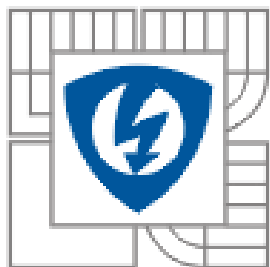


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PROKOVY V NÍZKOTEPLTNÍ KERAMICE

THE VIA INTERCONNECTION IN LTCC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ERIK SEDLIAK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

ING. PETR KOSINA

BRNO 2012

Abstrakt

Práca sa zaoberá problematikou technologických postupov tvorby 3D štruktúr na báze LTCC. Pozornosť je venovaná hlavne tvorbe prokovov, od vyrezania dier až po finalizáciu prokovu. Praktická časť bola zameraná na návrh a zhotovenie série prokovov s rôznymi parametrami a testovanie ich vlastností. Cieľom práce bolo zhodnotiť vplyv parametrov prokovu na jeho funkciu.

Kľúčové slová

LTCC, prokov, 3D štruktúra, HeraLock 2000, priemer prokovu

Abstract

This thesis deals with manufacturing process of LTCC 3D structures. Emphasis is placed mainly on the formation of via interconnections. In the second section of thesis, different via interconnections were designed, created and tested. Aim of this thesis was to evaluate impact of via properties on vias function.

Key Words

LTCC, via interconnection, 3D structure, HeraLock 2000, via diameter

Bibliografická citácia mojej práce:

SEDLIAK, E. *Prokovy v nízkoteplotní keramice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela:

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských osobnostných práv a som si plne vedomý následkov porušenia

V Brne dňa 19.5.2012

.....

PodĎakovanie:

Ďakujem vedúcemu semestrálnej práce, Ing. P. Kosinovi, za cennú pedagogickú a odbornú pomoc pri spracovávaní semestrálnej práce.

Obsah

Úvod.....	6
1 Technologgia LTCC	7
1.1 HeraLock 2000	8
1.1.1 Návrhové pravidlá pre HeraLock 2000	9
2 Technologické procesy výroby	10
2.1 Prokovy.....	11
2.1.1 Prokovy v LTCC	13
2.2 Rezanie otvorov.....	13
2.3 Vodivé pasty a sitotisk.....	14
2.4 Laminácia a výpal.....	15
3 Meranie elektrických vlastností vodivých motívov	18
3.1 Meranie odporu pomocou mostíkových zapojení	19
4 Praktická časť.....	22
4.1 Výroba testovacej štruktúry	23
4.2 Meranie odporu testovacích štruktúr – vplyv priemeru prokovu	27
4.3 Meranie odporu testovacích štruktúr – vplyv technologického procesu	30
4.4 Vyhodnotenie výsledkov	34
Záver.....	35
Zoznam použitej literatúry.....	36

Úvod

Technológia LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic), tzv. nízko-teplotne vypalovaná keramika, sa využíva po vyše 20 rokov na tvorbu multičipových keramických modulov MCM-C (Multichip modules - ceramic). Na začiatku bola nízko-teplotná keramika používaná vo veľkokapacitnej výrobe mikrovlnných zariadení. V poslednej dobe sa LTCC začalo využívať pri výrobe senzorov a jemných mechanizmov vďaka výborným elektrickým a mechanickým vlastnostiam, vysokej spoľahlivosti a stabilite ako aj možnosti tvorby integrovaných 3D mikroštruktúr. Technológia si našla svoje miesto nielen v málosériových výrobách, ale aj vo veľkokapacitných nízkonákladových procesoch. (bezdrôtová technika, automobilový priemysel). Veľkou výhodou tejto technológie je nízka teplota výpalu, ktorá umožňuje použitie bežných tlustovrstvých materiálov čo vedie k možnosti integrácie elektronických komponentov, senzorov, mikrosystémov, chladiacich systémov v jednom module. Neustále sa zvyšujúca precíznosť LTCC si našla uplatnenie aj pri tvorbe mikromechanických systémov MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems).

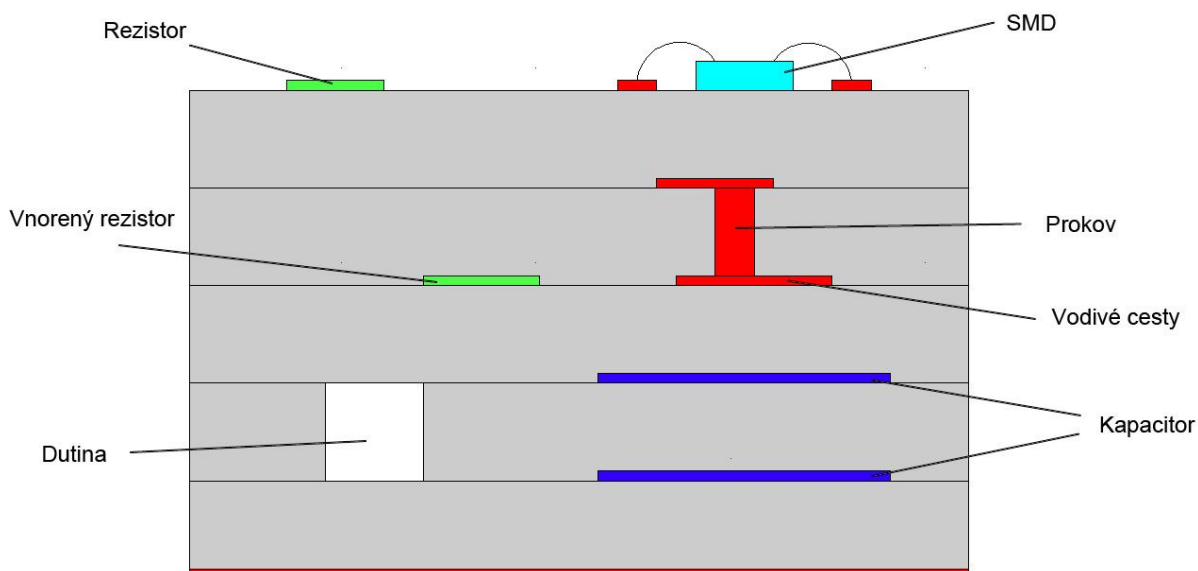
Táto práca sa zaoberá hlavne problematikou prokovov, ich výrobou, ich parametrami a vplyvom na vlastnosti keramickej štruktúry, taktiež sú zhodnotené možnosti merania vlastností keramických štruktúr s prokovmi. V praktickej časti je vytvorená jednoduchá LTCC štruktúra na ktorej sú testované elektrické vlastnosti prokovov.

1 Technológia LTCC

Zakladom LTCC je surová keramická páska umožňujúca skladanie viacerých vrstiev pásy na seba čím dochádza k vytvoreniu 3D štruktúry. Materiály LTCC sú založené na báze organického skla, alebo zmesi skla a keramiky napr. korundu. Vlastnosti keramickej pásy môžu byť modifikované použitím materiálov s odlišnými elektrickými a fyzikálnymi vlastnosťami (napr. piezoelektrické, feroelektrické materiály). Typická štruktúra LTCC sa skladá z dielektrických pásov, spojovacích prokovov, vonkajších a vnútorných vodičov a pasívnych komponentov (napr. rezistory, kapacitory, induktory).

Medzi základné nevýhody technológie LTCC patrí zmršťovanie keramickej štruktúry po výpale a s tým súvisiaca kontrola spomínaného zmršťovania.

Štandardné vodiče, rezistory a kapacitory sú bežne vnorené do štruktúry LTCC. Vodiče a pasívne komponenty sú nanášané sitotiskom čo je typické pre tlustovrstvé technológie. Tlustovrstvé aj tenkovrstvé komponenty je možné vytvoriť na oboch stranách štruktúry.



Obr. 1: Prierez štruktúrou LTCC

Nové materiály (napr. piezoelektrika) a špeciálne techniky boli vyvinuté pre mikrosenzory na báze LTCC. Medzi tieto techniky spadá napr. mikroobrábanie LTCC pásov, tvorba veľmi jemných vodičových čiar atď. Úzke a precízne tenkovrstvé čiary hrajú významnú rolu v miniaturizácii senzorov a mikromechanizmov. Na báze LTCC mikrosenzorov je možné zostrojiť senzory teploty, tlaku, senzory prúdenia plynov a tekutín, plynové senzory atď.

Vlastnosti senzorov a mikromechanizmov silne závisia na teplote a jej distribúcií. Z tohto dôvodu sú často do modulu LTCC implementované chladiace alebo ohrievacie zariadenia. Ohrievače sú vytvorené pomocou bežných odporových alebo vodičových pást natlačených v tvare meandra. Ohrievače na báze platiny bývajú použité na meranie teploty vďaka vysokému TCR (teplotnému koeficientu odporu). Chladiace zariadenia sú často

realizované pomocou teplotne vodivého spojenia dvoch vrstiev. Toto spojenie odvádza teplo z vrstvy ktorú je potrebné chladiť do druhej vrstvy ktorá funguje ako chladič, čím dochádza k poklesu teploty na chladenej vrstve.

Tvorba modelu teplotnej distribúcie vo vnútri štruktúry LTCC je dôležitá kvôli zachovaniu ideálnej funkcie a parametrov modulu LTCC. Hlavnou nevýhodou nízko-teplotnej keramiky je nízka tepelná vodivosť. V porovnaní s korundovou keramikou je tepelná vodivosť až rádovo nižšia. Tepelný manažment môže byť riešený napríklad konvekčným prúdením po strane zariadenia alebo vedením tepla cez substrát k odvádzачu tepla na spodnej strane substrátu

Keďže tepelný management sa zaoberá a zohľadňuje kompletnú cestu tepla od jeho zdroja až po jeho odvádzач, je nutné zohľadniť špecifikácie celého systému. V praxi sú bežne používané prídavné tepelné trubice a vysoko tepelne vodivé prokovy. Kombinácia týchto techník umožňuje teplo prenášať a rozptylovať do okolia kde je jednoduchšie teplo odstrániť.

Tepelná trubica je hermeticky uzatvorená trubica, v ktorej sa nachádza pracovná kvapalina, v bežných prípadoch voda, pri definovanom tlaku. Zahrievanie jedného konca trubice a ochladzovanie druhého konca spôsobuje, že na zahrievanom konci trubice dochádza k odparovaniu kvapaliny, pary trubicou prechádzajú na chladiaci koniec, tu skondenzujú naspäť do kvapalného skupenstva a samospádom, alebo vzlínaním cez absorpčnú látku prechádza kvapalina späť na zahrievaný koniec, kde znova dochádza k odparovaniu. Celý cyklus je závislý na rozdieloch teplôt na koncoch trubice. So zvyšujúcim sa rozdielom teplôt rastie aj účinnosť prenosu tepla. Touto metódou je možné realizovať prenos tepla na relatívne veľké lineárne vzdialenosti s takmer zanedbateľným kolísaním teploty pozdĺž celej dĺžky trubice.

Kvôli nízkej teplotnej vodivosti substrátu, vzniká medzi štruktúrou a odvádzачom tepla tepelný odpor dosť veľký nato aby viedol k vzniku neprípustnej teploty na spoji. Jednou z používaných metód na zníženie medzivrstvového odporu je vytvorenie tepelných prokovov ktoré prechádzajú od štruktúry cez substrát až k odvádzачu teploty.

Tepelné prokovy sú v podstate identické s vertikálnymi elektrickými prepojeniami. Zvyčajne bývajú striedavo usporiadané tak aby zaplňovali čo najväčšiu plochu pod chladeným systémom. Rozstupy medzi prokovmi vo väčšine prípadov udáva výrobca substrátu tak, aby nedochádzalo k nadmernému mechanickému napätiu v keramickom materiáli, ktoré môže spôsobovať trhliny v keramike počas výpalu alebo počas prevádzky zariadenia.

1.1 HeraLock 2000

HeraLock 2000 je bezolovnatý a bezkadmiový keramický páskovaný materiál s vlastnosťami vhodnými pre bežné procesy, automobilovú elektroniku a RF aplikácie vyžadujúce nízke straty pri frekvenciách minimálne 6GHz.[2] Hlavnou výhodou pásky HeraLock 2000 je jej jedinečná zmršťovacia charakteristika počas výpalu. Väčšina bežne používaných pásek zmršťuje svoj plošný rozmer obdobne ako svoju hrúbku.

Oproti tomu, HeraLock 2000 zmršťuje hlavne svoju hrúbku, pričom ostatné dva rozmery vykazujú takmer nulové zmršťovanie. Pri vysokoformátových spracovaniach (substráty o rozmere 152mm x 152mm) býva zmršťovanie za použitia bežného teplotného

profilu výpalu 0.114% +/- 0.014%.[2] Vďaka tomu je HeraLock 2000 vhodná na tvorbu štruktúr s vnútornými dutinami nakoľko nedochádza k deformáciám počas procesu výpalu.

Vo svojej surovej podobe sa s páskou HeraLock 2000 zaobchádza obdobne ako s bežnými typmi pások. Jediná zmena spracovávania v porovnaní s bežnými páskami je mierne dlhší teplotný profil výpalu.

