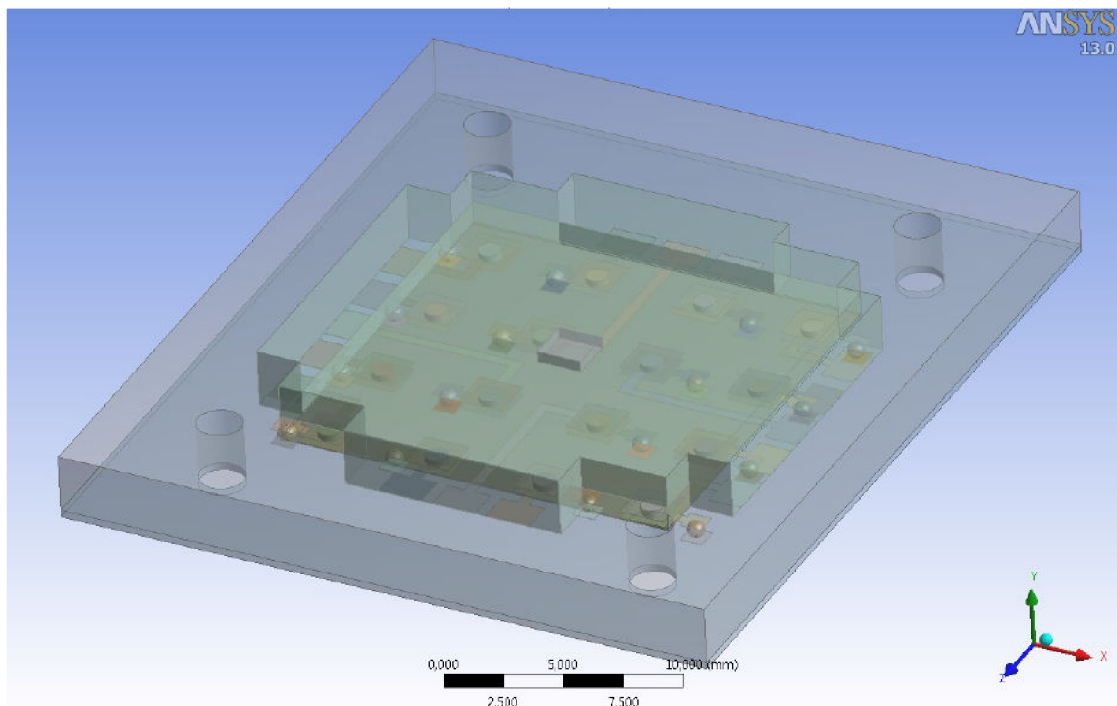
Současná vzduchotěsná pouzdra jsou dostupná obvykle v kovovém provedení nebo s HTCC nosičem a kovovým krytem. LTCC substráty jsou také používány. Jedná se však většinou o vícevrstvé HIO zalité zcela nebo z části pouzdřicí hmotou nebo s kovovým nebo se skleněným krytem [51][52][53].

Následující experimenty byly provedeny právě proto, že není známo, zda je možné pro konstrukci vzduchotěsných pouzder využít na Ústavu mikroelektroniky používanou LTCC Heraeus Hera Lock 2000 [50]. Pro porovnání byla do experimentů zařazena rovněž keramika DuPont Green Tape 951PT (GT), která patří obecně mezi nejčastěji používané substráty. Protože použitím více materiálů při konstrukci pouzdra dochází k vnášení méně odolných částí, zamýšlené pouzdro mělo být navrženo bez využití dalších konstrukčních materiálů. Výzkum byl směřován především k vytvoření pouzdra pro polovodičové součástky SiC, které mají vysokou provozní teplotu. Za použití více materiálů by byl návrh složitější o zahrnutí pnutí vlivem různé délkové teplotní

roztlačnosti. Materiály s podobou roztlačností jako LTCC by zároveň nesměly mít nižší provozní teplotu.

Pro návrh LTCC pouzdra je nutné vzít v úvahu několik skutečností plynoucích ze způsobu vytváření struktur. LTCC je amorfni a měla by tak mít stejné vlastnosti, resp. stejnou těsnost, ve všech směrech. To ale nemusí platit, pokud jsou listy substrátu slaminovány do struktury. Lze předpokládat různou těsnost ve směru kolmém na plochu struktury a ve směru kolmém na hranu. Tento předpoklad vyplývá z předchozích experimentů (v kapitole 4.1.2.5), ve kterých byly zhotoveny mikrovýbrusy LTCC struktur. Na nich jsou pod mikroskopem patrná místa, kde došlo ke spojení listů substrátu. Právě v místě spojení je očekávána menší těsnost. Ta se bude odvíjet i od kvality laminace [54].

Protože se tento experiment zabývá aplikací LTCC v pouzdření, je nutné brát zřetel také na propojení vnitřní propojovací struktury pouzdra s jeho vývody, které může mít rovněž zásadní vliv na výslednou těsnost pouzdra. Existuje mnoho různých způsobů, jak lze spojit pouzdro se substrátem. Zejména kvůli zvyšující se hustotě integrace a velkému počtu vývodů bude věnována pozornost pouze typům vývodů, které jsou na spodní straně pouzder, a to BGA nebo LGA. Opět je předpokládáno, že propojení vnitřních vrstev s vývody je nejslabším článkem vzduchotěsné soustavy. Hustota těchto propojů je pravděpodobně nepřímo úměrná výsledné vzduchotěsnosti. Hustota prokovů a rovněž jejich kvalita proto byla zkoumána. Výsledky pro LTCC HL2000 a GT jsou porovnány [55].



Obr. 32: Příklad pouzdra tvořeného LTCC s vnitřní propojovací strukturou a BGA vývody [50].

4.4.1 Senzorické aplikace využívající LTCC membránu

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, na LTCC lze vytvářet rovněž senzory. Senzory nejčastěji obsahují speciální vrstvu s měřeným proměnným parametrem. Tento princip je společný se senzory realizovanými na HTCC. Díky širším možnostem vytváření složitějších struktur LTCC umožňuje realizaci tenkých membrán. Jejich tloušťka se odvíjí od tloušťky základního substrátu, tedy v řádu 100 μm . Membrány jsou velmi často používány pro měření tlaku. Membrána se působením tlaku prohýbá, a tato změna je měřena. Vyhodnocení změny je pak založeno na mnoha různých principech (např. na kapacitním, piezo-rezistivním, optickém a další).

Základními parametry membrány jsou plocha, tvar a tuhost. Tuhost membrány se odvíjí od její tloušťky a vlastností materiálu. Důležitý je zejména Youngův modul a Poissonova konstanta.

Průhyb ve středu kruhové membrány je dán následujícím vztahem 6:

$$d = p_{dif} \frac{3 \cdot r^4 \cdot (1 - \gamma^2)}{16 \cdot E \cdot t^3}, \quad (6)$$

kde d [m] je průhyb membrány (také diafragmy) v jejím středu, p_{dif} [Pa] je diferenční tlak, r [m] je poloměr membrány, γ [-] je Poissonova konstanta, E [Pa] je Youngův modul pružnosti a t [m] je tloušťka membrány.

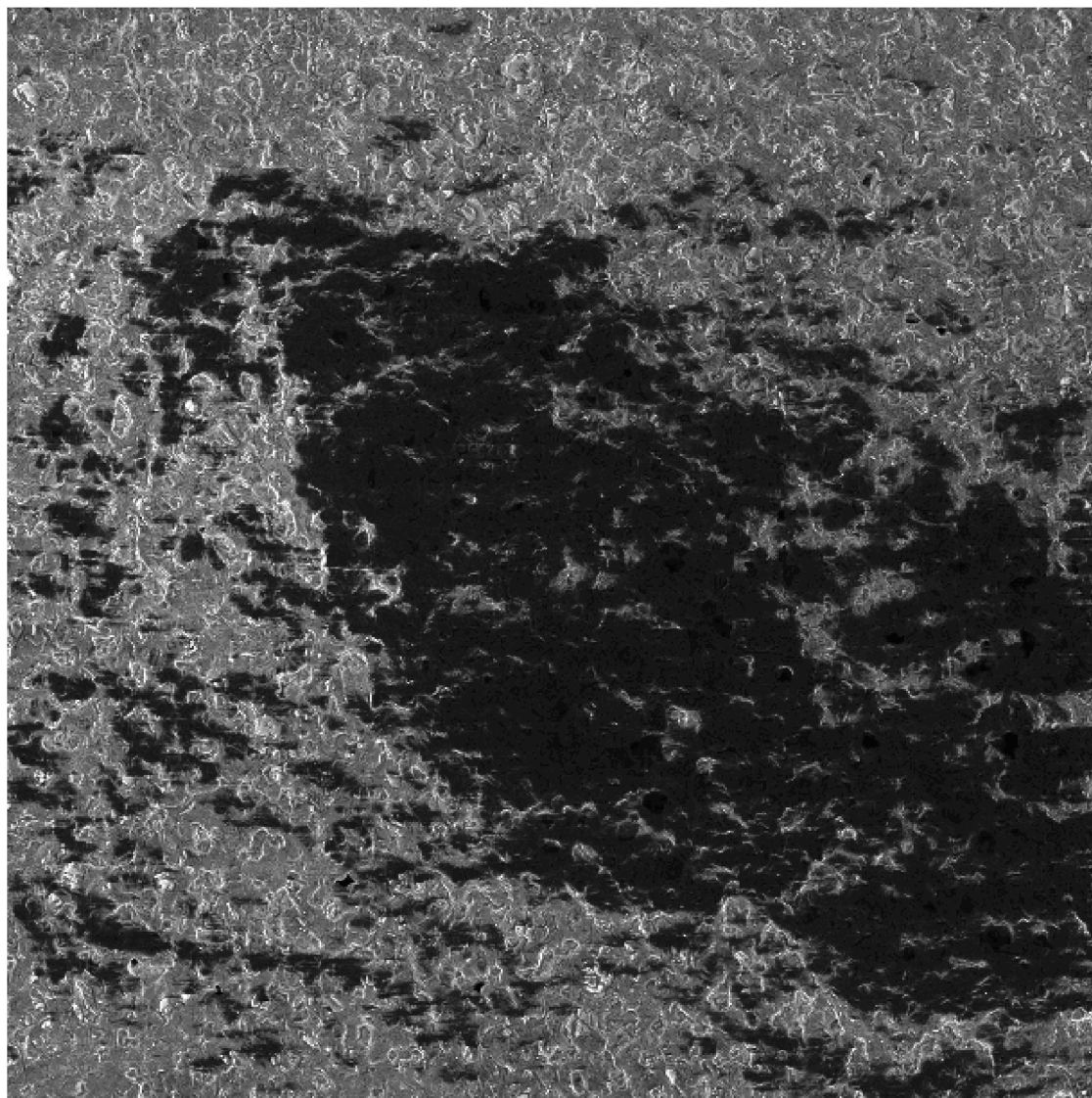
Pro vyšší senzitivitu tlakového senzoru je možné měnit vlastnosti materiálu nebo tloušťku membrány. Není možné libovolně měnit materiál LTCC, proto je schůdnější variantou nastavovat citlivost membrány pomocí její tloušťky. To je možné výběrem z řady tlouštěk pro daný typ, nebo dodatečným zbroušením. Nicméně, s menší tloušťkou membrány se snižuje její těsnost, resp. zvyšuje se únik/průsak membránou. Přesná dlouhodobá měření potom nejsou možná. Dochází totiž k vyrovnání tlaků v prostorech, které membrána odděluje. Klesá rovněž její citlivost – rozpoznatelnější jsou rychlejší změny rozdílů tlaků.


V minulosti byly provedeny experimenty se vzduchovými senzory tlaku postavené na uzavřené kavitě s tenkou membránou. Tyto experimenty ukázaly potřebu vzduchotěsného provedení. Toho lze dosáhnout právě zesílením membrány nebo použitím jiného materiálu. Membrána tloušťky 200 μm tvořená dvěma vrstvami LTCC se ukázala pro měření nevyhovující. Docházelo totiž k postupnému vyrovnání tlaku v dutině s okolím. Znalost minimální tloušťky LTCC membrány, při které je ještě vzduchotěsná, je tedy zásadní pro návrh tohoto typu senzoru a jeho dalších částí [56].