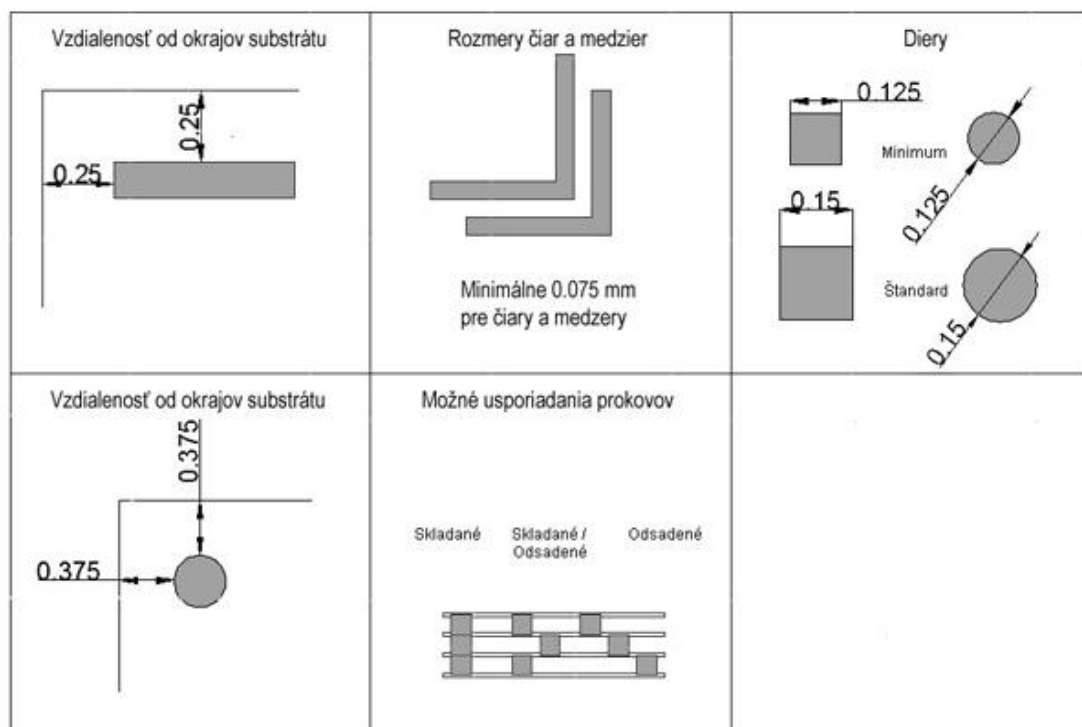
1.1.1 Návrhové pravidlá pre HeraLock 2000

Jedná sa o výrobcom vydávaný súbor inštrukcií zahrňujúci limity a pravidlá pre tvorbu motívov, možnosti daného materiálu ako aj odporúčaný spôsob spracovania pre dosiahnutie optimálnych vlastností.

Základné návrhové pravidlá[8]	Bežne	Poznámka
Substrát		
Rozmery substrátu	20cm x 20cm	
Počet vrstiev	3 až 24	
Hrúbka po výpale	Minimálne 0.1mm	
Diery		
Priemer diery v surovom stave	Záleží na hrúbke pásy	Priemer diery by mal byť $\geq$ ako hrúbka pásy
Vzdialenosť dvoch dier	Minimálne 0.5mm	
Záchytné plôšky	2x priemer diery	
Okraj diery po okraj súčiastky	Minimálne 0.375mm	
Okraj diery / plôšky po vodivú čiaru	Minimálne 0.25mm	
Vodivé spojenia		
Šírka tlačenej čiary	0.1 – 0.2mm	Minimálne 0.075mm
Medzera medzi čiarami	0.1 – 0.2mm	Minimálne 0.075mm
Okraj súčiastky od čiary	Minimálne 0.25mm	
Dutiny		
Tvar dutín	Obdĺžnikový, štvorcový	
Hrúbka vrstvy pod dutinou	Minimálne 0.25mm	

Možnosť tvorby dutín je výrazne závislá na použitej vypalovacej peci, na spôsobe tvorby dutín ako aj iných parametroch spracovania.

Výrobca pre LTCC pásku HeraLock 2000 udáva aj odporúčaný spôsob tvorby prokovov, prvým krokom je vyrezanie diery ktorá je následne vyplnená prokovovou pastou a v ďalšom kroku je na vyplnenú diery vytvorený vodivý motív.

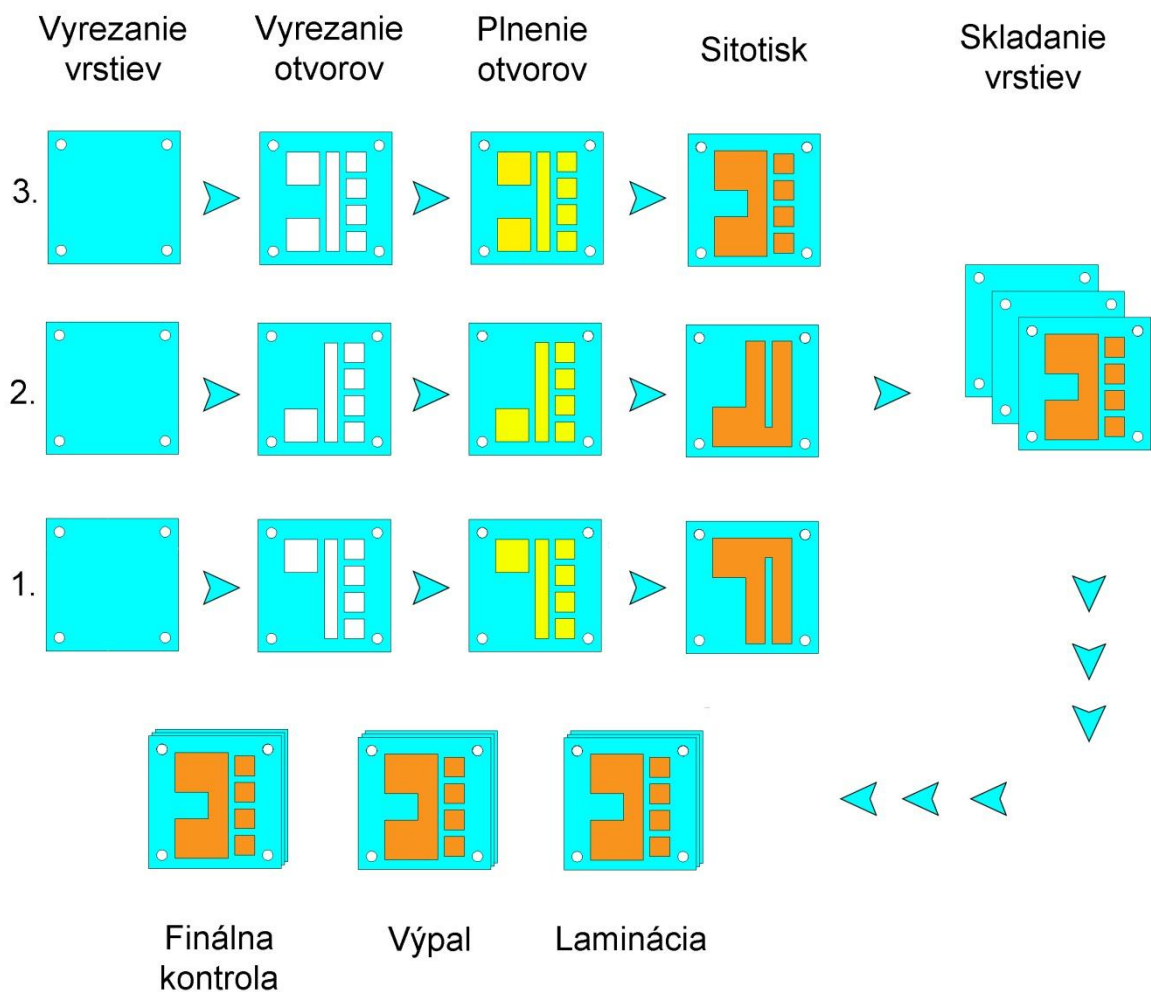


Obr. 2 : Základné návrhové pravidlá pre vodivé čiary a diery

2 Technologické procesy výroby

Obrázok č.3 znázorňuje postup spracovávaní LTCC. V prvom kroku je páska narezaná na požadované rozmery a zároveň sú vytvorené strediacie značky. Prepojovacie diery a iné otvory sú potom vyrezané do jednotlivých vrstiev. Prepojovacie diery, prokovy sú vyplnené vodivou pastou. V nasledujúcom kroku sú pomocou sitotisku nanesené vodivé cesty a pasívne komponenty. Po dokončení sitotisku sú vytvorené technologické otvory buď pomocou automatických dierovačov alebo laserom.

Všetky nanesené vrstvy sú naskladané na seba a zalaminované použitím jednoosového alebo izostatického laminátoru. Nasleduje proces vypálenia, ktorý obyčajne prebieha dvojfázovo. V prvom dôjde k vyhoreniu organického pojiva, v druhom dochádza k zhutneniu keramického materiálu. Po vypálení je možné pripojiť ďalšie aktívne alebo pasívne súčiastky na vrchnú aj spodnú stranu vytvorenej štruktúry.



Obr. 3: Technologický proces spracovania LTCC

2.1 Prokovy

Pri bežnom technologickom procese tvorby viacvrstvovej dosky plošných spojov sú vrstvy medenej fólie prepojované pomocou prechodných dier alebo prokovov. Obidve tieto štruktúry sú dierami v lamináte s vodivou medenou vrstvou a tvoria vodivé spojenie medzi dvoma alebo viacerými vodivými vrstvami. Rozdiel medzi prechodnou dierou a prokovom spočíva v ich špecifickom využití.

Prechodná diera je dimenzovaná tak, aby umožňovala prechod vývodu určitého komponentu z jednej strany DPS na druhú stranu, napr. z dôvodu možnosti pripájania komponentu k DPS. Zámerom prokovu je iba vytvoriť vodivé spojenie dvoch bodov obvodu ktoré sú na rozdielnych vodivých vrstvách. Z tohto dôvodu sú prokovy za bežných podmienok priemerom menšie ako prechodné diery.

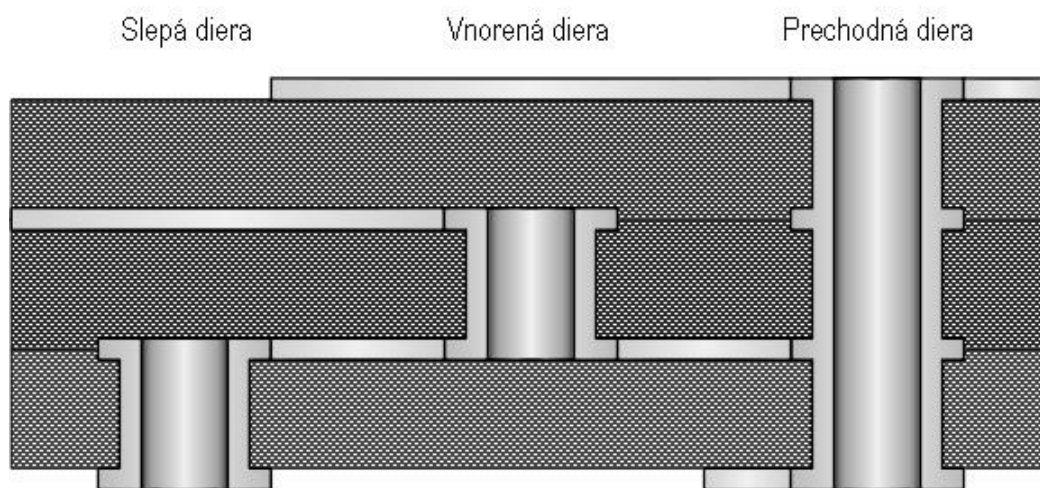
Prechodné diery sú vyžadované iba v prípade použitia vývodových súčiastok. Pokiaľ sú na doske plošných spojov použité iba SMD súčiastky, prechodné diery sa nepoužívajú. V tomto prípade sú SMD komponenty priamo pripájané na kontaktné plošky na povrchu DPS.

Na rozdiel od prechodných dier, prokov nemusí prechádzať z jednej strany DPS na druhú. Prokov môže spájať dve vrstvy vo vnútri DPS a nemusí byť vôbec viditeľný na povrchu dosky plošného spoja. Takýto prokov je nazývaný slepým prokovom.

Diery cez dosku plošných spojov sú v bežných prípadoch vŕtané pomocou malopriemerových vŕtákov potiahnutých karbidom volfrámu. Karbid volfrámu je často používaný pretože mnoho materiálov používaných ako základ DPS je drsných a vŕtanie musí prebiehať pri vysokých otáčkach aby bolo efektívne. Vŕtáky musia ostať ostré aby nedochádzalo k poškodeniu alebo trhlinám vytvoreného motívu. Z toho dôvodu nie je vhodné využívať vŕtáky z ocele ktoré sa rýchlo tupia a tým pádom poškodzujú vodivé vrstvy na doskách. Proces vŕtania je bežne uskutočňovaný pomocou automatizovaných vŕtacích zariadení, riadených pomocou počítačom generovaných výstupných vŕtacích súborov. Tento vŕtací súbor popisuje umiestnenie a veľkosť jednotlivých dier určených k vŕtaniu. Vytvorené diery sú základom vodivých alebo tepelných spojení na opačných stranách DPS.