4.4.2 Struktura použitých substrátů

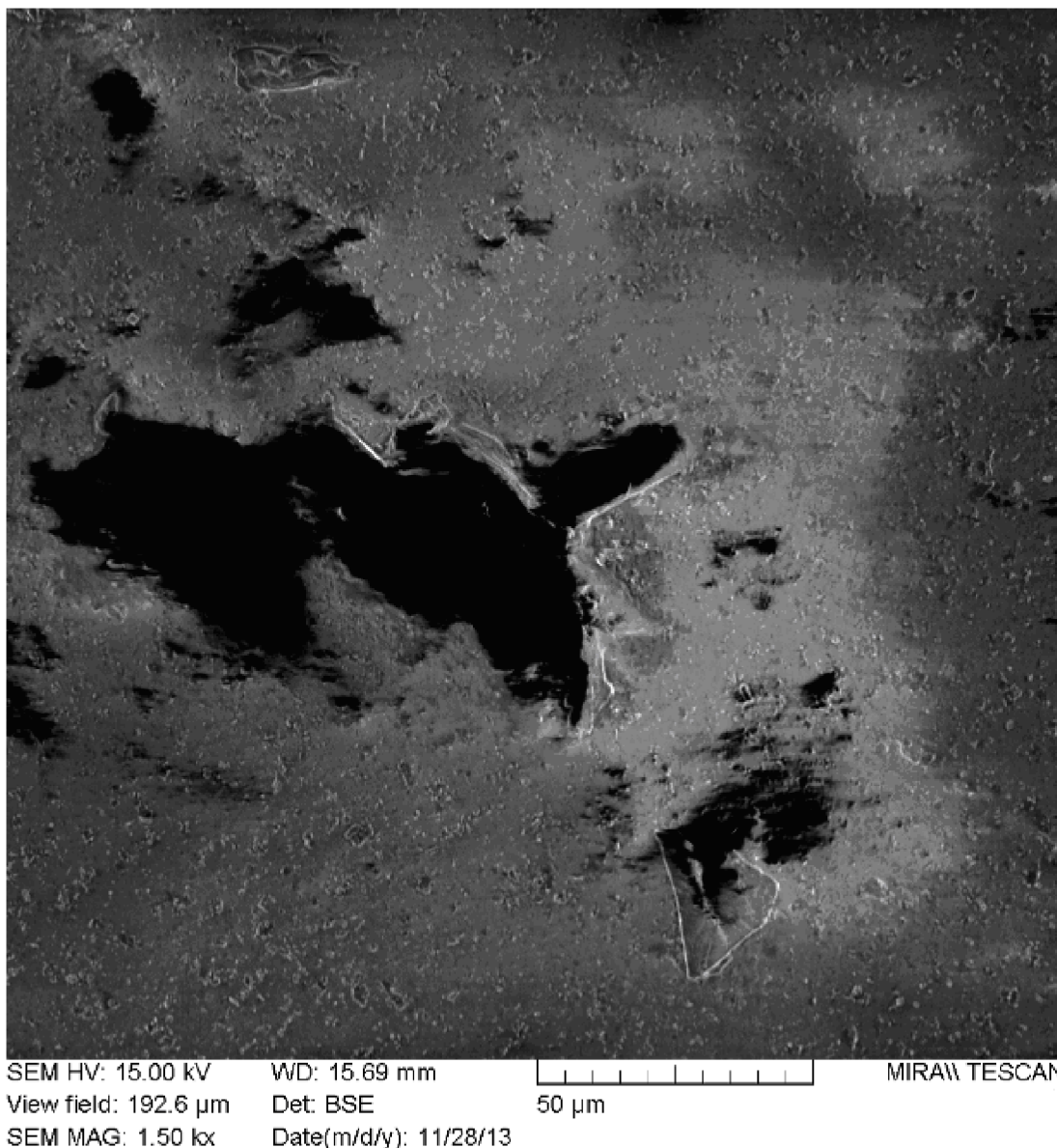
Na obrázcích 33 a 34 je porovnán povrch LTCC Hera Lock 2000 a často využívané LTCC DuPont Green Tape 951. K pořízení snímků byl použit skenovací elektronový mikroskop Tescan Mira II. LMV s EDX a WDX detektory pro materiálovou charakterizaci vzorků. Je očividné, že se struktura povrchu obou keramik liší, a je pravděpodobné, že jejich vzduchotěsnost se bude rovněž lišit. Při bližším zkoumání

byly na povrchu HL200 objeveny póry, u kterých je předpoklad, že přispívají k průsaku. Jejich hloubka však nepřekročila 2 μm a všechny nalezené byly „slepé“. Detailnější srovnání obou keramik může být předmětem dalšího výzkumu.



SEM HV: 15.00 kV WD: 18.21 mm  MIRA\\ TESCAN
View field: 192.6 μm Det: BSE 50 μm
SEM MAG: 1.50 kx Date(m/d/y): 11/29/13

Obr. 33: Snímek povrchu použité LTCC Heraeus Hera Lock 2000 pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.



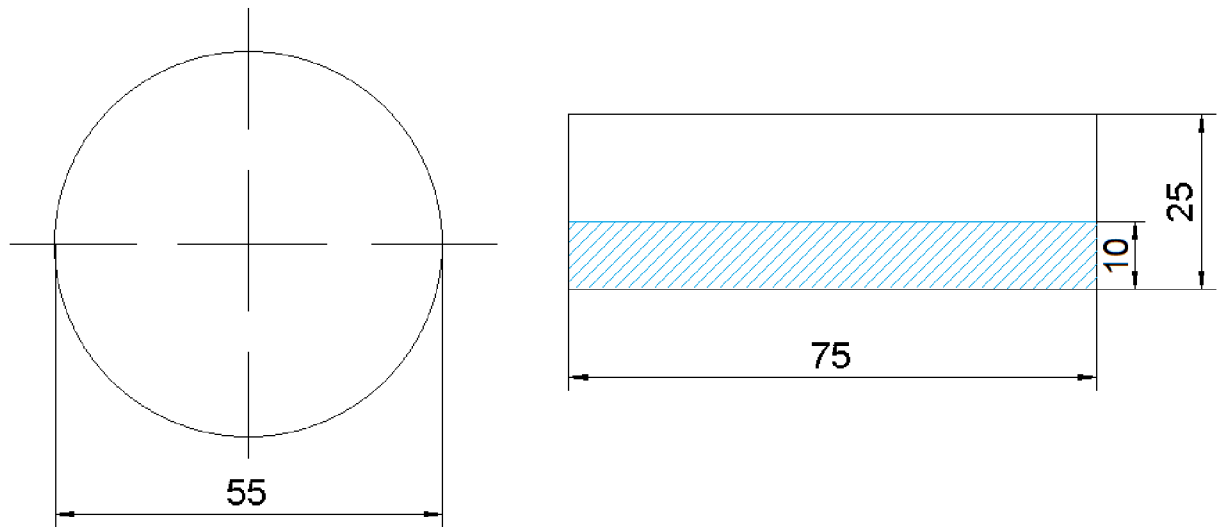
Obr. 34: Snímek povrchu LTCC DuPont Green Tape 951 pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.

4.4.3 Návrh a příprava vzorku

Vzorek pro stanovení prostupnosti kyslíku v závislosti na počtu vrstev byl navržen tak, aby mohl být umístěn do měřicí aparatury a zároveň docházelo k co nejmenším únikům. Vzorek byl navržen kruhový s průměrem 55 mm. To byl maximální možný rozměr pro dokonalé usazení vzorku do těsnění. Byla použita aparatura sloužící zejména k měření OTR fólií. Počet vrstev připravených vzorků se odvíjel od možností aparatury. Byl zvolen $1 \div 4$ (tzn. až $4 \times 100 \mu\text{m}$).

Vzorky pro měření absorpční kapacity byly navrženy s přihlédnutím k eliminaci nežádoucích vlivů. Byl zkoumán průsak napříč a mezi vrstvami LTCC. Vzorky tedy byly navrženy dlouhé, aby se nemohl projevit průsak bočními hranami,

ale uplatňoval se pouze ten nejdelší hranou. Aby byl pozorovatelný průsak povrchem, vzorek byl tvořen šesti vrstvami ($6 \times 100 \mu\text{m}$).

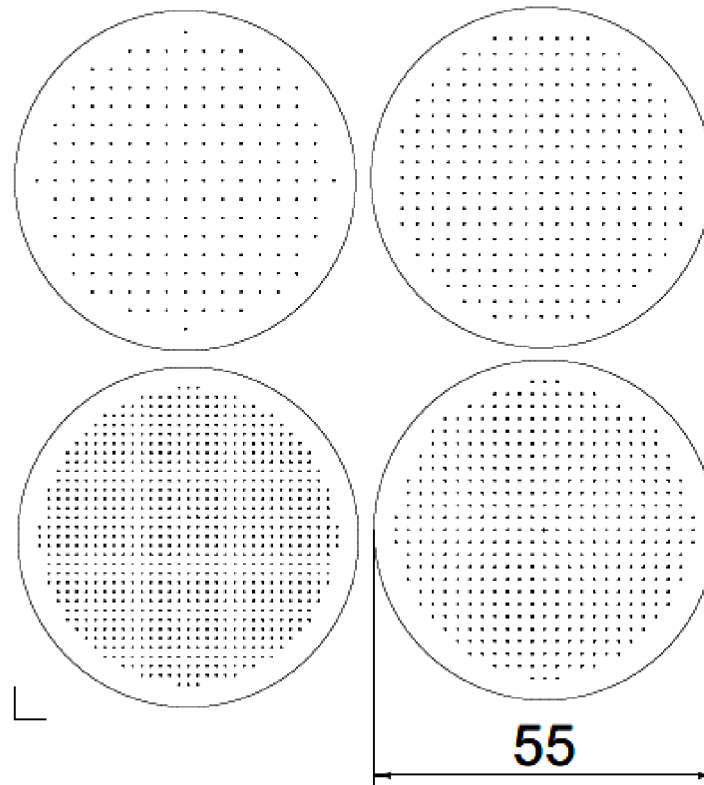


Obr. 35: Nalevo – vzorek pro měření OTR ($1 \div 4$ vrstvy), napravo – vzorek pro měření průsaku vzorkem s vyznačenou linií ponoření (6 vrstev) [mm].

Výše popisované vzorky byly připraveny standardním způsobem dle doporučení výrobce. První technologická operace bylo řezání. Pro tyto účely byl použit trimovací laser Aurel ALS 300 Nd-YAG. Po řezání byly jednotlivé vrstvy zlamínovány na axiálním lisu s vyhřívanou spodní čelistí při tlaku 15 kN a teplotě 60 °C. Výpal proběhl ve vsázkové peci LAC LMH C7/12 při teplotě 850 °C s doporučeným teplotním profilem.

Pro ověření vzduchotěsnosti nejkritičtějších částí pouzdra, tzn. s terminály vnitřní vodivé struktury, byly navrženy vzorky s různou hustotou prokovů uspořádaných po vzoru BGA nebo LGA pouzder. Průměr prokovů byl zvolen dle doporučení výrobce substrátu 0,25 mm. Doporučený rozestup mezi prokovy, resp. otvory, je min. 1 mm. Prokovy proto byly rozmístěny s krokem 1,5; 2,0; 2,5 a 3,0 mm. Hustota prokovů na vzorku tedy byla 49, 36, 25 a 16 prokovů/cm².

Rozměry a tvar vzorku byly taktéž určeny měřicí aparaturou. Vzorek byl rovněž realizován kulatý s průměrem 55 mm. Počet vrstev se odvíjel od výsledků měření provedeného první v pořadí – měření propustnosti přes stěnu LTCC. Jeho výsledky ukázaly zanedbatelný průsak přes vzorek tvořený čtyřmi vrstvami. Proto i pro tento experiment byly použity čtyřvrstvé vzorky, a to zejména kvůli eliminování chyby způsobené průsakem samotným substrátem. Dále také kvůli vyšší mechanické odolnosti. Měření podle očekávání mělo ukázat pouze netěsnost prokovů. Byl použit substrát HL2000 a Green Tape, u kterého bylo v návrhu nutné přihlížet ke smrštivosti v osách x a y během výpalu – vzorky byly tedy navrženy větší.



Obr. 36: Návrh vzorků pro měření těsnosti pole prokův s hustotami 49, 36, 25 a 16 prokův/cm². Průměr uveden v [mm].

Příprava vzorku zahrnovala standardní proces zpracování LTCC. Nevypálená keramika byla nařezána laserem do požadovaného tvaru. Řezání keramiky zahrnovalo i řezání prokův s požadovaným konečným průměrem 250 μm. Tvar prokův dále nebyl upravován dalším procesem.

Pro plnění prokův byla použita plastová šablona – mylarová fólie s tloušťkou 127 μm. Z důvodu nestandardních rozměrů šablony proběhlo plnění na ručním šablonotisku. Použitá těrka byla zbrušena pod úhlem 60°. Po vyplnění otvorů následovalo zasušení na teplotě 80 °C, resp. 125 °C, v závislosti na typu keramiky.

Seskládání jednotlivých vrstev substrátu a následující laminace je kritickou částí procesu zhotovení vzorku. Pro sesouhlasení vrstev během laminace byly využity dva vybrané prokovy jako technologické otvory. Kvůli tvaru a rozměrům vzorku bylo přesto obtížné dosáhnout dostatečného sesouhlasení v podélném směru i natočení. Chyba sesouhlasení pomocí technologických otvorů pro sesouhlasení, resp. skládání substrátů na trn, je obvykle přibližně 0,2 mm. Vzhledem k rozměrům prokův (0,25 mm) by to byla významná chyba. Pro její minimalizování byla použita metoda postupné laminace, a právě využití dvou prokův. Umístění těchto prokův bylo zvoleno tak, aby byly co nejvíce u okraje substrátu. Tato oblast je po umístění vzorku do měřicí aparatury překrytá těsněním, což minimalizuje chybu měření způsobenou dodatečným, tedy nestandardním, vyplněním. Sesouhlasení probíhalo

opticky. Po dokončení postupné laminace byly otvory využité k sesouhlasení vrstev dodatečně vyplněny pastou a zasušeny.

Po dokončení postupné laminace a vyplnění zbylých prokovů následovala laminace celé struktury. Laminace každého vzorku proběhla při teplotě 55 °C a tlaku 150 kN po 10 min.

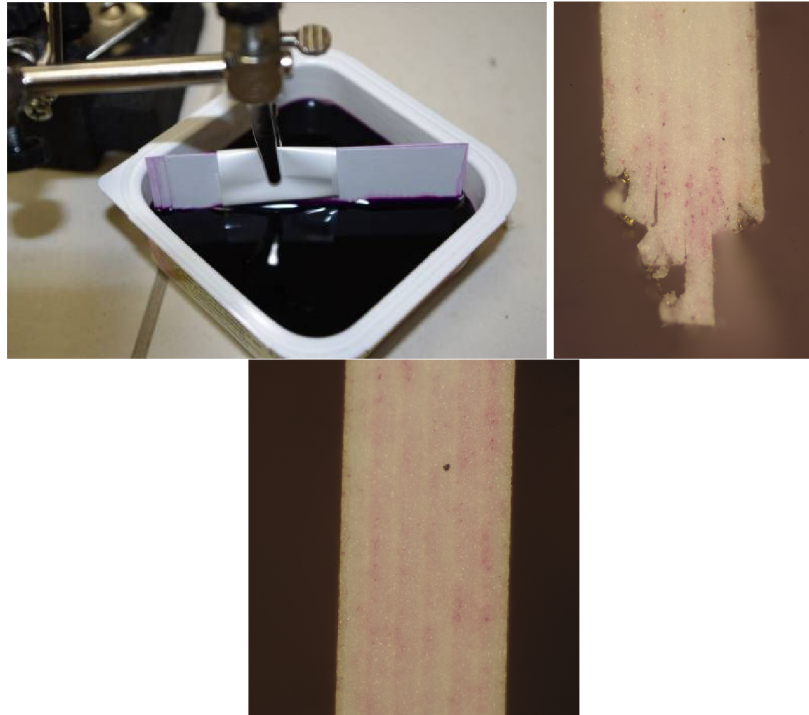
Zlaminované vzorky byly z důvodu zachování rovinnosti během výpalu umístěny na substrát Al_2O_3 a vypáleny ve vsázkové peci dle odpovídajícího teplotního profilu doporučeným výrobcem daného substrátu.

4.4.4 Měření nasákavosti

Pro měření propustnosti kyslíku mezi vrstvami LTCC mezi vrstvami v dostupné aparatuře by byl třeba velice tenký vzorek tvořený velmi mnoha vrstvami. Příprava vzorku by byla velice pracná a drahá. Dostupná technologie neumožňuje laminování tenkých pásků LTCC (přibližně 550 vrstev pro dosažení požadovaných rozměrů). Řezání vzorků z většího celku by kladlo velké nároky na přesnost. Rovněž by byly vysoké náklady na materiál. Pravděpodobně by také docházelo ke vzniku defektů ve struktuře vzorku, a tím ke zkreslení měření. Proto byl navržen druhý experiment, který měl za úkol popsat nasákavost keramiky plochou substrátu a mezi vrstvami a porovnat je. Bylo předpokládáno, že poměr nasákavostí v obou zmíněných směrech je přímo úměrný propustnosti kyslíku. Zároveň byl předpoklad, že se nasákavost v těchto směrech bude lišit. Pro snadné vyhodnocení byl k měření nasákavosti použit vodný roztok manganistanu draselného. Nasákavost byla vyhodnocena opticky.

4.4.5 Popis měření nasákavosti LTCC keramiky

Každý vzorek byl ponořen do roztoku (10 mm) po definovaný čas. Následně byl podle osy kolmé k nejdelší straně naryhován diamantovým hrotem a rozlomen přibližně vprostřed své délky. Hloubka průsaku napříč a mezi vrstvami byla zkoumána opticky na lomu.



Obr. 37: Zleva: Soustava pro měření nasákavosti; nasákavost mezi nedokonalě sesouhlasenými vrstvami po 30 min.; nasákavost mezi vrstvami do ponořeného objemu LTCC substrátu po 24 hod.

4.4.6 Diskuse výsledků měření nasákavosti

Nedokonalé sesouhlasení vrstev (až $\pm 0,2$ mm) během laminace vedlo ke vzlínání roztoku po hranách vzorku. Barevná stopa tak byla patrná po obvodu celého vzorku. Roztok prosakuje i do nesmočených částí zlamínované struktury.

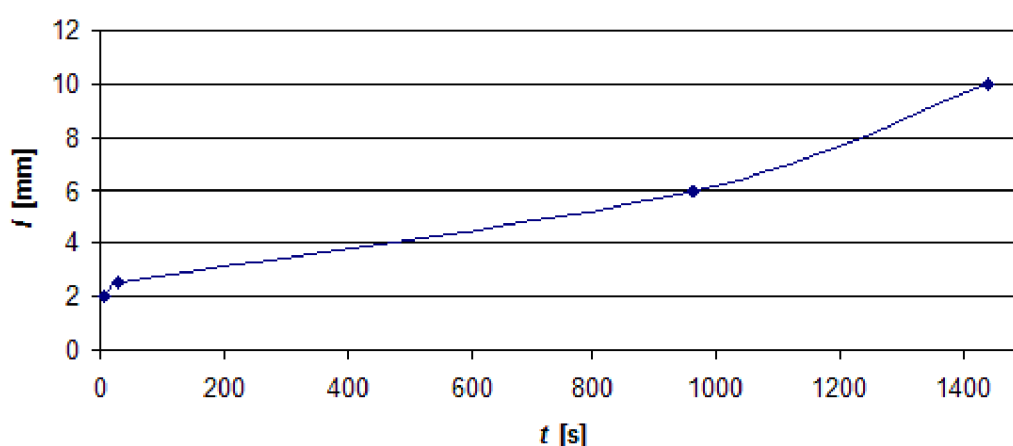
Toto měření potvrdilo domněnku, že průsak mezi vrstvami je mnohem významnější než skrz ně. To je patrné na obrázku 37, který ukazuje ponořenou část vzorku po 24 hod. Roztok navzlínal mezi vrstvami celou ponořenou částí vzorku (10 mm). Na druhé straně, pouze první krajní vrstva prosákla „skrz stěnu“ (hloubka průsaku přibližně 0,1 mm). Pro krátké doby ponoření nebyl pozorován žádný průsak napříč vrstvami.

Kvalita laminace hraje z pohledu nasákavosti významnou roli. Během přípravy vzorku bylo použito standardní nastavení procesu (teplota 55 °C, tlak 150 kN a čas 10 min.). Je pravděpodobné, že pro jiné nastavení parametrů laminace by byla nasákavost jiná [15]. Dosažené výsledky jsou tabulce 9. Vynesená závislost nasákavosti na čase je na obr. 38.

Tab. 9: Průsak manganistanu draselného do vícevrstvé struktury LTCC Hera Lock 2000.

Doba ponoření [min.]	Vzdálenost průsaku mezi vrstvami [mm]	Vzdálenost průsaku skrz vrstvi [mm]
5	2,0	-
30	2,5	-
960 (16 h)	6,0	0,07
1440 (24 h)	10,0	0,10

Průsak mezi vrstvami LTCC struktury



Obr. 38: Průsak manganistanu draselného do vícevrstvé struktury LTCC Hera Lock 2000.

4.4.7 Měření propustnosti kyslíku substrátem LTCC

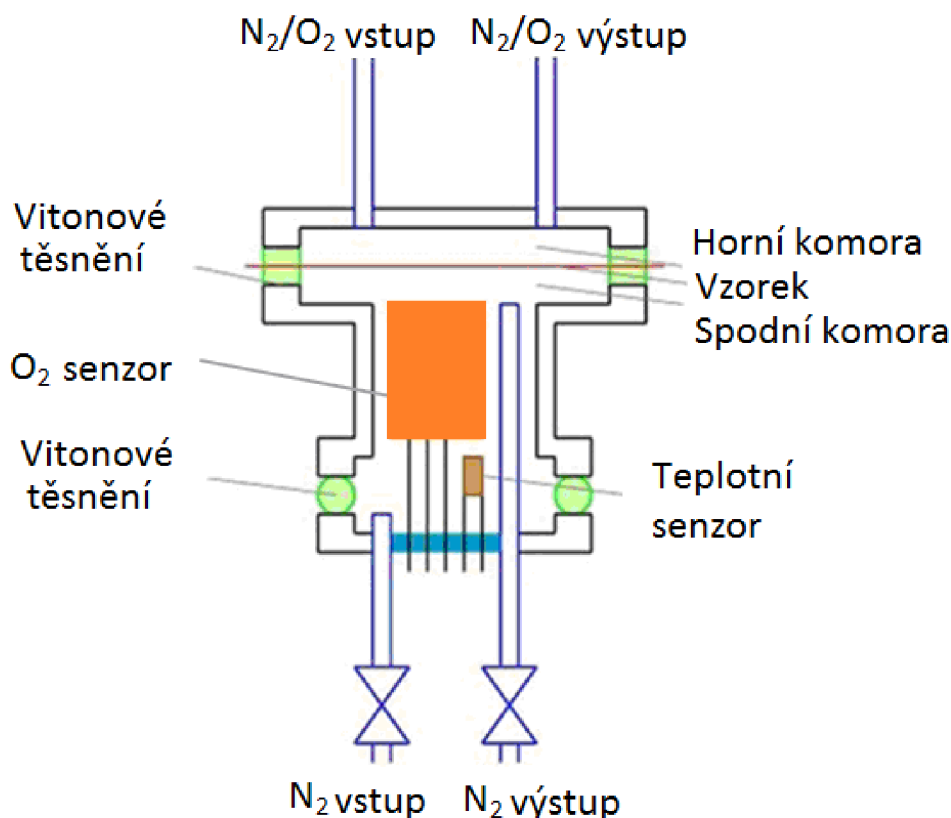
LTCC je obvykle popisována jako vzduchotěsný materiál, ale protože existuje velké množství typů LTCC s různými parametry, tloušťkou a strukturou, je těžké definovat vzduchotěsnost obecně. Na těsnosti se podílí rovněž návrh a provedení struktury. Vypálený substrát LTCC je různě těsný ve směru kolmém na plochu substrátu a mezi vrstvami. Pro použitý substrát HL2000 těsnost zatím nebyla definována. Provedené experimenty měly za úkol těsnost HL2000 kvantifikovat.

Existuje několik metod sloužících ke stanovení propustnosti materiálu plyny. Propustnost vodní páry (WVTR – *Water Vapour Transmission Rate*) a propustnost kyslíku (OTR – *Oxide Transmission Rate*) jsou metody rozšířené v mnoha průmyslových odvětvích. Jsou používány především pro zkoušky těsnosti balících materiálů ve farmacii [57] a potravinovém průmyslu [58]. Pouzdra pro elektronické součástky jsou rovněž testována těmito metodami [59]. Propustnost oxidu uhličitého (COTR – *Carbon Dioxide Transmission Rate*) je využívána zejména v potravinářském průmyslu [60].

Měření propustnosti kyslíku je základní technikou sloužící k popisu vlastností bariéry. Kyslík tvoří poměrně malé dvojatomární molekuly schopné prostupovat mnohými materiály. Proto se těsnost vůči kyslíku a její stanovení stalo velmi důležitým hlediskem. Nejvíce se takto testují fólie nebo jiné ploché vzorky.

Samotné měření OTR je založeno na jednoduchém principu – vzorek je vložen do testovací buňky, kde tvoří přepážku mezi dvěma komorami. Jedna strana vzorku je vystavena definovanému proudu kyslíku, na druhé straně je potom měřena koncentrace prosáknutějšího kyslíku. Z hodnoty naměřené koncentrace, plochy vzorku vystavené kyslíku a tlaku je následně vypočítáno OTR.

Měření v použité aparatuře je založeno na měření průsaku kyslíku do dusíkové atmosféry přes vzorek představující bariéru. Dusík je použit proto, aby byl na obou stranách bariéry stejný tlak a neprojevoval se jiný mechanismus toku kyslíku, než vlivem koncentračního spádu. Schéma měřicí komory je znázorněno na obrázku 39 níže.



Obr. 39: Schéma aparatury pro měření propustnosti kyslíku [55].