Pokiaľ sú požadované veľmi malé prokvy, je vŕtanie pomocou mechanických vŕtákov drahé, kvôli vysokému opotrebovávaniu a prípadnému lámaniu vŕtákov. V tomto prípade sú prokvy tvorené za pomoci laseru. Takto vytvorené prokvy majú bežne povrch nižšej kvality vo vnútri vytvorenej diery.

Takisto je možné pomocou vŕtania s kontrolovanou hĺbkou, laserového vŕtania alebo predvŕtaním jednotlivých vrstiev DPS pred lamináciou, vytvoriť diery ktoré spájajú iba niektoré medené vrstvy. Tieto diery sa nazývajú slepými ak spájajú vnútornú vrstvu s vonkajšou, alebo vnorené ak spájajú dve alebo viaceré vnútorné vrstvy bez spojenia s vonkajšou vrstvou.



Obr. 4: Zhrnutie jednotlivých typov dier

2.1.1 Prokovy v LTCC

Pokovené diery, prokovy slúžia ako elektrické, po prípade tepelné prepojenie medzi dvoma rozdielnymi vrstvami danej 3D štruktúry. Pri tvorbe moderných LTCC štruktúr nie je neobvyklé použitie vysokého počtu vrstiev keramiky a z toho plynúce množstvo prokovov, pohybujúce sa rádovo v tisíckach.

Prokov vzniká vyplnením vyrezanej diery vodivou pastou. Tieto diery sú zvyčajne vyplňané pomocou šablonového tisku. Šablonový tisk je obdobou sitotisku, základným rozdielom je použitie pevnej šablony namiesto sita (napr. oceľová, medená fólia). Šablóna by mala kopírovať rozmery diery zväčšené o 10-20 % čo sa prejaví pri plnení otvoru. Po pretlačení pasty šablónou dôjde k vyplneniu diery pastou a zároveň na okraji diery ostane malá vrstva pasty ktorá zabezpečuje istotu vodivého spojenia prokovu a následne nanášaného vodivého motívu.

Vlastnosti prokovu závisia aj na geometrických parametroch diery. Diera so zmenšujúcim sa priemerom má za následok prokov s vyšším odporom ako prokov vytvorený z rovnomernej diery. Takisto diery s nepravidelným okrajom resp. opálenými hranami môžu mať za následok nedostatočné vyplnenie diery pastou, alebo narušovať celistvosť výplne, čo sa takisto môže negatívne prejsť na charakteristikách vytvoreného prokovu.

Na prokovy sú často kladené protichodné požiadavky. So zvyšujúcou sa hustotou zapĺňania plochy substrátu je ideálne minimalizovať priemery prokovov. Táto miniaturizácia však limituje primárnu funkciu prokovu, tj. zabezpečenie vodivého spojenia vrstiev pre ktoré by boli vhodné pokovené diery väčších priemerov. V praxi je často nutné sklbiť tieto požiadavky. Bežné rozmery prokovov sa pohybujú v rozmedzí 0,1 mm až 0,3 mm, keďže sa jedná o relatívne malé rozmery, ktoré ale výraznejšie neobmedzujú vodivé charakteristiky prokovu.

Zmenšovanie rozmerov prokovov má za následok zvýšenie nárokov po stránke dizajnu, materiálov, ich spracovania a technologického vybavenia. Vo viacvrstvových LTCC štruktúrach sú bežne využívané záchytné plôšky ktoré zabezpečujú spojenie dvoch susedných vrstiev prokovom, kvôli možnému vzájomnému posunu vrstiev.

Nadrozmerne záchytné plôšky však zvyšujú minimálne rozlíšenie a tým pádom znižujú hustotu prepojení. Následne aby bolo možné využiť výhody plynúce zo stále sa zmenšujúcej šírky vodivých ciest, je potrebné minimalizovať rozmery záchytných plošiek. Cieľom je vytvoriť prokovy bez potreby použitia týchto plošiek.

2.2 Rezanie otvorov

Diery na prokovy bývajú bežne mechanicky vyrazené alebo vyrezané laserom. Laserová technológia predstavuje efektívnu a nízkonákladovú metódu spracovania vrstiev LTCC keramiky nakoľko je možné naraz vyrezať jednotlivé vrstvy a diery na prokovy.

Mechanické razenie dier na prokovy prebieha na dierovacích strojoch. Konečný priemer vyrezanej diery býva zvyčajne o 12,5 μm väčší ako priemer použitého dierovača. Použitie dierovačov s priemerom menším ako 100 μm je problematické bez použitia špeciálneho

náradia. Výroba kvalitných otvorov pomocou mechanických dierovačov silne závisí od správneho zarovnania dierovača a substrátu. Pokiaľ tieto komponenty nie sú správne zarovnané, klesá kvalita diery, vzniká riziko poškodenia substrátu a takisto je možné že dôjde k poškodeniu dierovača.

Diery vyrazené dierovacími strojmi mávajú väčší priemer na spodnej strane substrátu ako na vrchnej. Tento jav je spôsobený samotnou podstatou technológie dierovacích strojov, keďže sa jedná o mechanickú operáciu.

Pri laserovom vŕtaní dier do vrstvy LTCC keramiky, je zaostrený laserový lúč opakovane rastrovaný po požadovanom okraji diery. Laserová energia rozruší štruktúru čím dôjde k vytvoreniu požadovaného rozmeru diery. Pri vŕtaní je potrebné dbať na správne nastavenie rýchlosti pohybu a intenzity laserového lúča. Pri nízkej intenzite často nedôjde k úplnému prerezaniu substrátu a je potrebné celý proces opakovať. Opakovaný proces zas negatívne ovplyvňuje vlastnosti diery, nakoľko dochádza k opaľovaniu okrajov diery, a vzniku nepravidelného okraja.

Odchýlka hlavy laseru od kolmej polohy vzhľadom na substrát, má za následok vytvorenie kónického tvaru diery, tj. diera má menší priemer na spodnej strane ako na vrchnej. So zväčšujúcou sa hrúbkou použitého substrátu je tento defekt výraznejší.

2.3 Vodivé pasty a sitotisk

Podľa využitia a umiestnenia jednotlivých tlustovrstvých komponentov je vhodné prihliadať na vlastnosti samotných pást. Vodivé motívy ktoré majú plniť kontaktovaciu funkciu je vhodné vytvoriť pomocou pást ktoré umožňujú pájanie, pri komponentoch vnorených do štruktúry LTCC je výhodnejšie použiť pasty ktoré pájanie neumožňujú. V praktickej časti tohto projektu boli použité tri pasty od firmy Heraeus.

Tab. 1 : Zhrnutie parametrov vodivých pást pre LTCC[10][11][12]

Názov	TC0307	TC0306	TC0308
Využitie	Vodivé motívy, nepájiteľná	Vodivé motívy, pájiteľná	Výplň na prokovy
Tlač, mesh sita	280-400	290-400	Šablónovým tiskom
Sušenie [min] pri 80°C	10-20	10-20	10
Hrúbka vrstvy	20-25µm	15-21 µm	—
Rozlíšenie	≥100µm	100µm	—

TC0307 je čisto strieborná vodivá pasta s nízkou rezistivitou a vynikajúcim rozlíšením pre tlač jemných vodivých čiar. TC0307 poskytuje výbornú kompatibilitu s HeraLock 2000.

Pasta je optimalizovaná pre sitotisk na tvorbu vodivých motívov. Pastu nie je možné kontaktovať pomocou pájania.

TC0308 je čisto strieborná vodivá pasta primárne určená na tvorbu výplní prokovov. TC0308 poskytuje výbornú kompatibilitu s HeraLock2000 a Clad CT8000 počas procesu výpalu. Výsledkom výpalu je husto zaplnený prokov.

TC0306 je čisto strieborná vodivá pasta s nízkou rezistivitou a vynikajúcim rozlíšením pre tlač jemných vodivých čiar. TC0306 bola navrhnutá pre tvorbu vodivých motívov na vrchnej vrstve. Pasta poskytuje vynikajúcu pájitelnosť a príľnavosť pri použití HeraLock 2000.

Sitotisk je najbežnejším spôsobom vytvárania tlustých vrstiev na substráte. Proces spočíva v pretlačení vodivej pasty cez sito s vytvoreným obrazcom na podložku. Sito je napnuté na kovovom ráme približne 1mm nad uchytenou podložkou. Táto vzdialenosť sa nazýva odtrh. Na sito sa nanese určité množstvo vodivej pasty, ktorá je pomocou stierky pretlačená cez sito, čím dôjde k naneseniu motívu na substrát.

Pomocou sitotisku je možné v LTCC integrovať pasívne komponenty či už vo vnútri alebo na povrchu modulu. Vnorené prvky sú tvorené buď ako plošné (2D) alebo priestorové (3D). Napriek tomu sú ich základné elektrické vlastnosti rovnaké.

- Rezistory – základné hodnoty rezistivity sa pohybujú od $10\Omega/\square$ po $1M\Omega/\square$ pre vonkajšie rezistory a od $10\Omega/\square$ do $100k\Omega/\square$ pre vnorené rezistory. Hodnoty odporu vnorených rezistorov je možné upraviť trimovaním laserom cez jednu tenkú vrstvu. Inou možnosťou je trimovanie pomocou vysokonapäťových pulzov. V tomto prípade je možné rezistory trimovať bez potreby diery.
- Kapacity – kapacitory je možné natlačiť a vypáliť s presnosťou 10%–20%. Základná hodnota kapacitancie sa pohybuje až do $70pF/cm^2$. LTCC kapacity je možné vytvoriť nasledujúcimi spôsobmi :
 - elektródami na oboch stranách pásky
 - dierou vyplnenou materiálom s vysokou permitivitou
 - tenkou páskou s vysokou permitivitou
- Induktory – Induktory je možné realizovať ako plošné záhyby alebo viacvrstvové štruktúry. Plocha potrebná k dosiahnutiu určitej indukčnosti závisí na konkrétnom návrhu štruktúry. (počet vrstiev, hrúbka vrstiev, počet závitov atď.)[1]

2.4 Laminácia a výpal

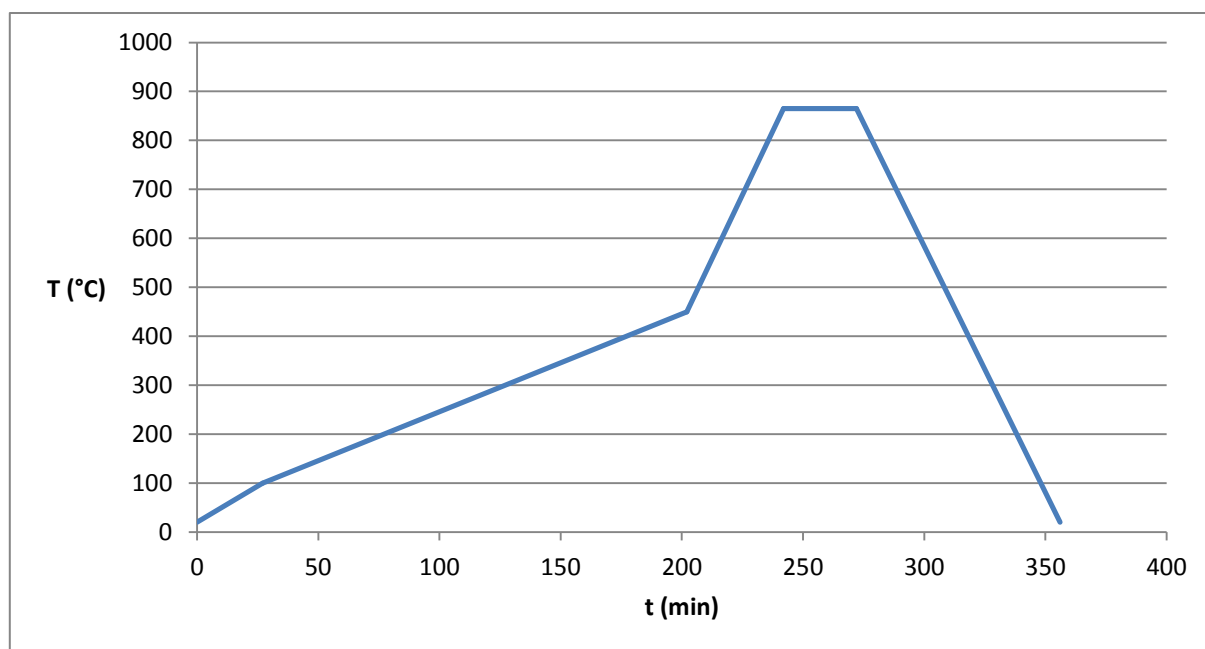
Laminácia je proces pri ktorom dochádza k vytvoreniu 3D štruktúry z jednotlivých plošných vrstiev s vytvorenými vodivými, odporovými motívami atď. Laminácií by mala predchádzať optická kontrola každej vytvorenej vrstvy LTCC tak, aby boli nevyhovujúce vrstvy identifikované a mohli byť vyradené. Všetky vyhovujúce vzorky sú následne naskladané na seba.

Najjednoduchším spôsobom je naskladať jednotlivé vrstvy na seba pomocou podporných dosiek osadených strediacimi kolíkmi. V masových produkciách špeciálne skladacie zariadenia dosahujú presnosť naskladania niekoľko mikrometrov. Naskladané LTCC vrstvy sú v ďalšom kroku zalaminované. V praxi sú bežne používané dve techniky : anaxiálna laminácia, kde sú naskladané LTCC vrstvy stlačené medzi dve paralelné zahriate dosky. Nevýhodou tejto techniky sú väčšie odchýlky šírky substrátu po výpale, nakoľko dosky nie je možné nastaviť na sto percent paralelne. Ďalším problémom pri anaxiálnej laminácii je tvorba dutín. Požadované dutiny sú pri anaxiálnej laminácii deformované pôsobením tlaku iba na okraje dutín. Alternatívnou metódou je izostatická laminácia. Pri tomto procese je využitá voda zahriata na 80 °C ktorá slúži ako médium na rovnomernú distribúciu tlaku pri laminácii. Substráty sú naskladané na opornej doske a následne zapečatené v pružnom vzduchotesnom púzdre. Tento proces minimalizuje delamináciu vzoriek, ako aj zjednocuje zmršťovanie čo je veľkou výhodou pri tvorbe komplexnejších štruktúr. Takisto je možné do dutín vsunúť podporné laminačné výplne ktoré zabezpečujú presnosť tvaru dutiny.

Výsledkom správne zrealizovanej laminácie je rovnomerná 3D štruktúra bez viditeľných dutín, trhlín alebo iných chýb. Pred aj po laminácii je odporúčané vytvorené vzorky vizuálne skontrolovať.

Výpal je proces pri ktorom dochádza k vyhoreniu organického pojiva v keramickom substráte a následnému zhutneniu keramického materiálu. Výpal by mal prebiehať v komorovej peci. Odporúčaný teplotný profil výpalu: 3.0°C/min do 100°C, 2.0°C/min do 450°C, 8-10°C/min do 865°C, udržiavanie teploty počas 20-30 minút. Rýchlosť ochladzovania by mala byť 6-10°C/min.[8] Výpal je vhodné realizovať na rovnej podložke s minimálnym kontaktom so substrátom. So zvyšujúcim sa počtom vrstiev by mal byť znížený sklon nárastu teploty pre rovnomernejší výpal.

Po ukončení výpalu je možné pripojiť prídavné aktívne alebo pasívne SMD komponenty na obidve strany vytvorenej 3D štruktúry. Za týmto účelom je bežne používané pájanie, kontaktovanie mikrodrátkami, alebo pripojenie súčiastky ako flip chip.

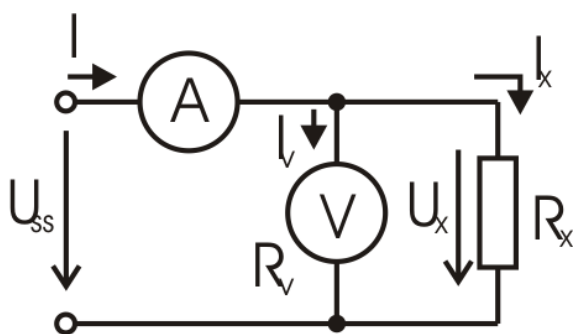


Graf 1. : Teplotný profil výpalu pre HeraLock 2000

3 Meranie elektrických vlastností vodivých motívov

V praxi existujú rôzne metódy merania elektrických vlastností, líšiace sa zložitou merania, presnosťou merania, množstvom potrebného vybavenia atď. Elektrický odpor je možné merať priamo pomocou ohmmetrov alebo RLC mostov. Častým princípom merania odporu je meranie napätia a prúdu na záťaži a z nich je stanovený elektrický odpor.

Najjednoduchším spôsobom merania elektrického odporu je priama metóda vychádzajúca z Ohmovho zákona. Pre meranie malých odporov je vhodné použiť zapojenie z obrázku 3.



Obr.5 : Schéma zapojenia pre meranie malých odporov priamou metódou

Ampérmeter meria súčet prúdov prechádzajúcich meraným odporom a voltmetrom.

$$I = I_x + I_v \quad (3.1)$$

Voltmeter meria priamo napätie na meranom odpore. Z toho je možné odvodiť vzťah pre výpočet požadovaného odporu:

$$R_x = \frac{U_x}{I - I_v} \quad (3.2)$$

Pre prúd pretekajúci voltmetrom platí :

$$I_v = \frac{U_x}{R_v} \quad (3.3)$$

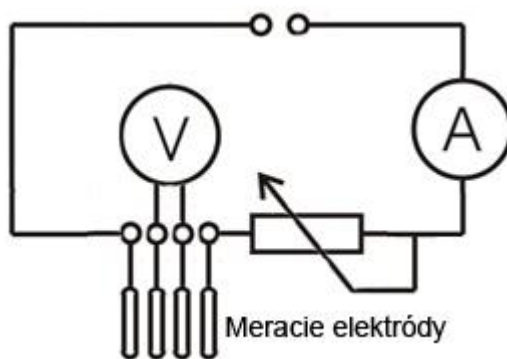
Pri výpočte je vhodné korigovať hodnotu prúdu pretekajúceho voltmetrom. Súčasne používané voltmetre využívajú vnútorný odpor pohybujúci sa rádovo v $M\Omega$, čiže pri meraniach malých odporov, rádovo jednotky Ω je možné korekciu prúdu pretekajúceho voltmetrom zanedbať.

Ďalším spôsobom merania elektrického odporu je štvorbodová metóda. Táto metóda patrí medzi najpoužívanejšie metódy merania malých hodnôt odporu. Jedná sa o zložitejšiu

metódu merania, ktorá poskytuje presnejšie výsledky ako priama metóda. Meranie prebieha pomocou štyroch meracích hrotov / elektród.

Dva krajné hroty slúžia ako prúdové, dva vnútorné ako napäťové. Vzďialenosť medzi kontaktmi sú typicky rovnaké kvôli zjednodušeniu následného výpočtu. Štandardne sa vzdialenosť hrotov pohybuje okolo 1 mm. Cez pár prúdových svoriek je do testovaného vzorku pustený testovací prúd.

Pomocou voltmetru je merané napätie na vnútorných, napäťových svorkách. Prúd ktorý prechádza napäťovými svorkami je spravidla dosť malý nato, aby ho bolo možné zanedbať. Pokles napätia je takisto zanedbateľný, takže napätie zmerané voltmetrom je v podstate rovnaké ako napätie na meranom vzorku. Vo výsledku takto môžeme stanoviť hodnotu odporu s vyššou presnosťou. Je vhodné pripojiť napäťové svorky čo najbližšie k meranému vzorku aby sa predišlo sčítaniu ich odporu s odporom testovaného vzorku.



Obr. 6: Schéma zapojenia štvorbodovej metódy merania odporu

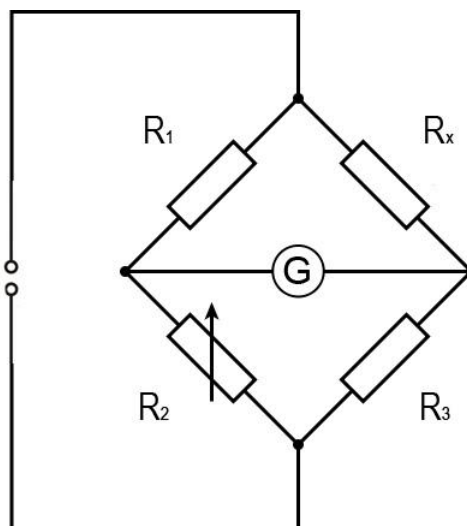
3.1 Meranie odporu pomocou mostíkových zapojení

Jedným z ďalších spôsobov merania odporu je meranie pomocou mostu. Jedná sa o elektrický obvod kde sú dve elektrické paralelné vetvy premostené treťou vetvou približne v strede stanovených paralelných vetiev. Jedná sa o relatívne jednoduchú metódu merania vzhľadom k poskytovanej presnosti merania.

Medzi najznámejšie mostové zapojenia patrí tzv. Wheatstoneov most, ktorý našiel využitie pri meraní neznámych hodnôt odporu. Zapojenie pozostáva zo štyroch rezistorov z ktorých dva majú známu hodnotu odporu, jedného ktorého hodnota odporu je zisťovaná a jedného kalibrovaného rezistoru s pohyblivou hodnotou odporu.

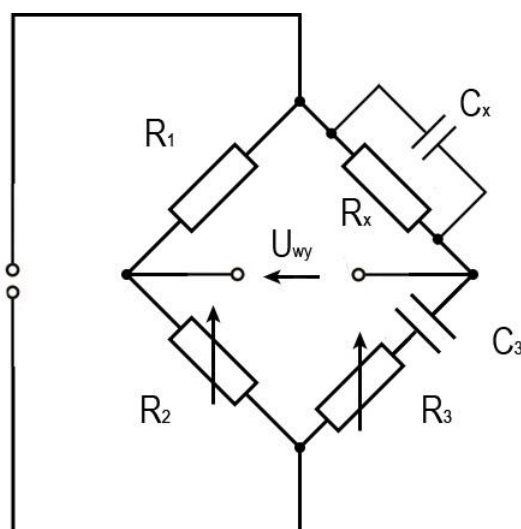
Dva opačné uzly sú pripojené na zdroj elektrického prúdu, medzi dva zvyšné uzly je pripojený galvanometer. Pomocou premenného rezistoru je nastavená nula na ukazovateli galvanometru.

V tomto momente je pomer medzi premenlivým rezistorom a susediacim rezistorom je rovný pomeru neznámeho rezistoru a jeho susediaceho rezistoru čo umožňuje výpočet hodnoty odporu neznámeho rezistoru.



Obr. 7: Schéma zapojenia Wheatstoneovho mostu

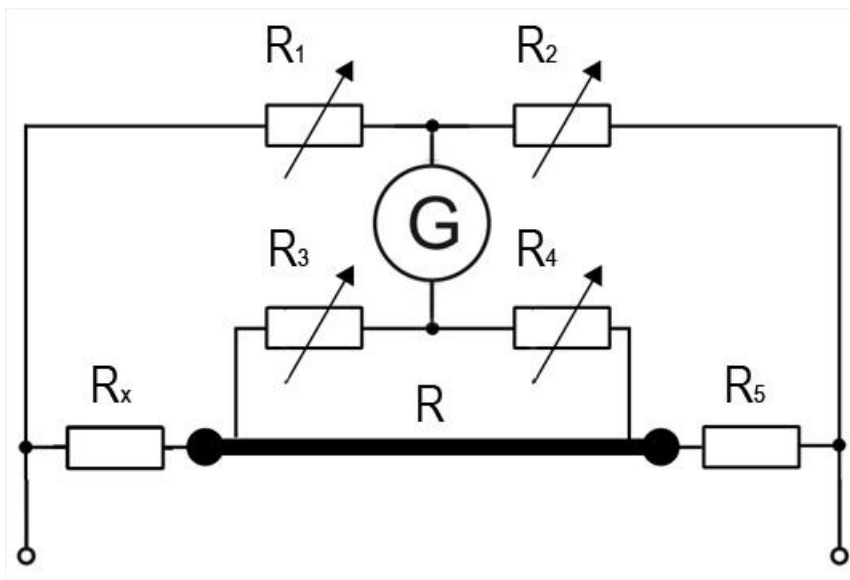
Existuje niekoľko modifikácií základného Wheatstoneovho mostu ako napr. Wienov most : jedná sa o zapojenie pozostávajúce zo štyroch rezistorov a dvoch kondenzátorov. Wienov most je bežne používaný na meranie kapacitancie. Wienov most nevyžaduje presné hodnoty rezistorov R ani kondenzátorov C . Pri určitej frekvencii sa reaktancia vetvy sériového zapojenia $R_3 C_3$ bude rovnat' presnému násobku reaktancie vetvy $R_x C_x$. Ak budú zvyšné dva rezistory R_2 a R_1 nastavené na rovnaký násobok, potom je most vybalansovaný.



Obr. 8: Schéma zapojenia Wienovho mostu

Ďalším často využívaným zapojením na báze Wheatstoneovho mostu je tzv. Thomsonov most, často nazývaný aj Kelvinov most alebo Kelvinov dvojité most. Jedná sa o meracie zapojenie určené k meraniu neznámeho elektrického odporu menšieho ako 1Ω . Funguje na podobnom princípe ako Wheatstoneov most, s rozdielom v prídavých rezistoroch.

Zapojenie porovnáva pomery odporov vo vonkajšej R_1 R_2 vetve a vo vnútornej R_3 R_4 vetve, z čoho aj plynie názov dvojitého most. Galvanometer slúži ako detektor rovnováhy medzi dvoma vetvami zapojenia, odpor R_5 je štandardný rezistor s malým odporom, ktorý znižuje vplyv poklesov napätia na presnosť merania. R predstavuje odpor vodivého spojenia medzi R_5 a R_x .