Měření probíhá následujícím způsobem. Nejprve jsou obě komory oddělené vzorkem promyty dusíkem. Dále je na jednu stranu vzorku přiváděn konstantní tok kyslíku (horní komora). S využitím detektoru kyslíku ve druhé komoře s dusíkovou atmosférou je možné detekovat kyslíkové molekuly procházející vzorkem. Výsledek měření je vypočítán z objemu kyslíku, který přešel přes bariéru vzorku o dané ploše při daném tlaku a za daný čas.

4.4.8 Průběh měření OTR substrátu LTCC

Obrázek 39 ukazuje schéma experimentálního zařízení pro měření OTR. Vzorek je umístěn do testovací komory, čímž ji rozdělí na dvě části – horní a spodní. V první fázi měření jsou obě části komory proplachovány čistým dusíkem (99,999 %), aby byl veškerý kyslík vyfouknut ven. Poté je spodní část uzavřena. Dusík nadále proudí kolem vzorku po tři hodiny. Následuje stanovení koncentrace kyslíku v procentech, čímž je stanovena výchozí hodnota. Tato hodnota se odvíjí od průsaků, které zkreslují měření. Po třech hodinách jsou obě části komory znovu vypláchnuty čistým dusíkem. Spodní komora je opět uzavřena a další hodinu kolem vzorku nadále proudí dusík. Poté je nahrazen čistým kyslíkem (99,999 %), který kolem vzorku proudí další dvě hodiny. Celkové množství kyslíku, který prosákl vzorkem, je měřeno kontinuálně jako funkce času. Z tangenty vzniklé lineární závislosti je následně vypočítán OTR dle vztahu 7:

$$OTR = \frac{k \cdot V}{100\% \cdot A \cdot p} \left[\frac{cm^3}{m^2 \cdot atm \cdot den} \right], \quad (7)$$

kde k je tangenta ke křivce koncentrace kyslíku, V je objem spodní části komory, A je plocha vzorku vystavená proudu kyslíku a p je tlak kyslíku.

4.4.9 Diskuse výsledků měření OTR substrátu LTCC

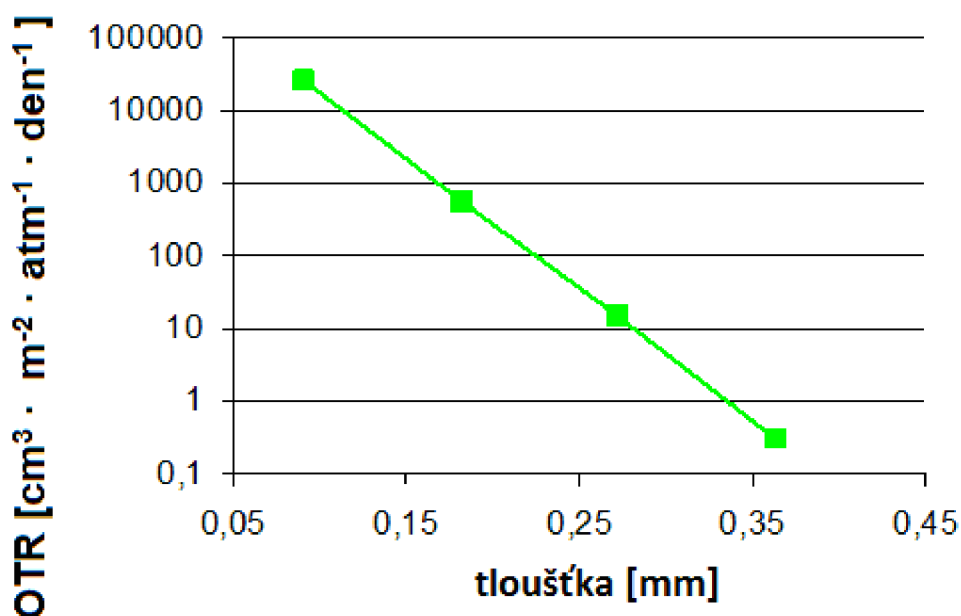
Byly testovány vzorky s různým počtem vrstev (1 ÷ 4). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10. Hodnoty jsou aritmetickým průměrem výsledků měření čtyř vzorků. Obrázek 40 ukazuje závislost OTR na počtu vrstev. Zjištěná závislost je exponenciální. Pro větší přehlednost byla linearizována použitím logaritmického měřítka na ose y (OTR). Výsledky měření pro jednovrstvé a dvouvrstvé vzorky byly neuspokojivé. Vytvořená bariéra je tenká. Je možné, že se na nízké těsnosti podílejí i defekty v substrátu. Na základě analýzy povrchu pomocí elektronového mikroskopu nelze vyloučit, že se v materiálu objevují i póry hlubší než nalezené.

Tab. 10: Výsledky měření OTR LTCC substrátu Heraeus Hera Lock 2000 (neověřený odhad podle trendu šedou barvou).

Počet vrstev	1	2	3	4	5	6
OTR [$cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$]	26045	541	14,85	0,3	0,006	0,0001

Vzorky tvořené třemi nebo čtyřmi vrstvami dosahují uspokojivých výsledků. Pro srovnání, u potravinářské PET fólie s tloušťkou 20 μm se OTR pohybuje okolo $40 cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$, u parylenu C, který se používá v elektrotechnice jako ochranná vrstva, je OTR stanoveno na $2.8 \cdot 10^{-3} cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$ [54]. Přidání každé další vrstvy snižuje propustnost kyslíku o 1,5 řádu. Ze získané závislosti lze stanovit OTR pro vícevrstvé vzorky: pětivrstvý vzorek $6 \cdot 10^{-3} cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$, šestivrstvý vzorek přibližně $1 \cdot 10^{-4} cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$ atd. Bohužel, použitá

měřící aparatura nedovoluje měřit propustnosti menší než $0.1 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$. OTR vícevrstvých vzorků tedy nebylo ověřováno. Přesnější měření by vyžadovalo citlivější kyslíkový senzor.



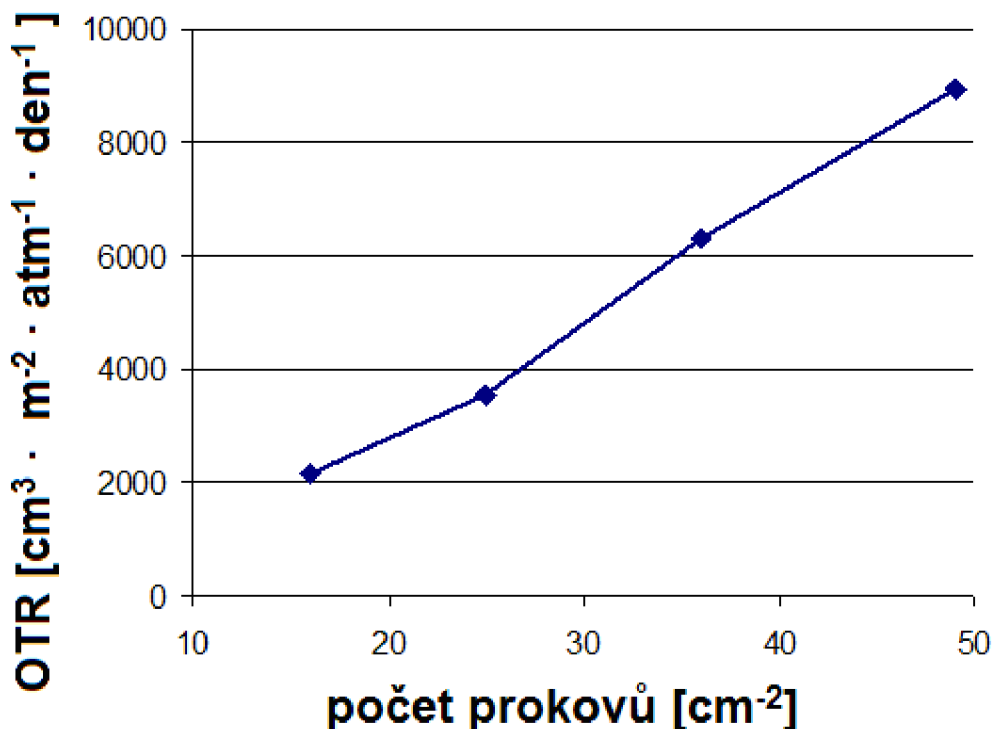
Obr. 40: Závislost propustnosti kyslíku (OTR) na počtu vrstev základního substrátu LTCC Hera Lock 2000 tvořícího vzorek.

4.4.10 Měření závislosti OTR na hustotě prokovů v LTCC substrátu

Pro tento experiment byly vybrány dva typy LTCC substrátu - Heraeus Hera Lock 2000 a DuPont Green Tape 951PT. Byl použit design vzorků podle obrázku 36. Vzorky byly opatřeny maticí prokovů, které měly imitovat vodivé propojení z vnitřní propojovací struktury k vývodům typu BGA. Rozestupy mezi prokovy byly dle doporučení výrobce zvoleny 1,5; 2,0; 2,5 a 3,0 mm, což odpovídá hustotám prokovů 49, 36, 25 a 16 prokovů $\cdot \text{cm}^{-2}$. Průběh experimentu byl totožný s předchozím.

Tab. 11: Závislost propustnosti kyslíku (OTR) na hustotě prokovů s průměrem 0,25 mm v substrátu LTCC Hera Lock 2000.

Počet prokovů [cm^{-2}]	16	25	26	49
OTR [$\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$]	2151	3541	6285	8948



Obr. 41: Závislost OTR na hustotě prokůvů pro čtyřvrstvý substrát LTCC HL2000.

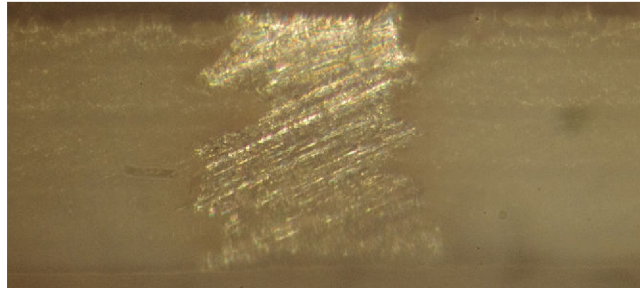
Jak je z tohoto grafu patrné, závislost OTR na hustotě prokůvů má lineární průběh. Podle očekávání je prostupnost kyslíku tím větší, čím větší je hustota prokůvů. V porovnání vzduchotěsnosti s holým substrátem tvořeným rovněž čtyřmi vrstvami je těsnost vzorků s prokovy znatelně horší. Pro dosažení srovnatelné těsnosti by musela být hustota prokůvů na čtyřvrstvě substrátu pouze 0,1 prokovu · cm⁻². Prokovy tedy mají významný vliv na vzduchotěsnost struktury.

Vzorky na substrátu Green Tape byly měřeny stejným způsobem. Bohužel, naměřené hodnoty se pohybovaly mezi 400 000 ÷ 1 100 000 cm³ · m⁻² · atm⁻¹ · den⁻¹, což ukazuje na to, že vzorky nejsou těsné. Po bližším šetření se ukázalo, že u substrátu GT velmi často dochází k protržení výplně prokovu v průběhu procesu, jak je popsáno v kapitole níže. Tyto vady nebyly odhaleny elektrickým testem na zkrat. Protože kvalita prokůvů má zásadní vliv na výslednou těsnost struktury, použitá procedura přípravy vzorku byla pro substráty GT označena jako nekompatibilní. Pravděpodobně se na výsledku podepsala také smrštivost substrátu během výpalu.

4.4.11 Vyhodnocení mikrovýbrusů

Pro analýzu kvality prokůvů byly zhotoveny také mikrovýbrusy. Analyzovány byly oba dva použité typy LTCC substrátů – Heraeus Hera Lock 2000 s nulovou smrštivostí a DuPont Green Tape 951 se smrštivostí 12.7 % v osách x a y . Systém od firmy Heraeus používá naše laboratoř delší dobu a má s ním více zkušeností. I to mohlo zásadně přispět k tomu, že vzorky na substrátu HL2000 byly připraveny lépe a dosáhly lepších výsledků.

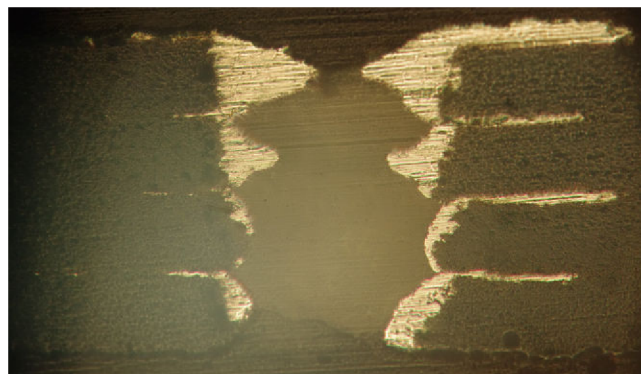
Na obrázku 42 je ukázka prokovu vytvořeného v substrátu HL200. Jako plnivo byla použita tlustovrstvá pasta TC 307 určená pro plnění prokovů. Jednotlivé vrstvy jsou uspokojivě sesouhlasené. Výplň prokovu je celistvá bez dutin či jiných defektů. Na výbrusu je patrné nedokonalé sesouhlasení vrstev.