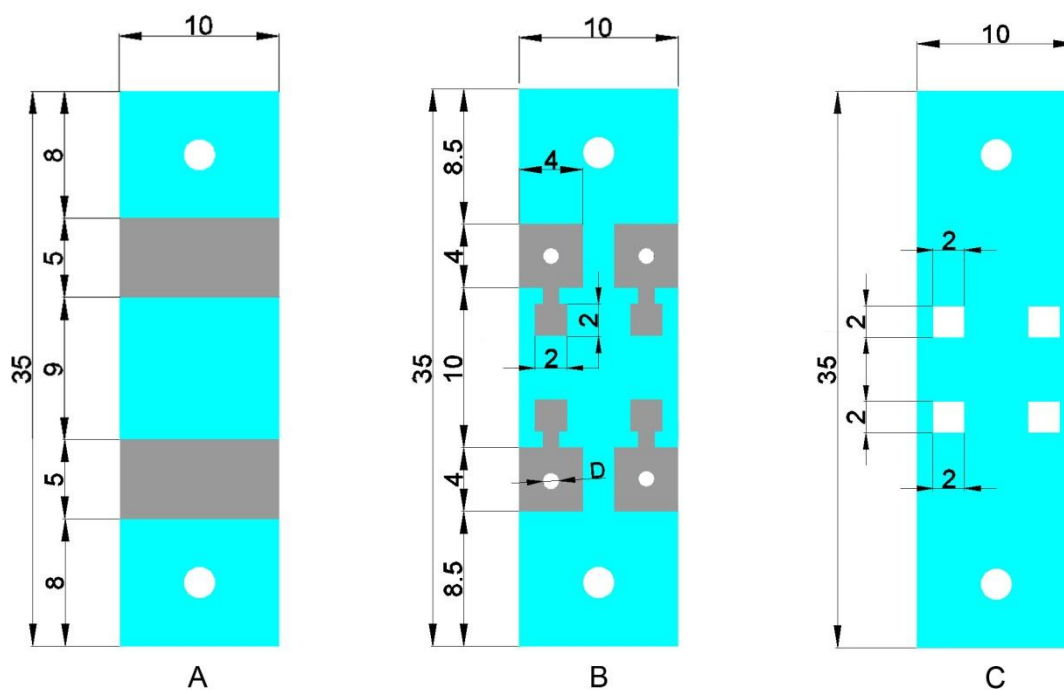


Obr. 9: Schéma zapojenia Thomsonovho (Kelvinovho) mostu

4 Praktická časť

Praktická časť bakalárskej práce bola rozdelená na dve samostatné časti. Cieľom prvej časti projektu bolo zhodnotiť vplyv priemeru prokovu na elektrické vlastnosti prokovu. Druhá časť sa zaoberala porovnávaním technologického procesu výroby prokovov odvodeného z procesu používaného pri výrobe DPS (tzn. na surový substrát bol vytvorený vodivý motív a doňho následne vytvorený prokov) nakoľko sa v určitých prípadoch môže jednať o vhodnejší spôsob tvorby prokovov ako oficiálny spôsob ktorý udáva výrobca.

Obidve merania boli vykonané na testovacej štruktúre ktorej základom boli substráty HeraLock 2000 o rozmere 35 x 10 mm. Testovacia štruktúra pozostávala z troch vrstiev, spodnej vrstvy ktorá slúži ako vodivé spojenie medzi dvoma prokovmi, strednej vrstvy ktorá obsahuje samotné prokovy s vytvorenými kontaktnými ploškami a vrchnej vrstvy ktorá slúži ako krycia vrstva opatrená otvormi na kontaktné plošky.



Obr. 10: Návrh jednotlivých vrstiev testovacej štruktúry

Obrázok 10 názorne zobrazuje jednotlivé vrstvy :

- vrstva A – spodná vrstva zabezpečujúca vodivé spojenie
- vrstva B – vrstva s prokovmi a ploškami
- vrstva C – krycia vrstva

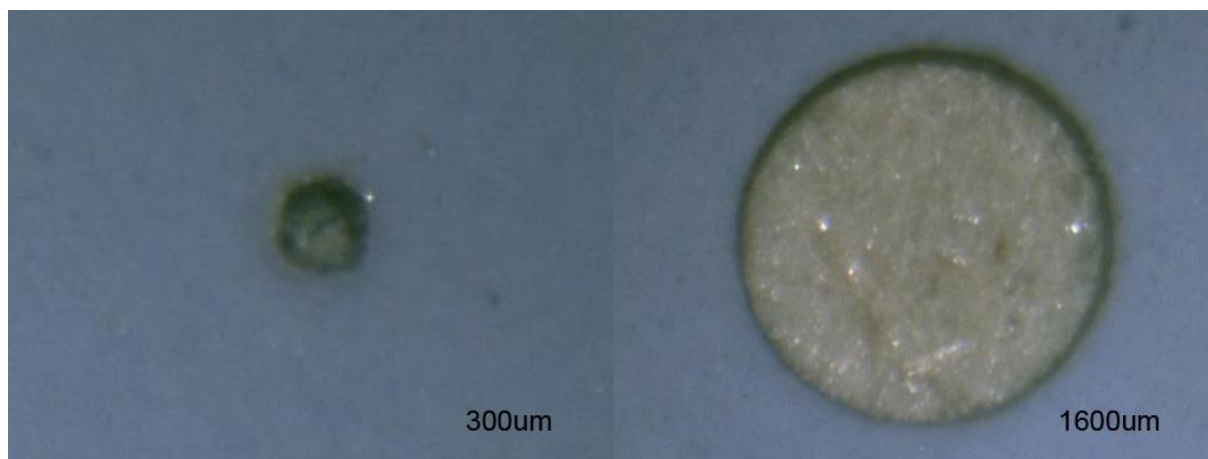
Prokovy boli realizované v 14tich rôznych priemeroch (od 200 μm do 1000 μm s prírastkom 100 μm , od 1200 μm do 2000 μm s prírastkom 200 μm) v počte 5 vzoriek pre každý realizovaný priemer prokovu, tj. celkom 70 vzoriek. Na každej vzorke boli vytvorené 4

prokovy ktoré tvoria dva samostatné vodivé systémy. Tento systém pozostáva z dvoch prokovov a ich vzájomného prepojenia.

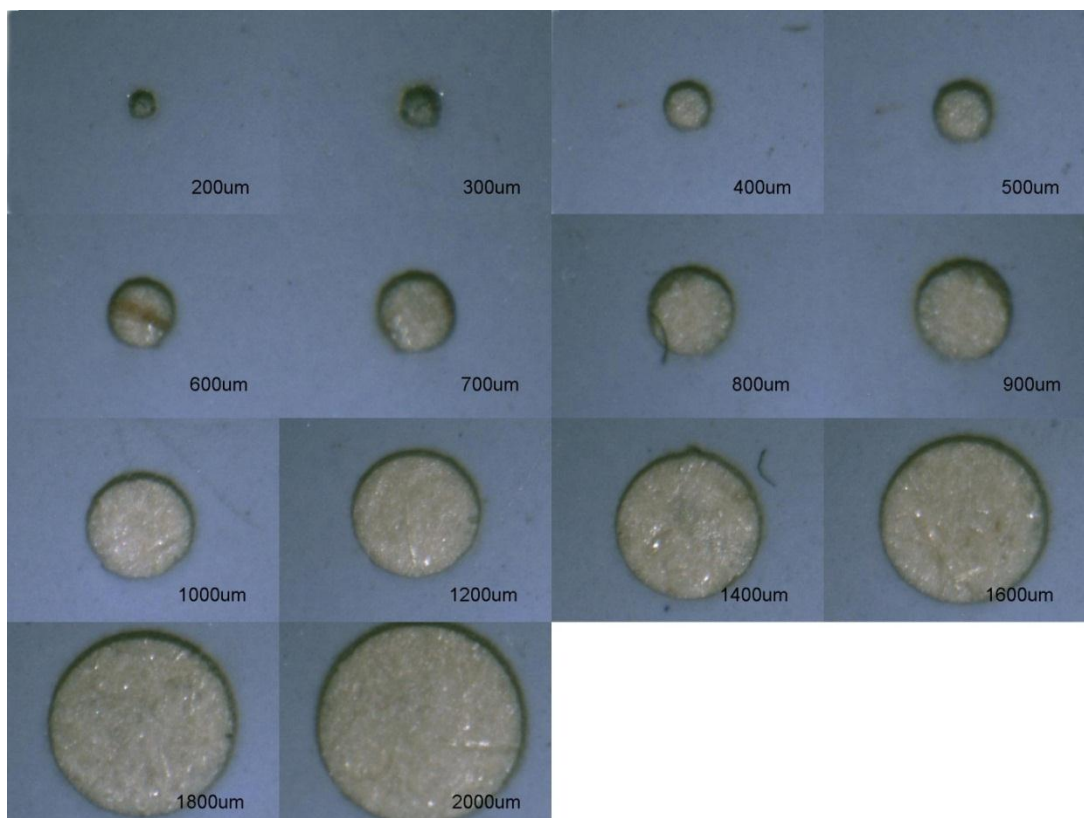
4.1 Výroba testovacej štruktúry

V prvej časti projektu prebiehala výroba vzoriek pre testovanie vplyvu veľkosti priemeru prokovu na elektrické vlastnosti prokovu v súlade s odporúčaniami výrobcu, bez akýchkoľvek zmien v technologickom procese.

Prvým krokom realizácie testovacej štruktúry bola tvorba dier na prokovy. Diery jednotlivých priemerov boli vyrezané pomocou laseru Aurel ALS 300. Ako je zrejmé z priložených fotografií (Obr.6), okraje dier s menším priemerom sú viac opálené ako diery s väčšími priermi. Tento jav je následkom pôsobenia intenzity laserového lúču na menšiu plochu. Takisto je badateľný rozdiel v tvare vyrezaných dier. Diery s menšími priermi vykazujú mierne nepravidelný tvar, pri väčších prieroch je tvar diery pravidelný.

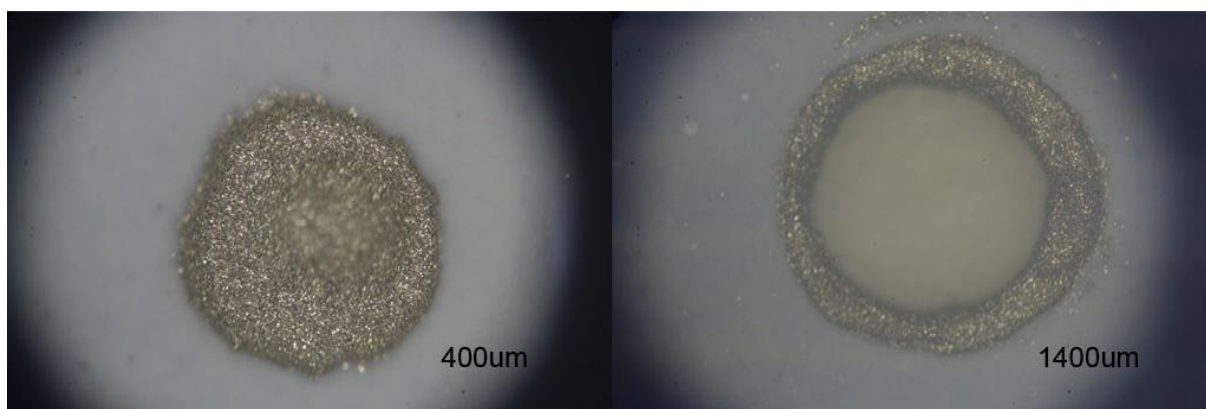


Obr. 11: Detail vyrezaných dier

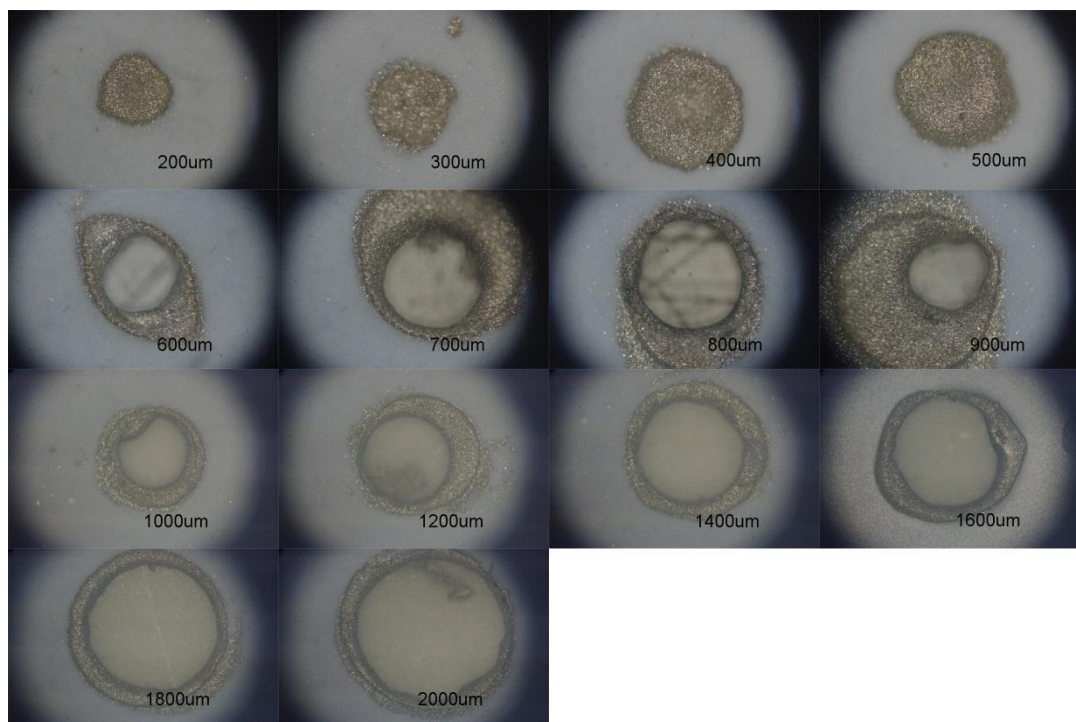


Obr. 12: Súhrn všetkých rozmerov vyrezaných dier

Nasledujúcim krokom realizácie prokovu bolo vyplnenie dier pomocou vodivej pasty. Ako výplň bola na základe odporúčania výrobcu použitá vodivá pasta TC0308 od firmy Heraeus. Pasta bola do dier nanosená šablónovým tiskom cez medenú šablónu hrúbky 40 μm . Nižšia viskozita pasty sa prejavila na schopnosti pasty zaplniť otvor. Diery menších priemerov boli pastou kompletne vyplnené, ale pri väčších priemeroch dochádzalo k prilepovaniu výplne zo stredu diery na podložku šablónového tisku, a tým pádom ostali pokovené iba okraje diery. Po vyplnení všetkých dier boli vzorky zasušené pôsobením teploty 80°C počas 10 minút.