Obr. 42: Správně sesouhlasený a vyplněný prokov v substrátu HL2000.

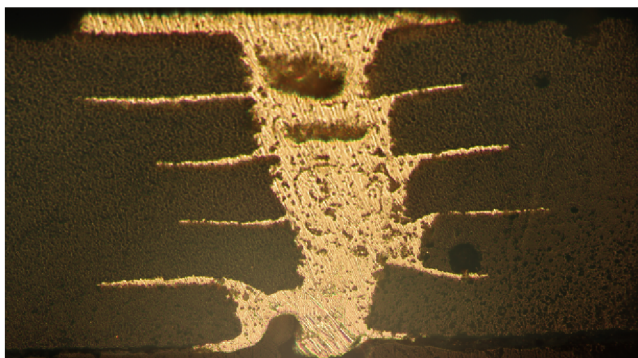
Problémy se objevily pouze u substrátu Green Tape 951. Na vině je pravděpodobně nekompatibilita mezi použitými materiály. Jako výplň byla použita tlustovrstvá pasta DuPont 6142D. Tato pasta na stříbrné bázi se používá pro tisk vnitřních i vnějších vodivých spojů. Byla použita, protože pasta 6141 určená pro plnění prokovů v substrátech Green Tape 951 nebyla dostupná. Použití zároveň mělo ověřit, zda je pasta pro plnění prokovů nahraditelná běžnou vodivou pastou alespoň pro prokovy s malým průměrem, podobně, jak je tomu u systému Heraeus.

Použití nekompatibilní pasty zapříčinilo mnoho defektů, které vedly k netěsnosti struktury. První typ defektu je zobrazen na obrázku 43. K protržení vyplněného prokovu dochází při zasoušení, kdy se odpařením pojiv zmenší objem pasty a pasta zůstává pouze na stěnách prokovu. Během zasoušení nemusí k úplnému protržení dojít vždy. Výplň prokovu se naruší a v průběhu výpalu se narušená pasta vysype.



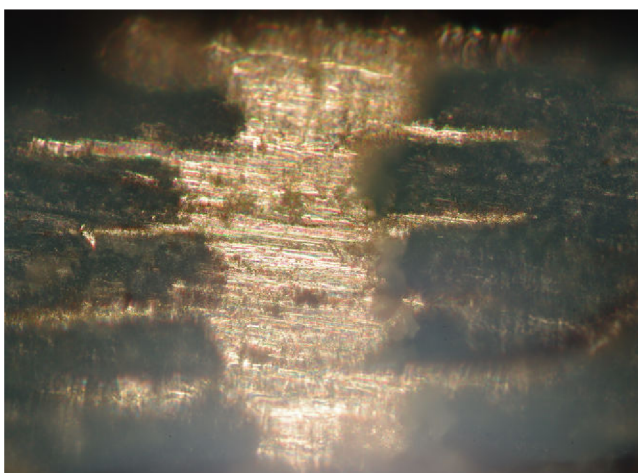
Obr. 43: Špatně vyplněný – protržený; prokov v substrátu GreenTape 951 plněný pastou DuPont 6142D.

Kvůli eliminaci protržených prokovů byl do procesu přípravy zařazen krok přetisku prokovů. Po této úpravě byla naprostá většina prokovů bez viditelných defektů. Analýza mikrovýbrusů pod mikroskopem však ukázala, že se dutiny v prokovech objevovaly stále. Struktura výplně prokovu byla pórovitá, tedy vedla k netěsnosti struktury. Příklad prokovu s dutinami a pórovitou strukturou výplně je uveden na obrázku 44.



Obr. 44: Prokov v substrátu Green Tape 951 vyplněný pastou 6142 s dutinami a pórovitou strukturou výplně.

U většiny analyzovaných přetištěných prokův vedl přetisk k lepším výsledkům, i když nebyla použita kompatibilní pasta. Správně vyplněný prokov bez defektů je na obrázku 45.



Obr. 45: Správně vyplněný prokov pastou 6142 v substrátu Green Tape 951.

Použití nekompatibilní pasty jako plniva prokův ukázalo a umožnilo popsat defekty, které mohou nastat rovněž během procesu s kompatibilními materiály při jeho špatném nastavení.

4.4.12 Závěr

Hlavním cílem provedených experimentů bylo stanovit, zda je keramický substrát LTCC Heraeus Hera Lock 2000 použitelný v aplikacích, na které jsou kladeny požadavky na vzduchotěsnost. Konkrétně pro potřeby návrhu těsný pouzder nebo membránových senzorů. Jako druhý materiál byla zvolena LTCC DuPont Green Tape 951PT, která patří mezi nejrozšířenější typy používaných substrátů. Pro popis těsnosti vzorků byla použita metoda měření prostupnosti kyslíku (OTR). Byla měřena také nasákavost. Byly navrženy vzorky pro zkoumání OTR samotného LTCC, dále vzorky s různou hustotou prokův, které měly za úkol imitovat propojovací strukturu mezi zapouzdrěným čipem a terminály pouzdra. Prokovy byly uspořádány

do matice, podle vzoru BGA nebo LGA pouzder. Byly také navrženy vzorky pro měření nasákavosti.

Měření nasákavosti (vodný roztok manganistanu draselného) potvrdilo předpoklad, že nasákavost skrz vrstvy LTCC struktury a mezi nimi je různá. Pro nasákání mezi vrstvami se ukázala doba ponoření 16 hod. jako kritická. Nasákávání skrz vrstvy se projevilo taktéž po 16 hod., avšak roztok prostoupil pouze jednou vrstvou, tedy do hloubky cca 0,1 mm. Bylo zjištěno, že špatné sesouhlasení vrstev významně přispívá k horší odolnosti vzorku před nasákáváním. Vede ke vzlínání roztoku po okrajích vzorku. Kvalita laminace má velký vliv na nasákávání mezi vrstvami. Podobný trend jako pro použitý roztok je očekávaný pro plyny.

Měření propustnosti kyslíku připraveným vzorkem - keramickým diskem; ukázalo závislost OTR na tloušťce. Vzorky tvořené třemi a čtyřmi vrstvami se již vykazovaly jako dobrá bariéra pro kyslík. Na základě změřených dat by tedy vzorky tvořené 5 ÷ 6 vrstvami měly být zcela těsné. Z této skutečnosti vyplývá možné použití HL2000 v pouzdření, membránových senzorech, ale i v mnoha dalších aplikacích s požadavky na vzduchotěsnost.

U LTCC firmy Heraeus HL2000 byla dle očekávání zjištěna lineární závislost mezi OTR a hustotou prokovů. V porovnání s výsledky měření vzorku se stejným počtem vrstev bez prokovů ($0,3 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$) byly dosažené výsledky vzorků s prokovy významně vyšší ($2\,000 \div 9\,000 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$).

Pro LTCC firmy DuPont Green Tape 951 nebyly naměřeny žádné vypovídající výsledky. Vzorky se chovaly jako velmi špatně těsnící nebo netěsné. Příčinou byly defekty v prokovech – dutiny, póry ve výplni a protržené prokovy. Důvodem vzniku těchto defektů bylo použití nekompatibilní pasty určené pro tisk vnějších a vnitřních vodičů, nikoli k plnění prokovů. Po potvrzení nekompatibility byl do procesu přípravy vzorku zařazen přetisk. Výsledky po přetisku prokovů byly výrazně lepší. Nebylo však dosaženo úplné eliminace defektů, a vzorky na substrátu Green Tape 951 byly i nadále netěsné. Kompatibilní pasta DuPont 6141 nebyla použita z důvodu její nedostupnosti, a také kvůli zjištění možné náhrady. Elektrické testování prokovů defekty neodhalilo. Nebylo zjištěno ani snížení vodivosti prokovu během kontrolního měření. Pravděpodobně se snížila pouze proudová zatížitelnost, ale ta nebyla předmětem zkoumání.

Vzorky tvořené čtyřmi vrstvami substrátu Heraeus Hera Lock 2000 s vybranými hustotami prokovů plněnými pastou TC 307 byly vyhodnoceny jako krátkodobě těsné. Pro zvýšení těsnosti vzorku, resp. spodní části pouzdra el. obvodu, by bylo třeba navýšit počet vrstev a zvolit vhodnou hustotu prokovů. Pouzdro by také bylo možné navrhnout s překrytými prokovy krycí vrstvou LTCC s využitím odbočky v poslední vrstvě k terminálu.

Z provedených experimentů vyplývá, že LTCC substráty HL2000 jsou použitelné v aplikacích s požadavky na vzduchotěsnost. Při návrhu je však třeba uvažovat použití dostatečného počtu vrstev. Pro návrh membránového senzoru to zároveň znamená

ovlivnění jeho citlivosti. Použití 3 ÷ 4 vrstev je uspokojující v krátkodobě vzduchotěsných aplikacích. Struktura může být prohlášena za těsnou až od vyššího počtu vrstev. Při návrhu vzduchotěsných aplikací je třeba rovněž uvažovat značně horší těsnost mezi vrstvami substrátu.

5 Závěr

Cílem práce bylo rozšíření a ověření aplikačních možností substrátů LTCC pro použití v pouzdření se zaměřením na provoz ve vyšších teplotách. Byl kladen důraz nejen na funkčnost, ale také spolehlivost a reprodukovatelnost realizovaných struktur a jejich prvků. Práce byla zaměřena na studium a definování limitů LTCC substrátů a stanovení působících faktorů, experimentální ověření těsnosti LTCC pro konstrukci pouzder elektrických obvodů a na studium možností aplikace LTCC technologie pro optické aplikace. Dále byl prováděn výzkum spojování substrátů LTCC s dalšími anorganickými substráty (Al_2O_3 , SiC), experimentálně ověřovány techniky kontaktování pro LTCC struktury, byl sledován návrh a optimalizace procesu realizace 3D rezistorů a v neposlední řadě byly práce zaměřeny na experimentální zjištění možností montáže THT součástek na LTCC strukturu.

Pro výzkum byla vybrána materiálová základna firmy Heraeus. Do ní patří LTCC substrát Hera Lock 2000 a s ním kompatibilní vodivé pasty pro vytváření vodivé sítě, prokovů a pájitelných nebo kontaktovatelných ploch. Substrát HL2000 byl zvolený pro svoji dostupnost, snadno zaveditelný proces a především téměř nulovou smrštitivost během výpalu, díky čemuž nejsou kladeny speciální požadavky na vypalovací pec a návrh struktur je tak snazší.

Za účelem splnění cíle práce ověřit hermetické vlastnosti LTCC a stanovení její využitelnosti byla provedena série experimentů. Byla zkoumána těsnost holého LTCC substrátu, těsnost substrátu s maticí prokovů, která měla simulovat vývody pouzdra a těsnost mezi zlaminovanými prokvy. Pro popis hermetických vlastností byl zvolen ukazatel OTR. Pro měření byla využita experimentální aparatura pro měření OTR Fakulty chemické, Vysokého učení technického v Brně. Z výsledků měření vyplývá, že těsnost holého substrátu LTCC je závislá na počtu vrstev struktury. Čtyřvrstvá struktura dosáhla OTR $0,3 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$, což je uspokojivý výsledek pro krátkodobé udržení těsnosti. Podle trendu závislost těsnosti na počtu vrstev byla jako těsná stanovena pětivrstvá struktura. Měření těsnosti substrátu s maticí prokovů ukázalo přímou úměru mezi těsností a hustotou prokovů. Byly použity čtyřvrstvé vzorky. Z výsledků plyne výrazné zhoršení těsnosti struktury, pokud obsahuje prokvy. Například pro vzorek s 16 prokvy na cm^2 dosáhl OTR $2151 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$. Navrhovaným řešením pro zvýšení těsnosti je použití prokovů nepřímých, tzn. neprocházející celou strukturou, ale spojujících pouze vnější vrstvy s vnitřními.

Vzhledem k náročnosti přípravy vzorku byl pro ověření těsnosti mezi vrstvami vícevrstvé struktury zvolen jiný způsob měření. Jako ekvivalentní ukazatel byla zvolena nasákavost. Měření bylo orientační a potvrdilo domněnku, že těsnost mezi zlaminovanými vrstvami je výrazně horší v porovnání s těsností holého substrátu [1*][2*].