Obr. 13: Detail dier po vyplnení pastou na prokovy



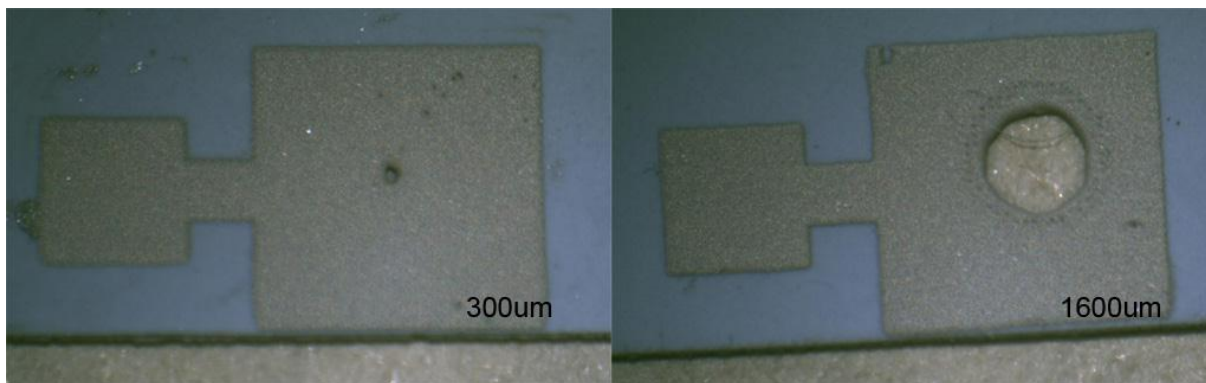
Obr. 14: Súhrn všetkých rozmerov vyplnených dier

Po zasúšení výplní prokovov bol na vzorky nanesený vodivý motív s kontaktnými plôškami. Motív bol kvôli možnosti pájania kontaktných plôšiek vytvorený pomocou pájateľnej pasty TC0306 od firmy Heraeus.

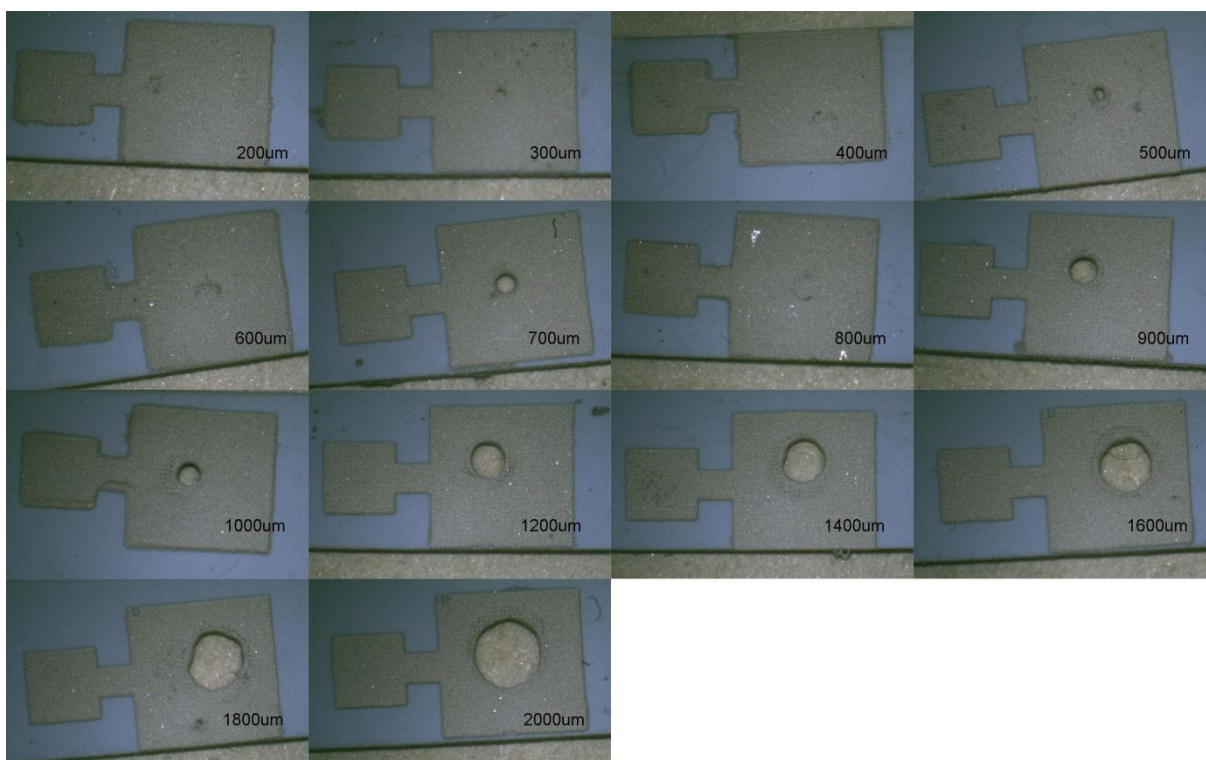
Na vzorky s menšími priermi prokovov bol motív nanesený pomocou manuálnej sitotiskovej stanice. Nanášanie motívu na vzorky s dierami väčších priemerov bolo problematickejšie, nakoľko manuálny sitotisk neumožňuje prichytenie substrátov. Z tohto dôvodu boli vzorky na sitotisku upevňované pomocou lepiacej pásky, čím bolo v podstate zamedzené možnosti uchytiť vzorku v rovnakej polohe ako predchádzajúca vzorka. Keďže diery nebolo možné v predošlom kroku úplne zaplniť pastou na prokovy, nanášaná pasta spôsobovala prichytávanie vzoriek na sito manuálneho sitotiskového zariadenia. Následné pokusy o odlepenie vzorky od sita často končili porušením vodivého motívu, vznikom skratov alebo roztrhnutím samotného vzorku.

Z tohto dôvodu bolo zostrojené nové sito pre poloautomatickú sitotiskovú stanicu, ktorá ponúka možnosť stabilného uchytenia vzorky pomocou porézneho kameňa. Rozmery porézneho kameňa značne presahovali rozmer substrátov, preto bola vytvorená fólia ktorá kopírovala veľkosť substrátov s cieľom zabezpečiť potrebné uchytenie vzoriek a minimalizovať riziko prilepenia vzoriek na sito sitotisku. Po vytvorení vodivých motívov boli vzorky zasúšené pôsobením teploty 80°C počas 15 minút.

Medzičasom bola pomocou sitotisku vytvorená spodná vrstva štruktúry. Jedná sa o jednoduchý motív ktorý bolo možné vytvoriť pomocou manuálneho sitotisku. Použitá bola strieborná vodivá pasta TC0307 z dôvodu zabezpečenia optimálnej vodivosti vytváraného motívu. Vytvorené vzorky boli zasúšené pôsobením teploty 80°C počas 15 minút.



Obr. 15: Vrstvy s naneseným vodivým motívom



Obr. 16 : Súhrn všetkých vrstiev s vodivým motívom

V ďalšom kroku bola vytvorená vrchná vrstva testovacej štruktúry, ktorej úlohou bolo kryť vytvorené prokovy. Do vrstvy boli pomocou laseru vyrezané štvorcové diery s rozmermi 2x2 mm aby bola zachovaná možnosť kontaktovania kontaktovacích plošiek.

Vytvorené vrstvy boli naukladané na seba a zosúhlasené pomocou podporných dosiek so strediacimi kolíkmi aby nedošlo k vzniku dutín alebo posunu vrstiev počas laminácie. Laminácia prebehla pôsobením tlaku 15 kN pri teplote 70 °C počas doby 10 minút. Došlo k vytvoreniu rovnomernej štruktúry bez viditeľných dutín, nerovností alebo trhlín.

Finálnym krokom výroby testovacej štruktúry bol výpal vytvorených vzoriek. Výpal prebehol v súlade s teplotným profilom odporúčaným výrobcom substrátu (viď Graf 1.).

Výstupným produktom procesu bolo 70 3D štruktúr LTCC, z ktorých každá obsahuje dva jednoduché systémy prokovov vyhotovených v 14tich rôznych priemeroch.

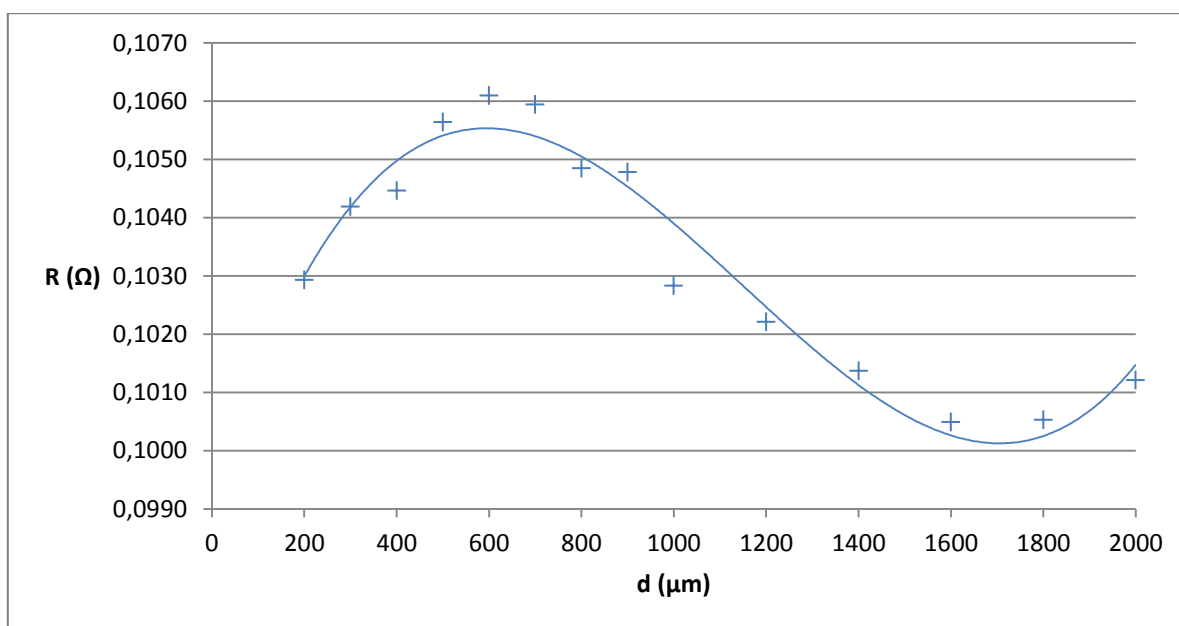
4.2 Meranie odporu testovacích štruktúr – vplyv priemeru prokovu

Meranie odporu štruktúry spočívalo v meraní odporu systému „kontaktná ploška – prokov – spodná vodivá vrstva – prokov – kontaktná ploška“. Meranie prebehlo priamou metódou vychádzajúcou z Ohmovho zákona (viď Obr.3).

Ampérmeter v tomto zapojení meria súčet prúdov prechádzajúci voltmetrom a meraným vzorkom. Nakoľko bol ako voltmeter použitý multimeter Agilent 34410 s vnútorným odporom $10\text{M}\Omega$, môžeme prúd prechádzajúci voltmetrom zanedbať. Tým pádom namerané napätie a prúd odpovedá hodnotám na testovanom vzorku. Zmerané údaje pre všetky vzorky sú uvedené v tabuľke 2. Z týchto hodnôt bol stanovený elektrický odpor testovanej štruktúry. Následne bol do grafu vynesенý aritmetický priemer hodnoty elektrického odporu pre jednotlivé rozmery prokovov.

Aritmetický priemer bol počítaný podľa vzorca :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$



Graf 2: Závislosť odporu prokovu na veľkosti priemeru prokovu

Tab. 2: Meranie vplyvu priemeru prokovu na elektrické vlastnosti prokovu, namerané hodnoty napätia a prúdu, vypočítané hodnoty odporu

D[μm]	Číslo vzorky	U ₁ [mV]	I ₁ [mA]	U ₂ [mV]	I ₂ [mA]	R ₁ [Ω]	R ₂ [Ω]	R _{priemer} [Ω]
200	1	0,699	6,789	0,689	6,787	0,1030	0,1015	0,1029
200	2	0,716	6,787	0,707	6,788	0,1055	0,1042	
200	3	0,686	6,790	0,694	6,787	0,1010	0,1023	
200	4	0,696	6,787	0,705	6,789	0,1025	0,1038	
200	5	0,693	6,789	0,702	6,787	0,1021	0,1034	
300	1	0,710	6,789	0,706	6,789	0,1046	0,1040	0,1042
300	2	0,701	6,788	0,696	6,789	0,1033	0,1025	
300	3	0,698	6,789	0,745	6,789	0,1028	0,1097	
300	4	0,710	6,788	0,706	6,788	0,1046	0,1040	
300	5	0,701	6,788	0,700	6,789	0,1033	0,1031	
400	1	0,712	6,789	0,696	6,789	0,1049	0,1025	0,1045
400	2	0,709	6,788	0,725	6,789	0,1044	0,1068	
400	3	0,701	6,789	0,705	6,790	0,1033	0,1038	
400	4	0,720	6,789	0,710	6,790	0,1061	0,1046	
400	5	0,699	6,788	0,715	6,788	0,1030	0,1053	
500	1	0,719	6,787	0,716	6,786	0,1059	0,1055	0,1056
500	2	0,722	6,789	0,712	6,788	0,1063	0,1049	
500	3	0,706	6,787	0,711	6,787	0,1040	0,1048	
500	4	0,720	6,788	0,709	6,787	0,1061	0,1045	
500	5	0,730	6,785	0,725	6,788	0,1076	0,1068	
600	1	0,726	6,788	0,705	6,786	0,1070	0,1039	0,1061
600	2	0,736	6,789	0,740	6,789	0,1084	0,1090	
600	3	0,710	6,787	0,710	6,789	0,1046	0,1046	
600	4	0,711	6,789	0,720	6,789	0,1047	0,1061	
600	5	0,719	6,789	0,725	6,788	0,1059	0,1068	
700	1	0,711	6,789	0,720	6,789	0,1047	0,1061	0,1059
700	2	0,719	6,789	0,725	6,788	0,1059	0,1068	
700	3	0,722	6,788	0,723	6,788	0,1064	0,1065	
700	4	0,715	6,788	0,718	6,789	0,1053	0,1058	
700	5	0,719	6,788	0,720	6,790	0,1059	0,1060	
800	1	0,702	6,789	0,715	6,788	0,1034	0,1053	0,1048
800	2	0,699	6,788	0,710	6,789	0,1030	0,1046	
800	3	0,716	6,778	0,719	6,789	0,1056	0,1059	
800	4	0,720	6,787	0,710	6,788	0,1061	0,1046	
800	5	0,710	6,788	0,715	6,788	0,1046	0,1053	

Pokračovanie Tabuľky 2

D[μm]	Číslo vzorky	U ₁ [mV]	I ₁ [mA]	U ₂ [mV]	I ₂ [mA]	R ₁ [Ω]	R ₂ [Ω]	R _{priemer} [Ω]
900	1	0,717	6,789	0,701	6,788	0,1056	0,1033	0,1048
900	2	0,705	6,788	0,716	6,787	0,1039	0,1055	
900	3	0,702	6,787	0,725	6,787	0,1034	0,1068	
900	4	0,709	6,787	0,706	6,787	0,1045	0,1040	
900	5	0,716	6,788	0,715	6,787	0,1055	0,1053	
1000	1	0,696	6,787	0,701	6,789	0,1025	0,1033	0,1028
1000	2	0,696	6,789	0,683	6,787	0,1025	0,1006	
1000	3	0,699	6,788	0,705	6,788	0,1030	0,1039	
1000	4	0,715	6,789	0,699	6,789	0,1053	0,1030	
1000	5	0,703	6,786	0,683	6,787	0,1036	0,1006	
1200	1	0,693	6,789	0,701	6,787	0,1021	0,1033	0,1022
1200	2	0,690	6,787	0,700	6,789	0,1017	0,1031	
1200	3	0,689	6,788	0,691	6,786	0,1015	0,1018	
1200	4	0,691	6,789	0,703	6,788	0,1018	0,1036	
1200	5	0,689	6,788	0,691	6,789	0,1015	0,1018	
1400	1	0,686	6,786	0,690	6,790	0,1011	0,1016	0,1014
1400	2	0,690	6,787	0,690	6,790	0,1017	0,1016	
1400	3	0,686	6,787	0,690	6,789	0,1011	0,1016	
1400	4	0,687	6,788	0,689	6,789	0,1012	0,1015	
1400	5	0,685	6,787	0,688	6,787	0,1009	0,1014	
1600	1	0,685	6,788	0,686	6,787	0,1009	0,1011	0,1005
1600	2	0,683	6,789	0,680	6,789	0,1006	0,1002	
1600	3	0,679	6,790	0,685	6,787	0,1000	0,1009	
1600	4	0,678	6,789	0,681	6,789	0,0999	0,1003	
1600	5	0,679	6,789	0,686	6,789	0,1000	0,1010	
1800	1	0,685	6,789	0,683	6,789	0,1009	0,1006	0,1005
1800	2	0,679	6,787	0,680	6,789	0,1000	0,1002	
1800	3	0,685	6,789	0,683	6,789	0,1009	0,1006	
1800	4	0,680	6,789	0,679	6,789	0,1002	0,1000	
1800	5	0,684	6,785	0,686	6,786	0,1008	0,1011	
2000	1	0,683	6,789	0,686	6,790	0,1006	0,1010	0,1012
2000	2	0,690	6,787	0,686	6,786	0,1017	0,1011	
2000	3	0,686	6,789	0,688	6,787	0,1010	0,1014	
2000	4	0,686	6,787	0,689	6,789	0,1011	0,1015	
2000	5	0,689	6,788	0,687	6,788	0,1015	0,1012	

Podľa teoretických predpokladov by mal odpor prokovu lineárne klesať so zväčšujúcim sa priemerom prokovu. Z grafu jasne plynie že teoretický predpoklad nebol splnený, čo znamená že pri meraní sa vyskytla chyba, ktorej pôvod bude ďalej zisťovaný. Nakoľko sa namerané hodnoty pohybujú v okolí $100\text{ m}\Omega$, príčinou chyby môže byť vplyv odporu pripojovacích vodičov.

Ďalším faktorom ktorý mohol negatívne ovplyvniť výsledok merania, bola realizácia nadrozmerných prokovov, ktoré komplikovali tvorbu vodivých motívov, čo mohlo mať za následok nedostatočné pokovenie spojení jednotlivých vrstiev. Taktiež výroba vodivých vrstiev prebiehala pomocou manuálneho sitotisku, ktorého nepresnosti mohli takisto negatívne ovplyvniť výslednú kvalitu vodivých vrstiev.

4.3 Meranie odporu testovacích štruktúr – vplyv technologického procesu

V druhej časti praktickej časti projektu bola pozornosť upriamená na vplyv upraveného procesu odvodeného od procesu používaného pri tvorbe DPS. Za týmto účelom boli vytvorené dve série testovacích štruktúr, prvá séria sa držala technologických pokynov udávaných výrobcom, druhá séria vychádzala z procesu používaného pri tvorbe DPS (na surový substrát bol vytvorený vodivý motív a doňho následne vytvorený prokov).

Nasledujúce kroky technologického postupu, laminácia a výpal prebiehali rovnako ako v kapitole 1.1 pre obidve série vzorkov. Obidve série boli vytvorené kompletne pomocou automatického sitotisku s cieľom eliminovať všetky prípadné chyby vo vytvorenej štruktúre spôsobené nepresnosťami pri ručnom sitotisku.

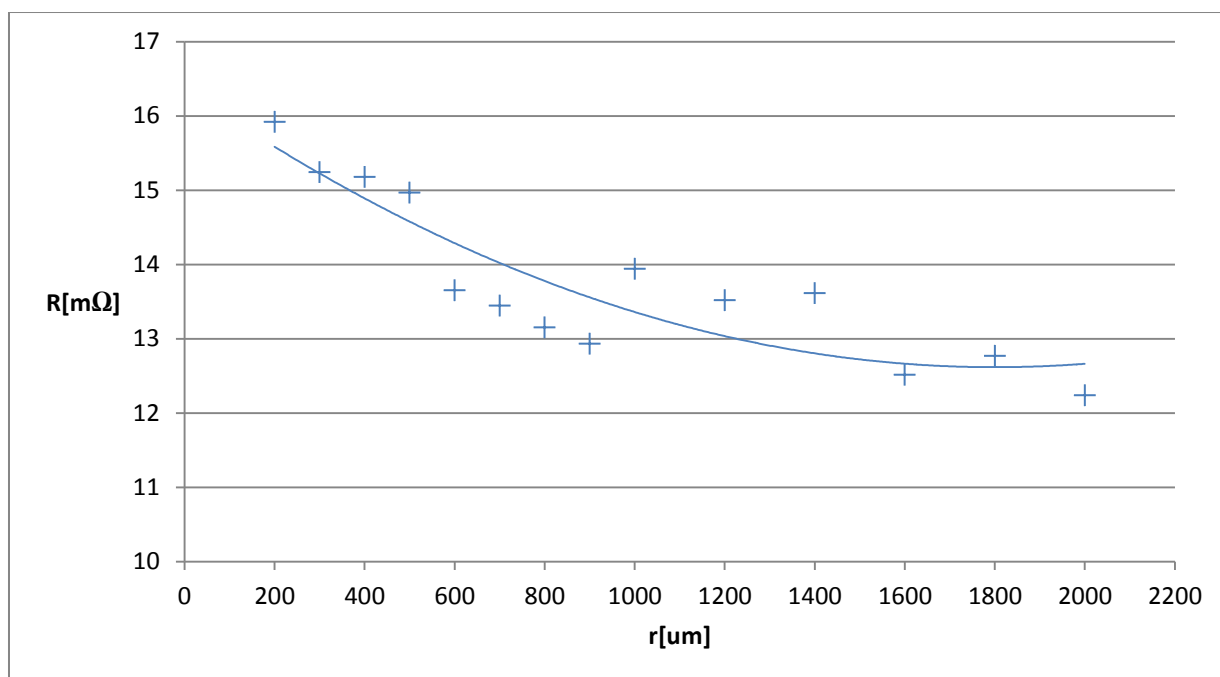
Pre obidve vytvorené série o počte 70 vzorkov (tzn. 140 systémov prokovov) prebehlo kontrolné meranie za použitia RLC mostu Agilent 4284A Precision LCR Meter, spolu s Kelvinovými svorkami. Hlavnou výhodou tohto merania oproti priamej metóde bola možnosť korekcie vnútorného odporu prívodných vodičov a korekcie zahrievania vodičov pôsobením pretekajúceho prúdu. Namerané hodnoty odporu boli zaznamenané a graficky spracované :

Tab.3 : Namerané hodnoty odporu RLC mostom – technologický proces udávaný výrobcom