Studium možností použití LTCC v optických aplikacích bylo zaměřeno na výzkum odrazivých ploch. Byl hledán způsob zhotovení odrazivé plochy co nejjednodušším způsobem, který by co nejméně zasahoval do standardního procesu výroby LTCC

struktur. Pro odrazivou plochu byly stanoveny požadavky dle standardu pro optické aplikace, tzn. použitelnost na vlnových délkách $\lambda = 1310$ a 1550 nm a spekulární odrazivost min. 75 %. Kvůli omezení dostupného měřicího přístroje byla odrazivost měřena spekulární odrazivost pouze ve viditelném spektru vlnových délek ($350 \div 750$ nm). Ze známých závislostí použitých materiálů ale bylo možné dedukovat, že na požadovaných vlnových délkách budou vlastnosti odrazivé plochy podobné. Jako materiál pro odrazivou plochu bylo zvoleno stříbro (TLV pasta Heraeus TC0306) a zlato (deponované napařováním). Z více variant použitých materiálů, postupů deponování a povrchových úprav odrazivé plochy vyplynulo, že na LTCC nelze vytvořit odrazivou plochu s požadovanými vlastnostmi způsobem, který by nevyžadoval zařadit další kroky do standardního procesu. Jako nejvhodnější a jediná vyhovující vytvořená vrstva byla stanovena natištěná stříbrná vrstva leštěná po výpalu smirkovým papírem [3*].

V oblasti spojování LTCC s anorganickými substráty byly provedeny pilotní experimenty. Bylo zkoumáno spojování LTCC a korundových substrátů a LTCC s SiC substráty. Do experimentů byly zařazeny různé typy LTCC (HL2000, DuPont GT951PT). Ke spojování byly použity různé TLV pasty (rezinátová pasta GG-Q3-15, rezistivní ESL3910, vodivé ESL9912K a ESL9695G, dielektrické ESL4771 a ESL4917). Pro porovnání byly využity vzorky s keramickými SMD součástkami o stejné ploše připájenými pájkou SAC. Průměrná síla potřebná k utržení SMD součástky při zkoušce pevnosti stříhem byla 100 N. Výsledky naznačují použitelnost všech výše uvedených past pro spojování LTCC a korundových substrátů. Pro srovnání, síla potřebná k utržení korundového substrátu o srovnatelné ploše s SMD součástkou připevněného k LTCC pomocí pasty izolační ESL4917 byla přibližně 90 N. Při spojování LTCC s SiC čipy stejnými pastami se většina ukázala nepoužitelná. Čipy buď uplavalý během výpalu pasty, nebo je bylo možné velmi snadno odstranit. Z vyzkoušených past se s SiC čipem spojily pouze vodivé pasty na bázi stříbra (ESL9912K a ESL9695G). Výzkum v této oblasti bude pokračovat. Experimenty budou zaměřeny na spolehlivost spojení při vyšších teplotách.

Práce se věnovala také ověření použitelnosti drátových propojů na LTCC substrátu pro aplikace s vyšší provozní teplotou. Bylo zkoumáno propojení LTCC – LTCC. Pro vytvoření vodivého motivu byla použita zlatá pasta Heraeus TC8101 určená pro kontaktování. K vytvoření propoje byl použit zlatý mikrodrátek. Vzorky s vytvořenými propoji byly podrobeny zkoušce teplotního cyklování na teplotách 300, 400 a 550 °C. K vyhodnocení změn vlivem cyklování sloužilo měření odporu propojů a destruktivní zkouška pevnosti v tahu. U všech cyklovaných propojů byl zjištěn pokles pevnosti. Pevnost ale zůstala dostačující pro použití zlatých propojů v aplikacích pro spotřební elektroniku. Protože zkoušky cyklování proběhly pouze krátkodobě, je nutné spolehlivost propojů ověřit dlouhodobým experimentem [4*].

Další ze zkoumaných oblastí v této práci byl návrh a realizace 3D rezistorů. Experimenty měly za úkol ověřit vyrobitelnost různých typů 3D rezistorů a zjistit vliv difúze vodivé pasty do rezistoru. Jako nejspolehlivější způsob přípravy 3D rezistoru

se ukázalo plnění prokovu po vrstvách a jeho následné seskládání. Byly popsány možné defekty vznikající při zhotovení rezistoru. Kvůli nedostupnosti kompatibilní rezistivní pasty nebyl experimentálně ověřen vliv difúze vodivé pasty do rezistoru [5*].

Posledním z cílů práce bylo experimentální ověření možnosti montáže THT součástek na LTCC substrát. Výsledky experimentů byly publikovány ve článku *Compatibility of Through-Hole Technology Devices with Low-Temperature Co-fired Ceramic Substrate*. Jako referenční součástka byl pro experimenty zvolen axiální THT rezistor. Vodivý motiv na LTCC byl natištěn pastou TC0306. Byla použita olovnatá pájka Stannol Sn60Pb40 HF32-SMD. Provedené simulace ukázaly na teplotním rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \div 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve spoji menší pnutí (max. 247 MPa) než u substrátu FR4 (max. 458 MPa). Zkoušky v klimatické komoře (+125/-40 °C, čas na teplotě: 30 min., počet cyklů: 250 dle normy IPC-9701 TC3 NTC-A) výsledky simulací potvrdily. THT součástky je na substrát HL2000 možné osazovat [6*].

Jádro disertační práce bylo publikováno na mezinárodní konferenci ISSE ([1*][4*][5*][6*]), impaktovaném časopise *Key Engineering Materials* ([3*]), v časopise *Electroscope* ([7*]) a na *Mezinárodní Masarykově konferenci pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky* ([2*]).

Závěrem lze konstatovat, že tato práce přinesla nové poznatky v oblasti nekonvenčních aplikací LTCC, které doposud nebyly publikovány. Byl utvořen vědomostní základ vedoucí k návrhu vybraných prvků struktur na LTCC s vyšší opakovatelností. Během dílčích experimentů v rámci disertační práce proběhla optimalizace některých kroků procesu zpracování LTCC v laboratoři UMEL, FEKT, VUT v Brně.

[*] – Citace vlastních publikací.

Seznam použité literatury

- [1] TUMMALA, Rao R. *Fundamentals of microsystems packaging*. New York: McGraw-Hill, c2001, vii, 967 p. ISBN 00-713-7169-9.
- [2] DZIEDZIC, A. a NOWAK, D. Thick-Film and LTCC Passive Components for High-Temperature Electronics. *Radioengineering*. 2013, č. 1. Dostupné z: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2013/13_01_0218_0226.pdf
- [3] KŘEČEK, T. Součástky na bázi karbidu křemíku. In: *Perspektivy elektroniky 2007: 5. celostátní seminář učitelů středních škol ČR : Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel, Rožnov pod Radhoštěm, 29. března 2007 : [sborník přednášek]*. Rožnov pod Radhoštěm: Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel, 2007, 31 - 38. ISBN 978-80-239-9006-5.
- [4] CHEN, Liang-Yu, Gary W. HUNTER, Philip G. NEUDECK, Seonuk PARK, Se Hyun KIM a Chan Eon PARK. Silicon Carbide Die Attach Scheme for 500°C Operation. RUMMEL, Peter. *MRS Proceedings: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2000, 622(2): -. DOI: 10.1557/PROC-622-T8.10.1. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 1946-4274.
- [5] KOSINA, P. Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012. 88 stran, 6 příloh. Vedoucí práce J. Šandera.
- [6] TRNKA, P. a Bujaloboková M. Progresivní keramika v elektronických aplikacích. *Advances in electrical and electronic engineering*. 2007, č. 3, s. 440-443.
- [7] *Advanced 3D LTCC Passive Components Using Cavity Structures for 60 GHz Gigabit Wireless Systems* [online]. Yokohama, Japan: IEICE, 2006[cit. 2012-01-03]. Dostupné z: http://users.ece.gatech.edu/~etentze/APMC06_Jong_Final.pdf
- [8] DAI, S. MOTOROLA LABS. *LTCC Passive Integration: Status and challenges*. 2007, 40 s.
- [9] GOLONKA, L.J. Technology and Applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) Based Sensors and Microsystems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 2006, č. 2, s. 221-231.
- [10] HYDE brochure: HYDE - The CAD System for Hybrid and LTCC Circuits. *Eurointech* [online]. [cit. 2012-01-02]. Dostupné z: http://www.eurointech.ru/products/Durst/HYDE_brochure.pdf
- [11] GUTZEIT, Nam, Jens MULLER, Claudia REINLEIN, Sylvia GEBHARDT, Se Hyun KIM a Chan Eon PARK. LTCC membranes With integrated heating structures, temperature sensors and strain gauges. RUMMEL, Peter. *2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3.,

- neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2012, 622(2): 399-405. DOI: 10.1109/ISSE.2012.6273169. ISBN 978-1-4673-2240-9. ISSN 1946-4274.
- [12] What is MEMS Technology?. MEMS AND NANOTECHNOLOGY COMMUNITY. *MEMSnet* [online]. 2013 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://www.memsnet.org/mems/what_is.html
- [13] MOLL, A. J. a D. G. PLUMLEE. MEMS devices in LTCC. *204th Meeting of The Electrochemical Society*. 2003, č. 204. Dostupné z: <http://www.electrochem.org/dl/ma/204/pdfs/1161.PDF>
- [14] MALECHA, Karol, Leszek J. GOLONKA, Claudia REINLEIN, Sylvia GEBHARDT, Se Hyun KIM a Chan Eon PARK. Microchannel fabrication process in LTCC ceramics. RUMMEL, Peter. *Microelectronics Reliability: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2008, 48(6): 866-871. DOI: 10.1016/j.microrel.2008.03.013. ISBN 978-1-4673-2240-9. ISSN 00262714.
- [15] HUDEČEK, O. Laminace nízkoteplotní keramiky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2012. 50s., 9s. příloh. Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Kosina.
- [16] FOURNIER, Y. *3D Structuration Techniques of LTCC for Microsystems Applications*. Lausanne, 2010. Disertační práce. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [17] ZHANG, Yang-Fei, Jia-Qi CHEN, Shu-Lin BAI, Yu-Feng JIN, Min MIAO a Jing ZHANG. Microchannel water cooling for LTCC based microsystems. RUMMEL, Peter. *2009 11th Electronics Packaging Technology Conference: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2009, 48(6): 626-629. DOI: 10.1109/EPTC.2009.5416475. ISBN 978-1-4244-5099-2. ISSN 00262714.
- [18] THELEMANN, T., HEIKO, T., GERNOT, B. Liquid Cooled LTCC-Substrates for High Power Applications. *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*. 2000, č. 2, s. 209-214. ISSN 1063-1674.
- [19] NOWAK, D., KULCZAK, D., JANUSZKIEWICZ, M., DZIEDZIC, A. A. High temperature LTCC package for SiC-based gas sensor. *Optica Applicata*. 2009, č. 4, s. 701-704.
- [20] MANIKAM, V. R.. Die Attach Materials for High Temperature Applications: A Review. *EEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 2011, č. 4, s. 457-478.
- [21] JIAN, Y., ZHENXIAN L., VAN WYK J. D. High Temperature Embedded SiC Chip Module (ECM) for Power Electronics Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007, č. 2, s. 392-398.

- [22] NOWAK, D., DZIEDZIC, A. LTCC package for high temperature applications. *Microelectronics Reliability*. 2011, roč. 51, č. 7, s. 1241-1244. ISSN 00262714. DOI: 10.1016/j.microrel.2011.02.018.
- [23] BIENERT, Christian a Andreas ROOSEN. Characterization and improvement of LTCC composite materials for application at elevated temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*. 2010, roč. 30, č. 2, s. 369-374. ISSN 09552219. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.05.023.
- [24] ZEISER, R., WAGNER P., WILDE J. Assembly and packaging technologies for high-temperature SiC sensors. *Proceedings - Electronic Components Conference: Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. 2012, č. 62, s. 338-343. ISSN 0569-5503. DOI: 10.1109/ECTC.2012.6248852.
- [25] JOHANNESSEN, R., OLDERVOLL, F., STRISLAND, F. High temperature reliability of aluminium wire-bonds to thin film, thick film and low temperature co-fired dwarf ceramic (LTCC) substrate metallization. *Microelectronics Reliability*. roč. 48, č. 10, s. 1711-1719. ISSN 00262714. DOI: 10.1016/j.microrel.2008.06.008.
- [26] KLÍMA, M., SZENDIUCH, I. LTCC - Keramika s nízkou teplotou výpalu. *Mickronetwork*. 2012. s. 7-8.
- [27] LAUTZENHISER, F., AMAYA, E. HeraLock TM 2000 Self-constrained LTCC Tape. In: *LTCC-CONSULTING* [online]. 2002 [cit. 2013-12-02]. Available from: <http://www.ltcc-consulting.com/publications/2002/HeraLock%202000%20Self-constrained%20LTCC%20Tape.pdf>
- [28] HERAEUS. *Design Guidelines for LTCC: HeraLock HL200 Materials System*. 2005. Dostupné z: <http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf>
- [29] HeraLock Tape HL2000. *Heraeus* [online]. 2011 [cit. 2015-09-16]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/HL2000.pdf
- [30] DZIEDZIC, A. Modern micropassives: fabrication and electrical properties. *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES*. 2006, č. 1, roč. 9, s. 9-18.
- [31] KOSINA, P., ŠANDERA, J., HEJÁTKOVÁ, E. Perspektiva LTCC technologie. *Bulletin of SMT/ISHM Int. Conference New Trends in Microelectronics*, 2009, roč. 64, s. 4-5.
- [32] WEILGUNI, Michael, Walter SMETANA, Goran RADOSAVLJEVIC, Johann NICOLICS, Werner GOEBL a Alex HOFMANN. Low Temperature Co-fired Ceramics Processing Parameters Governing the Performance of Miniaturized Force Sensors. *MAPS/ACerS 8th International Conference and Exhibition on*

- Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT 2012)*. 2012.
- [33] Co-Firing Gold Conductor TC8101. *Heraeus* [online]. 2011 [cit. 2015-09-20]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/TC8101.pdf
- [34] BIENERT, Christian a Andreas ROOSEN. Characterization and improvement of LTCC composite materials for application at elevated temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*. 2010, 30(2): 369-374. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.05.023. ISSN 09552219.
- [35] HORIO, Masafumi a Yuji IIZUKA. Packaging Technologies for SiC Power Modules. *FUJI ELECTRIC REVIEW*. 2012, 58(2): 75 - 78.
- [36] LOPEZ, Cristina, Liang CHAI, Aziz SHAIKH a Vern STYGAR. Wire bonding characteristics of gold conductors for low temperature co-fired ceramic applications. *Microelectronics Reliability*. 2004, 44(2): 287-294. DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00195-1. ISSN 00262714.
- [37] KOSINA, P., E. HEJATKOVA a J. SANDERA, J. Vapour deposition on LTCC for 3D structure. *Electronics*. 2008, roč. 2008, č. 1, s. 115 - 120. ISSN 1313-1842.
- [38] L.J. Golonka et al.: LTCC based microfluidic system with optical detection High Efficiency Silicon Solar Cells. Sensors and Actuators B: Chemical. *Trans Tech Publications*, 2005.
- [39] Heraeus Resinate Pastes for Low Temperature Applications. *Heraeus* [online]. 2011 [cit. 2015-09-20]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/broschueren/LTP.pdf
- [40] PAL, B.P., PANDE K. Optimization of a dual-core dispersion slope compensating fiber for DWDM transmission in the 1480 - 1610 nm band through G.652 single-mode fibers. *Optics Communications*. 2002.
- [41] Dektak XT User Manual. *MMRC* [online]. 2011 [cit. 2015-07-08]. Dostupné z: <http://mmrc.caltech.edu/DektakXT/Manuals/User%20Manual%20Dektak%2011-05-31.pdf>
- [42] Reflektanční techniky - Spekulární reflektance. *VŠCHT* [online]. 2001 [cit. 2015-08-11]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/IR/Spekulref.htm>
- [43] HOSOYA, Yumiko, Takanobu SHIRAISHI, Tetsuo ODATSU, Toshiaki OGATA, Masashi MIYAZAKI a John M. POWERS. Effects of specular component and polishing on color of resin composites. *Journal of Oral Science*. 2010, 52(4): 599-607. DOI: 10.2334/josnusd.52.599. ISSN 1880-4926.
- [44] PRECISE COLOR COMMUNICATION. *Konica Minolta* [online]. 2003 [cit. 2015-08-11]. Dostupné z: https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/PRECISE_COLOR_COMMUNICATION/pcc_english_13.pdf

- [45] SPECTROPHOTOMETER CM - 3600A INSTRUCTION MANUAL. *Konica Minolta* [online]. 1988 [cit. 2015-08-12]. Dostupné z: http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-3600a_instruction_eng.pdf
- [46] *400px Image Metal reflectance* [online]. 2013 [cit. 2015-10-01]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9d/Image-Metal-reflectance.png/400px-Image-Metal-reflectance.png>
- [47] SZENDIUCH, I., "Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů", VUTIUM, 2007. Vol. 372, No. 1.
- [48] KLÍMA, M. Aplikace keramiky s nízkou teplotou výpalu s vysokou provozní teplotou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektroniky a komunikačních technologií, 2013. 21 p.
- [49] CLUFF, K.D. Electronic Packaging Technologies: Mechanical Engineering Handbook. roč.1. CRC Press LLC, 1999. Available from: <http://f3.tiera.ru/ShiZ/Physics/Mechanical%20Engineering/ME%20Handbook/10A1.pdf>
- [50] PSOTA, Boleslav, Martin KLÍMA, Michal NICAČ a Ivan SZENDIUCH. Usage of LTCC technology in electronic packaging. RUMMEL, Peter. *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2013, 44(2): 206-209. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648243. ISBN 978-1-4799-0036-7. ISSN 1313-1842.
- [51] LTCC – What is it and Where is it Going? *IMAPS* [online]. 2002 [cit. 2015-09-03]. Dostupné z: <http://www.imaps.org/chapters/greatlakes/meetings/attachments/lccc%20great%20lakes.pdf>
- [52] LTCC Substrates. *Micro Systems Technologies* [online]. 2014 [cit. 2015-09-03]. Dostupné z: http://www.mst.com/msegmbh/_media/downloads/brochures/MSE_Factsheet_LTCC_screen_1411.pdf
- [53] SE IGNEUR, F., Y. FOURNIER, T. MAEDER, P. RYSER a J. JACO. Hermetic Package for Optical MEMS. *Seigneur CICMT*. 2008, roč. 1.
- [54] IONESCU, Ciprian, Paul SVASTA, Cristina MARGHESCU, Marina Santo ZARNIK a Darko BELAVIC. Study on optimization of capacitive pressure sensor using coupled mechanical-electric analysis. RUMMEL, Peter. *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2009, 44(2): 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2009.5206986. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 1313-1842.
- [55] Klíma, M., Somer, J., Procházka, M., Szendiuch, I., Hermetic Properties Of Low-Temperature Co-Fired Ceramic Applications. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mlade vědecke pracovníky 2013*. Hradec Kralove: MAGNANIMITAS, 2013. s. 1-8. ISBN: 978-80-87952-00-9.

- [56] IONESCU, Ciprian, Paul SVASTA, Cristina MARGHESCU, Marina Santo ZARNIK a Darko BELAVIC. Study on optimization of capacitive pressure sensor using coupled mechanical-electric analysis. RUMMEL, Peter. *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden.* 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2009, 44(2): 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2009.5206986. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 1313-1842..
- [57] CHEN, Yisheng, Yanxia LI, Cristina MARGHESCU, Marina Santo ZARNIK a Darko BELAVIC. Determination of water vapor transmission rate (WVTR) of HDPE bottles for pharmaceutical products. RUMMEL, Peter. *International Journal of Pharmaceutics: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden.* 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2008, 358(1-2): 137-143. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.02.031. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 03785173.
- [58] GU, Jiajian G. Concept of Barrier Properties of Packaging Materials: Its Impact in Food Packaging. *MOCON, Inc.* 2007, roč. 1, s. 1-13.
- [59] PARK, Seyeol, Won Min YUN, Lae Ho KIM, Seonuk PARK, Se Hyun KIM a Chan Eon PARK. Inorganic/organic multilayer passivation incorporating alternating stacks of organic/inorganic multilayers for long-term air-stable organic light-emitting diodes. RUMMEL, Peter. *Organic Electronics: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden.* 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 2013, 14(12): 3385-3391. DOI: 10.1016/j.orgel.2013.09.045. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 15661199.
- [60] BANKS, HARRELL, RANZELL NICKELSON II, GUNNAR FINNE, Seonuk PARK, Se Hyun KIM a Chan Eon PARK. SHELF-LIFE STUDIES ON CARBON DIOXIDE PACKAGED FINFISt FROM THE GULF OF MEXICO. RUMMEL, Peter. *Journal of Food Science: mit EheG, KSchG, MRG, WGG, WEG 2002, BTVG, HeizKG, IPRG, EVÜ : in zwei Bänden.* 3., neubearb. und erw. Aufl. Wien: IEEE, 1980, 45(2): 157-162. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb02566.x. ISBN 978-1-4244-4260-7. ISSN 0022-1147.

Vlastní publikace

- [1*] KLÍMA, M.; SOMER, J.; BLAHOVÁ, L.; PROCHÁZKA, M.; SZENDIUCH, I. *Usage of Low-Temperature Co-Fired Ceramic In Hermetic Packaging*. Advances in Electronic System Integration - Book of Abstracts 37th International Spring Seminar on Electronics Technology. 2014. s. 99-103. ISBN: 978-3-934142-49-7
- [2*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I.; SOMER, J.; PROCHÁZKA, M. Hermetic Properties Of Low-Temperature Co-Fired Ceramic Applications. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2013*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2013. s. 1-8. ISBN: 978-80-87952-00-9.
- [3*] KLÍMA, M.; HOLÍK, M.; SVATOŠ, V.; HUBÁLEK, J.; SZENDIUCH, I.; URBAN, F. Photo-reflective layer on Low Temperature Co-fired Ceramic for optical applications. *Key Engineering Materials (print)*, 2013, roč. 592-593, č. 1, s. 457-460. ISSN: 1013-9826.
- [4*] KLÍMA, M.; PSOTA, B.; SZENDIUCH, I. Wire-Bonds Durability in High-Temperature Applications. In *Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2013*. first. Brno: VUT, 2013. s. 38-43. ISBN: 978-80-214-4754-7.
- [5*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I. Possibilities of making 3D resistors in LTCC technology. In *Electronics Technology (ISSE), 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology*. 2012. s. 50-54. ISBN: 978-1-4673-2240-9.
- [6*] KLÍMA, M.; PSOTA, B.; SZENDIUCH, I. Compatibility of through-hole technology devices with low-temperature co-fired ceramic substrate. *Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics*, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 127-131. ISSN: 2161-2528.
- [7*] KLÍMA, M.; PSOTA, B.; SZENDIUCH, I. Wire-Bonds Durability in High-Temperature Applications. *ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>*, 2013, roč. 2013, č. 5, s. 7-11. ISSN: 1802-4564.
- [8*] ONDRÁČEK, M.; KLÍMA, M. Vliv viskozity tlustovrstvé pasty před tiskem na formování vrstev. In *Proceedings of the 19th Conference STUDENT EEICT 2013*. 2013. s. 142-144. ISBN: 978-80-214-4694-6.
- [9*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I. *Úvod do technologie tlustých vrstev*. 2012. s. 4-7. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.micronetwork.cz/>
- [10*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I. *LTCC - Keramika s nízkou teplotou výpalu*. 2012. s. 7-8. [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.micronetwork.cz/>
- [11*] PSOTA, B.; KLÍMA, M.; NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Usage of LTCC Technology in Electronic Packaging. *Electronics Technology (ISSE), 2011 34th*

International Spring Seminar on Electronics, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 206-209.
ISSN: 2161- 2528.

- [12*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I. Thermodynamic Sensor of Thermal Radiation. In *Proceedings of the 18th conference Volume 3*. Brno: LITERA Brno, 2012. s. 324-328. ISBN: 978-80-214-4462- 1.
- [13*] KLÍMA, M.; SZENDIUCH, I. Návrh 3D struktur realizovaných na LTCC substrátech pomocí programu HYDE. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích*. Brno: Novapress, 2011. s. 63-68. ISBN: 978-80-214-4405- 8.