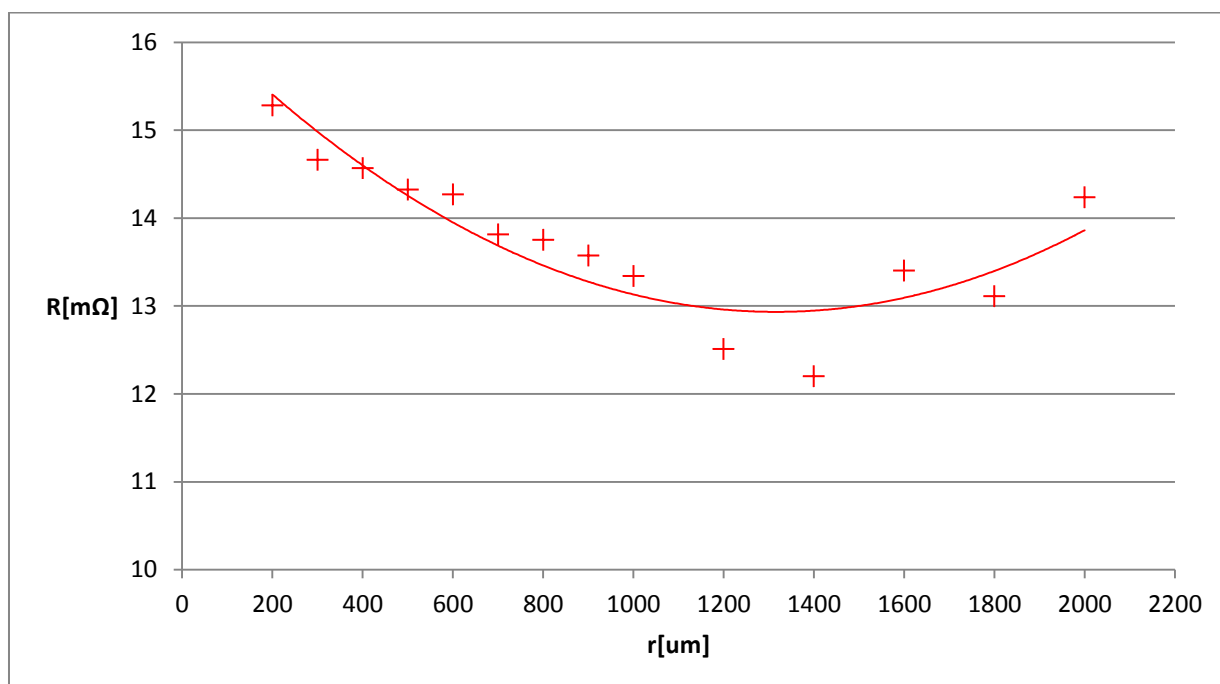
D[μm]	Číslo	R ₁ [m Ω]	R ₂ [m Ω]	R _{priemer} [m Ω]	D[μm]	Číslo	R ₁ [m Ω]	R ₂ [m Ω]	R _{priemer} [m Ω]
200	1	15,9	15,9	15,92	900	1	13,8	13,8	12,93
200	2	14,1	17,1		900	2	11,5	11,5	
200	3	14,9	17,3		900	3	13,8	13,8	
200	4	15	17,1		900	4	12,4	12,4	
200	5	15,2	15,2		900	5	13,2	13,1	
300	1	14,6	15,8	15,24	1000	1	13,3	12,9	13,94
300	2	13,9	14,9		1000	2	16,1	14,8	
300	3	16	14,5		1000	3	13,4	15,5	
300	4	16,1	15,3		1000	4	13,1	14,1	
300	5	16,5	14,8		1000	5	12,8	13,4	
400	1	13,8	16,8	15,18	1200	1	11,9	13,0	13,52
400	2	13,9	16,4		1200	2	12,8	15,2	
400	3	16,6	15		1200	3	14,0	14,2	
400	4	14,2	14,6		1200	4	14,0	13,8	
400	5	14,9	15,4		1200	5	13,2	13,0	
500	1	15,5	16,5	14,97	1400	1	12,2	12,6	12,61
500	2	16,5	13,6		1400	2	13,2	13,2	
500	3	14,9	14,9		1400	3	12,1	11,8	
500	4	13,6	14,8		1400	4	12,6	13,2	
500	5	14,1	13,9		1400	5	12,6	12,6	
600	1	13,4	14,4	13,65	1600	1	12,1	13,2	12,51
600	2	13,5	14,1		1600	2	10,7	12,5	
600	3	13,2	13,3		1600	3	11,8	13,3	
600	4	13,5	14,5		1600	4	13,4	13,1	
600	5	12,1	14,5		1600	5	12,3	12,7	
700	1	14,6	12,6	13,44	1800	1	11,3	13,9	12,77
700	2	13,4	13,8		1800	2	11,8	13,9	
700	3	12,4	14,1		1800	3	12,1	13,6	
700	4	12,8	13,3		1800	4	12,5	13,1	
700	5	14	13,1		1800	5	12,3	12,9	
800	1	13,4	13,4	13,15	2000	1	16,1	11,5	12,24
800	2	13,6	12,6		2000	2	13,6	12,8	
800	3	12,9	13,5		2000	3	10,5	11,8	
800	4	13,1	14		2000	4	11,2	10,4	
800	5	12,5	12,5		2000	5	12,1	12,4	

Tab.4 : Namerané hodnoty odporu RLC mostom – upravený technologický proces

D[μm]	Číslo	R ₁ [m Ω]	R ₂ [m Ω]	R _{priemer} [m Ω]	D[μm]	Číslo	R _{1m} [Ω]	R ₂ [m Ω]	R _{priemer} [m Ω]
200	1	15,4	14,4	15,28	900	1	13,3	13,1	13,57
200	2	14,3	14,9		900	2	12,9	13,5	
200	3	13,8	14,6		900	3	12,9	14,3	
200	4	15,3	16,2		900	4	14,1	14	
200	5	16,8	17,1		900	5	13,9	13,7	
300	1	12,4	18,1	14,66	1000	1	13,7	14,4	13,34
300	2	14,3	15,6		1000	2	13,6	12,5	
300	3	13,5	14,6		1000	3	14,8	12,9	
300	4	13,6	14,3		1000	4	13,8	13,3	
300	5	15,1	15,1		1000	5	12,8	11,6	
400	1	12,6	12,7	14,57	1200	1	14,1	13,6	12,51
400	2	16,7	12,8		1200	2	11,2	10,4	
400	3	16,4	16,1		1200	3	11,9	12,1	
400	4	13,3	13,4		1200	4	11,0	11,4	
400	5	17,1	14,3		1200	5	14,8	14,6	
500	1	14,2	15,2	14,32	1400	1	10,9	11,7	12,2
500	2	13,9	14,1		1400	2	11,5	12,5	
500	3	13,3	14,8		1400	3	12,1	13,1	
500	4	14,1	13,9		1400	4	12,8	12,1	
500	5	15,2	14,5		1400	5	13,1	12,2	
600	1	16,1	16,8	14,27	1600	1	13,3	15,8	13,4
600	2	15,2	15,3		1600	2	11,9	13,3	
600	3	13,4	13,8		1600	3	11,6	14,3	
600	4	13,4	13,2		1600	4	13,2	13,8	
600	5	11,9	13,1		1600	5	13,4	13,4	
700	1	16,1	16,3	13,81	1800	1	12,1	13,1	13,11
700	2	12,6	12,7		1800	2	11,9	12,7	
700	3	13,9	15,2		1800	3	13,2	13,6	
700	4	12,8	12,4		1800	4	14,0	13,6	
700	5	12,8	13,3		1800	5	14,1	12,8	
800	1	13,5	13,5	13,75	2000	1	14,5	13,7	14,23
800	2	12,2	15,8		2000	2	14,3	13,3	
800	3	14,5	13,5		2000	3	14,6	15,0	
800	4	13,8	11,6		2000	4	14,2	14,6	
800	5	14,2	14,9		2000	5	13,8	14,2	



Graf 3. : Závislosť odporu prokovov na veľkosti polomeru prokovu (pôvodný technologický postup)



Graf 4. : Závislosť odporu prokovov na veľkosti polomeru prokovu (upravený technologický postup)

4.4 Vyhodnotenie výsledkov

Prvá časť merania praktickej časti bola zaťažená chybou merania, ktorá bola prisúdená nepresnostiam spôsobeným použitou meracou metódou a nepresnosťami manuálneho sitotisku. Z tohto dôvodu bola použitá ako referenčná séria vzoriek z druhej časti projektu. Jedná sa o identickú sériu s tým rozdielom že na tvorbu vodivých vrstiev bol použitý automatický sitotisk ktorý eliminuje nepresnosti manuálneho sitotisku. Taktiež meranie odporu prokovov prebehlo pomocou RLC mostu s možnosťou korekcie odporu prívodných vodičov. Porovnaním grafu pôvodného merania (graf 2.) a grafu opravných meraní (graf 3.) je vidno výrazný vplyv možnosti korekcie, v pôvodnom meraní sa celkový nameraný odpor pohybuje v rozmedzí 100 až 107 m Ω , pri meraní RLC mostom Kelvinovými svorkami s využitou korekciou sa namerané hodnoty pohybujú od 12 do 16 m Ω . Z pôvodného merania takisto nebolo možné kvôli nekorigovaným hodnotám stanoviť vplyv veľkosti prokovu na hodnotu odporu prokovu. V opravnom meraní sa potvrdil teoretický predpoklad : so zväčšujúcim sa rozmerom prokovu klesá hodnota elektrického odporu prokovu až do rozmeru kde sa začnú prejavovať vlastnosti pasty a tvorba dutín vo výslednej štruktúre.

V druhej časti boli vyhodnotené rozdiely elektrických vlastností prokovov spôsobené použitím rozdielnych technologických procesov. Pôvodný technologický postup umožňuje vytvárať prokovy s takmer lineárnym poklesom odporu na celom testovanom rozsahu priemerov prokovov (200 až 2000 μm) ale s mierne vyššou hodnotou odporu v rozsahu 200 až 1400 μm . Upravený technologický postup umožňuje vytvárať prokovy s nižším odporom a bez výraznejších výkyvov odporu až do priemeru prokovov 1400 μm . Pri väčších priemeroch sa začína prejavovať vplyv viskozity pasty, ktorá pri nanášaní do diery prokovu prepadáva, čo má za následok že pasta sa uchyťí iba na okrajoch diery. Tento jav vedie k tvorbe dutín v prokovoch a takisto k nežiaducemu javu zvyšovania odporu jednotlivých prokovov.

Zhrnutím týchto poznatkov je možné konštatovať vhodnosť upraveného technologického procesu (najprv vytvorené vodivé vrstvy, potom do nich vytvorené prokovy) pre tvorbu prokovov v rozsahu 200 až 1400 μm . Pre rozmery 1400 až 2000 μm je vhodnejšie použiť pôvodný technologický proces ktorý umožňuje dosiahnuť nižší odpor v danom rozsahu.

Záver

Cieľom tejto práce bolo zoznámiť sa s technológiou LTCC, jej charakteristikami, obmedzeniami v porovnaní s konvenčnými materiálmi a možnosťami využitia v dnešných technológiách. Práca sa zaoberá možnosťami LTCC z hľadiska tvorby 3D štruktúr a s tým súvisiacej integrácie vnorených alebo povrchových komponentov. Práca neobchádza ani problematiku bežných tlustovrstvých komponentov a ich možné využitie a integráciu v štruktúrach LTCC. Pozornosť bola zameraná hlavne na tému prokovov, ich parametrov, technológií súvisiacich s tvorbou prokovov a možnosti testovania vlastností prokovov.

V praktickej časti bola pomocou bežného technologického postupu navrhnutá a vytvorená 3D štruktúra s jednoduchým systémom prokovov. Táto štruktúra bola testovaná z hľadiska elektrických vlastností. Výsledky testovania boli poznačené chybou, ktorá bola pripísaná parazitným vplyvom pripojovacích vodičov a zníženej kvalite vytvorených vzorkov z dôvodu nepresnosti pri manuálnom sitotisku. Z toho dôvodu bola vytvorená nová séria vzorkov pomocou automatického sitotisku a takisto ďalšia séria s upraveným technologickým procesom výroby. Presnejšie meranie elektrického odporu prokovov prebehlo za pomoci RLC mostu Agilent 4284A precision LCR meter. Zhrnutím nameraných výsledkov je možné konštatovať, že upravený technologický proces je vhodné používať v rozsahu priemeru prokovov od 200 μm do 1400 μm , pôvodný technologický proces je vhodné používať v rozsahu priemerov 1400 μm až 2000 μm .

Práca sa ďalej môže uberať smerom k problematike prokovových sietí, rozborom vplyvu systémov skladaných prokovov nad sebou na elektrické vlastnosti prokovov, ako aj možnosťami tvorby prokovov použitím iných vodivých výplní a taktiež odporových pást.

Zoznam použitej literatúry

- [1] GOLONKA, L.J. Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems. BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES [online]. 2006, vol.54, 2, [cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW: <[http://www.ippt.gov.pl/~bulletin/\(54-2\)221.pdf](http://www.ippt.gov.pl/~bulletin/(54-2)221.pdf)>.
- [2] LAUTZENHISER, Frans; AMAYA, Edmar. HeraLock 2000 Self-constrained LTCC Tape [online]. West Conshohocken, PA : Heraeus CMD, 2002 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <http://www.seaceramics.com/Download/Papers/HeraLock2K_Selfconstrained_LTCC_Tape.pdf>.
- [3] KULKE, Reinhard, et al. LTCC - Multilayer Ceramic for Wireless and Sensor Applications [online]. Kamp-Lintfort : IMST GmbH, 2001 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.ltcc.de/downloads/rd/pub/10-doc-plus-engl-2001.pdf>>.
- [4] IMANAKA, Yoshihiko. Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology. Boston, MA: Springer Science Business Media, Inc, 2005. ISBN 03-872-3314-8.
- [5] WANG, Gangqiang, et al. Fabrication of Microvias for Multilayer LTCC Substrates. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, [online]. 2006, vol.21, 1, [cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1583783&tag=1>.
- [6] NOWAK, Damian, et al. Fabrication and electrical properties of laser-shaped thick-film and LTCC microresistors. Microelectronics reliability [online]. 2009, vol.49, 6, [cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271409000687>>.
- [7] SLOSARČÍK, Stanislav, et al. 3D štruktúry na báze LTCC keramiky pre oblasť mikrosystémov a hybridných senzorov. AT&P journal [online]. 2006, 2, [cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW: <http://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2006_2/plus32_36.pdf>.
- [8] DESIGN GUIDELINES FOR LTCC HERALOCK HL2000 MATERIALS SYSTEM [online]. Hanau : Heraeus CMD, 2003 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf>>.
- [9] Advanced Materials HeraLock® Tape HL2000 [online]. Hanau : W.C. Heraeus GmbH, 2009 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <http://www.heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltccmaterials/HL2000.pdf>.

- [10] Advanced Materials TC0308 Co-Firing Silver Via Fill [online]. Hanau : Heraeus CMD, 2003 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: < http://www.heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltccmaterials/TC0308~1.pdf>.
- [11] Advanced Materials TC0307 Co-Firing Silver Conductor [online]. Hanau : Heraeus CMD, 2003 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: < http://www.heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltccmaterials/TC0307~1.pdf>.
- [12] Advanced Materials TC0306 Co-Firing Silver Conductor [online]. Hanau : Heraeus CMD, 2003 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: < http://www.heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltccmaterials/TC0306~1.pdf>.
- [13] CIGOY, Dale. Accurate Low-Resistance Measurements Start with Identifying Sources of Error [online]. Cleveland : KEITHLEY INSTRUMENTS, INC, 2010 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.keithley.com/data?asset=53682>>.