Tvůrčí aktivity

- [1] KLÍMA, M.; NICÁK, M.: M1/ 2012; Horizontální válcová míchačka tlustovrstvých past. VUT, FEKT, UMEL, Technická 3058/10, 616 00 Brno. Laboratoř 0. 64. URL: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzoroky/klima-fv-michacka.pdf>. (funkční vzorek)

- [2] NICÁK, M.; KLÍMA, M.: OSVIT_ NK; Zařízení k UV osvitě sít určených pro sítotisk tlustovrstvých hybridních integrovaných obvodů. Technická 10, Laboratoř 0. 67. URL: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzoroky/nicak-fv-osvitka.pdf>. (funkční vzorek)

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný (<i>Three-Dimensional</i>)
BGA	Pole kulových vývodů (<i>Ball Grid Array</i>)
COTR	Index propustnosti oxidu uhličitého (<i>Carbon Oxide Transmission Rate</i>)
DPS	Deska plošného spoje
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
GT	LTCC substrát DuPont Green Tape
HIO	Hybridní integrovaný obvod
HL2000	LTCC substrát Heraeus Hera Lock 2000
HTCC	Keramika s vysokou teplotou výpalu (<i>High-Temperature Co-Fired Ceramic</i>)
LDA	Pole planárních vývodů (<i>Land Grid Array</i>)
LTCC	Keramika s nízkou teplotou výpalu (<i>Low-Temperature Co-Fired Ceramic</i>)
MCM-C	Vícečipový modul na keramickém nosiči (<i>Multichip Module on Ceramic</i>)
MEMS	Mikroelektromechanické systémy
Nd-YAG	Yttrium-Aluminium-Granát dopovaný Neodymem
OTR	Index propustnosti kyslíku (<i>Oxygen Transmission Rate</i>)
RFID	Bezdrátová identifikace využívající radiové frekvence (<i>Radio Frequency Identification</i>)
RoHS	Směrnice Evropské unie pro omezení používání nebezpečných materiálů (<i>Restriction of Hazardous Substances</i>)
SC	Spekulární složka záření (<i>Specular Component</i>)
SCE	Vyloučená spekulární složka záření (<i>Specular Component Excluded</i>)
SCI	Zahrnutá spekulární složka záření (<i>Specular Component Included</i>)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
SIP	Systém v pouzdře (<i>System in Package</i>)
SMD	Součástka pro povrchovou montáž (<i>Surface-Mounted Device</i>)
SMT	Technologie povrchové montáže (<i>Surface-Mount technology</i>)
SOM	Systém na modulu (<i>System on Module</i>)
SOP	Systém na pouzdře (<i>System on Package</i>)

SVM	Dočasný výplňový materiál (<i>Sacrificial Volume Material</i>)
THT	Technologie vývodových součástek (<i>Through-Hole Technology</i>)
UMEL	Ústav Mikroelektroniky
UV	Ultrafialový (<i>Ultra Violet</i>)
VUT	Vysoké učení technické v Brně
WVTR	Index propustnosti vodních par (<i>Water Vapour Transmission Rate</i>)

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	plocha	m^2
d	průměr	m
E	Youngův modul pružnosti	Pa
F	síla	N
h	výška	m
k	tangenta	-
l	délka	m
m	hmotnost	kg
OTR	propustnost kyslíku	$cm^3 \cdot m^{-2} \cdot atm^{-1} \cdot den^{-1}$
p	tlak	atm nebo N (vztaženo k ploše čelisti laminovacího lisu)
P	výkon	W
r	poloměr	m
R	elektrický odpor	Ω
R_{sq}	odpor na čtverec	Ω/\square
S	plocha	m^2
T	teplota	$^{\circ}C$
t	čas	s
V	objem	m^3
w	šířka	m
γ	Poissonova konstanta	-
λ	vlnová délka	m
ρ	měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot m$
\square	čtverec plochy	-

Seznam obrázků

Obr. 1:	Řez šestivrstvou strukturou na LTCC se dvěma možnými uspořádáními kondenzátorů.....	13
Obr. 2:	Řez 3D cívkou napájecího obvodu s červeně vyznačenou oblastí pro umístění vnořených obvodů : (1) závity na horní straně struktury, (2) spojovací prokovy, (3) stínění vnitřních obvodů, (4) vodivé spojení vnitřních obvodů s cívkou; 3D cívka se třemi závity (vpravo dole) [8][9].....	13
Obr. 3:	Řez strukturou se zanořeným čipem: (1) čip, (2) kontakovací mikrodrátky, (3) vnitřní vodivá struktura, (4) chladičí prokovy, (5) stínící prokovy [6]. .	14
Obr. 4:	Ukázka stínící vrstvy s otvory pro prokovy a zapuštěné součástky [10].	14
Obr. 5:	Příklad konstrukce senzoru tlaku na LTCC [5].	15
Obr. 6:	Oběžné kolo realizované pomocí LTCC [9].....	16
Obr. 7:	Příklad průhybu laminovaných vrstev mikro-kanálku a jejich delaminace [16].....	16
Obr. 8:	Příklady konstrukce pouzder pro SiC: Kompletní pouzdro na HTCC (vlevo); Neplnohodnotné pouzdro na LTCC s vnitřní strukturou (vpravo) [21] [22].	17
Obr. 9:	Proces výroby obvodu na LTCC substrátu: 1) Válcování keramiky na nosič, 2) dělení substrátu, 3) řezání nebo ražení prokovů, 4) tisk TLV past a jejich zasušení, 5) laminace vrstev, 6) další kroky (osazení SMD součástek, pouzdření apod.) [26].....	19
Obr. 10:	Teplotní profil pro výpal LTCC substrátu Heraeus Hera Lock 2000 [29]... ..	21
Obr. 11:	Uspořádání prokovů: a) přímý; b) přímý přes vodiče ve vnitřních vrstvách; c) cik-cak (vnější vodivá vrstva je znázorněna světle šedou, vnitřní vodivá vrstva tmavě šedou a rezistivní prokov modrou barvou).....	25
Obr. 12:	Topologie navržených testovacích struktur typu A a B (rozměry jsou uvedeny v mm).....	26
Obr. 13:	Pohled na možné poruchy prokovu o průměru 0,3 mm (vlevo přítomný opal po řezání laserem; vpravo nedokonale vyřezaný prokov po tisku kontaktní plošky).....	28
Obr. 14:	Pohled na vyplněný otvor prokovu (vlevo správně vyplněný prokov rezistivní pastou; vpravo protržená rezistivní výplň prokovu v průběhu vyrovnání vrstev).	30
Obr. 15:	Mikrovýbrus prokovem po výpalu s patrnou porézní strukturou rezistivní pasty.	31
Obr. 16:	Mikrovýbrus napříč rezistivním prokovem v cik-cak provedení.	31
Obr. 17:	Pohled na pokles materiálu v okolí prokovu a jeho vystoupení a prasknutí.	32

Obr. 18:	Vypálený vzorek před vytvořením drátových propojů (nalevo) a jeho návrh [mm] (napravo).	37
Obr. 19:	Vytvořený model struktury (nahore) a použitá síť bodů pro výpočet (dole).	38
Obr. 20:	Teplotní profily použité pro simulaci.....	38
Obr. 21:	Ekvivalentní stres zlatého (nahore) a hliníkového (dole) mikrodrátku namáhanými teplotou s průběhem dle teplotního profilu A.	39
Obr. 22:	Ekvivalentní pnutí zlatého mikrodrátku po aplikaci tepelné zátěže s teplotním profilem B.	40
Obr. 23:	Rozložení proudové hustoty v řetězci propojů.	40
Obr. 24:	Změna rezistivity spojů od referenčního měření v závislosti na počtu cyklů..	42
Obr. 25:	Zkouška pevnosti v tahu spoje cyklovaného při 550 °C – spoj se během zkoušky přetrhl ve smyčce.	43
Obr. 26:	Závislost pevnosti spojů při destruktivní zkoušce pevnosti v tahu na počtu cyklů při různých teplotách.	43
Obr. 27:	Profily dvou povrchů o ploše 250 000 μm ² (500 x 500 μm) získané 3D skenem stříbrné vrstvy na LTCC neleštěné (vlevo) a leštěné na leštičce smirkovým papírem 2000 (vpravo).	48
Obr. 28:	Ilustrace difúzní a spekulární reflektance dopadajícího světla.	49
Obr. 29:	Schéma paralelního měření SCI a SCE spektrometrem Konica-Minolta CM 3600d.	50
Obr. 30:	Závislost spekulární odrazivosti na vlnové délce: AUI – vakuově napařená zlatá vrstva na LTCC; AUII, AUIII – vakuově napařená zlatá vrstva na korundový substrát; AGI – stříbrná pasta natištěná na LTCC; AI ÷ V – natištěná stříbrná vrstva na korundový substrát; AG0 – natištěná stříbrná vrstva na leštěnou LTCC; AG1 – natištěná stříbrná vrstva na LTCC leštěná plstěným kotoučem; AG3 – natištěná stříbrná vrstva na LTCC leštěná na leštičce smirkovým papírem 2000.	51
Obr. 31:	Závislost odrazivosti na vlnové délce pro materiály Al, Ag a Au [46].	52
Obr. 32:	Příklad pouzdra tvořeného LTCC s vnitřní propojovací strukturou a BGA vývody [50].	55
Obr. 33:	Snímek povrchu použité LTCC Heraeus Hera Lock 2000 pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.	57
Obr. 34:	Snímek povrchu LTCC DuPont Green Tape 951 pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.	58
Obr. 35:	Nalevo – vzorek pro měření OTR (1 ÷ 4 vrstvy), napravo – vzorek pro měření průsaku vzorkem s vyznačenou linií ponoření (6 vrstev) [mm].	59
Obr. 36:	Návrh vzorků pro měření těsnosti pole prokovů s hustotami 49, 36, 25 a 16 prokovů/cm ² . Průměr uveden v [mm].	60

- Obr. 37:** Zleva: Soustava pro měření nasákavosti; nasákavost mezi nedokonale sesouhlasenými vrstvami po 30 min.; nasákavost mezi vrstvami do ponořeného objemu LTCC substrátu po 24 hod. 62
- Obr. 38:** Průsak manganistanu draselného do vícevrstvé struktury LTCC Hera Lock 2000..... 63
- Obr. 39:** Schéma aparatury pro měření prostupnosti kyslíku [55]. 64
- Obr. 40:** Závislost propustnosti kyslíku (OTR) na počtu vrstev základního substrátu LTCC Hera Lock 2000 tvořícího vzorek. 66
- Obr. 41:** Závislost OTR na hustotě prokovů pro čtyřvrstvý substrát LTCC HL2000. 67
- Obr. 42:** Správně sesouhlasený a vyplněný prokov v substrátu HL2000. 68
- Obr. 43:** Špatně vyplněný – protržený; prokov v substrátu GreenTape 951 plněný pastou DuPont 6142D. 68
- Obr. 44:** Prokov v substrátu Green Tape 951 vyplněný pastou 6142 s dutinami a pórovitou strukturou výplně. 69
- Obr. 45:** Správně vyplněný prokov pastou 6142 v substrátu Green Tape 951. 69

Seznam tabulek

Tab. 1:	Maximální pracovní teploty polovodičových součástek podle materiálu [20].	17
Tab. 2:	Maximální pracovní teploty vybraných LTCC substrátů podle změny struktury [23].	18
Tab. 3:	Vybrané parametry vypálené LTCC Heraeus Hera Lock 2000 [29].	21
Tab. 4:	Vybrané vlastnosti substrátu LTCC Heraeus Hera Lock 2000 před a po výpalu. [29].	22
Tab. 5:	Výsledky měření rezistivních prokůvů (3D rezistorů)	33
Tab. 6:	Ukázka výsledků měření odporu a destruktivní zkoušky pevnosti propojů v tahu. Výsledky jsou pro vzorek č. 1, který byl třikrát cyklován při teplotě 550 °C. Použité veličiny: R_1 – odpor propoje před cyklováním; R_2 – je odpor propoje po cyklování; ΔR – je rozdíl R_1 a R_2 ; m – zatížení propoje, při kterém došlo k jeho přetržení.	42
Tab. 7:	Parametry napařování zlaté vrstvy pro odrazivou plochu.	46
Tab. 8:	Průměrné hodnoty hrubosti povrchu nanesených vrstev (A I÷V – natištěná stříbrná pasta na korundovém substrátu; LTCC – vypálený LTCC substrát; AU I – napařená zlatá vrstva na vypáleném LTCC substrátu; AG1 – natištěná stříbrná vrstva na vypálený LTCC substrát leštěná plstěným kotoučem; AG3 – natištěná stříbrná vrstva na vypálený LTCC substrát leštěná smirkovým papírem 2000;)	48
Tab. 9:	Průsak manganistanu draselného do vícevrstvé struktury LTCC Hera Lock 2000	63
Tab. 10:	Výsledky měření OTR LTCC substrátu Heraeus Hera Lock 2000 (neověřený odhad podle trendu šedou barvou).	65
Tab. 11:	Závislost propustnosti kyslíku (OTR) na hustotě prokůvů s průměrem 0,25 mm v substrátu LTCC Hera Lock 2000.	66

Curriculum Vitae

Jméno: Martin Klíma
Narozen: 3. 5. 1987 v Třebíči
Kontakt: klima.martin@seznam.cz

Vzdělání

2011 – dosud

Doktorské studium,
Mikroelektronika a technologie,
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně

2009 – 2011

Magisterské studium,
Mikroelektronika,
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně

2006 – 2009

Bakalářské studium,
Mikroelektronika a technologie,
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně

2002 – 2006

Slaboproudá elektrotechnika,
Střední průmyslová škola technická a střední odborné učiliště technické
Manž. Courierových, Třebíč

Praxe

2014 – dosud

Test Engineer
Honeywell o.z., Brno

2012 – 2013

Tester/Technik
AJ Technology s.r.o., Brno

2011 – dosud

Správa zařízení Wi-Fi sítě
RedNet o. s., Náměšť nad Oslavou

2007 – 2008

Projektant datových vedení
LR Cesaro s.r.o., Brno

Jazyky

Angličtina, Ruština

Dovednosti a znalosti

Tlustovrstvá technologie, povrchová montáž, grafické programování (Agilent VEE, LabVIEW), balancování výroby.

Účast na řešení projektů

- 2011 - 2013 FEKT-S-11-5/962 Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů
- 2013 304/2013 - Implementace simulačního programu ANSYS do výukového procesu.
- 2014 - 2015 FEKT-S-14-2168 Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice