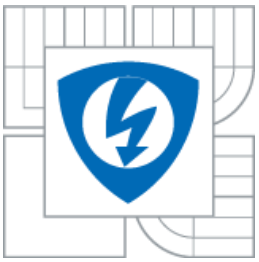
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

RESINÁTOVÉ PASTY

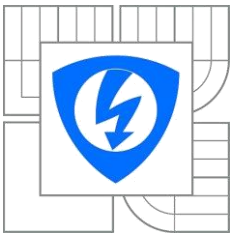
RESINATE PASTES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. LUKÁŠ TOMAŠÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
ING. MICHAL ŘEZNÍČEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student:	Bc. Lukáš Tomašák	***ID:***	88559
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Resinátové pasty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce optimalizujte proces depozice resinátové pasty pro potřeby laboratoře ústavu mikroelektroniky. Optimalizaci proveďte z hlediska parametrů nastavení sítotiskového poloautomatu, ovrstvení tiskové šablony a výpalu vrstvy. Na základě návrhu topologie testovacího motivu navrženého v rámci semestrálního projektu realizujte sérii testovacích vzorků. U těchto vzorků proměřte a zdokumentujte především proudovou nosnost, profil natištěné vrstvy, její tepelné vlastnosti a dosažitelné tiskové rozlišení pasty. Dále pak ověřte hodnotu odporu na čtverec pomocí čtyřbodové metody. Prověřte vlastnosti vrstvového teplotního snímače (Pt100 / Pt1000) realizovaného pomocí zmíněné resinátové pasty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

Termín zadání:	10.2.2014	***Termín odevzdání:***	29.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Michal Řezníček
Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se věnuje výrobě tlusté vrstvy z resinátové pasty na keramickém substrátu na základě návrhu testovacího motivu. Je přestavena optimalizace pracovního postupu vedoucí k úspěšné realizaci vrstvy. Využitím elektronového mikroskopu je provedeno vyhodnocení kvality vyrobené vrstvy a analýza složení pasty. V poslední části práce je provedeno měření teplotních a elektrických vlastností resinátové pasty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Resinátové pasty, tlustá vrstva, keramika, sítotisk

ABSTRACT

The work is dedicated to the production of a thick film with resinate paste on a ceramic substrate based on a proposal test motive. It introduced the optimization of the workflow leading to the successful realization of the layer. Using an electron microscope, it is performed evaluation of the quality of resultant layer and analysis of the composition of the paste. In the last part of the work it is carried out measurements of temperature and electrical properties of resinate paste.

KEYWORDS

Resinate pastes, thick film, ceramics, screen printing

TOMAŠÁK, L. *Resinátové pasty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Řezníček.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma **„Resinátové pasty“** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 30. května 2014 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Řezníčkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 30. května 2014 .....

podpis autora

OBSAH

ÚVOD **7**

1 MATERIÁLY PRO TLUSTÉ VRSTVY **8**

1.1 SUBSTRÁT 8
1.2 PASTY 10
1.2.1 Cermetová pasta *11*
1.2.2 Resinátová pasta *12*
1.2.3 Srovnání past *13*

2 NÁVRH TESTOVACÍHO MOTIVU **16**

2.1 TEPLOTNÍ KOEFICIENT ODPORU 16
2.2 ODPOR NA ČTVEREC 18
2.3 ROZLIŠENÍ TISKU 21
2.4 CELKOVÁ TOPOLOGIE TESTOVACÍHO MOTIVU 21

3 VÝROBA TESTOVACÍCH VZORKŮ **22**

3.1 SÍTOTISK - OBECNÝ POPIS 22
3.2 OVRSTVENÍ SÍTA 24
3.3 SÍTOTISKOVÝ POLOAUTOMAT AUREL C880 25
3.4 TISK RESINÁTOVÉ PASTY 27
3.5 SUŠENÍ RESINÁTOVÉ PASTY 35
3.6 VÝPAL RESINÁTOVÉ PASTY 38
3.7 REALIZACE VODIVÉ VRSTVY 39

4 ANALÝZA VYROBENÝCH VZORKŮ **41**

4.1 CELISTVOST, STRUKTURA A MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ 41
4.2 TLOUŠŤKA VRSTVY 44
4.3 ROZLIŠENÍ TISKU 46

5 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ RESINÁTOVÉ PASTY **47**

5.1 ODPOR NA ČTVEREC 47
5.1.1 Neohraničená odporová oblast *47*
5.1.2 Ohraničená odporová oblast *48*
5.2 TEPLOTNÍ KOEFICIENT ODPORU 49
5.2.1 Teplotní snímač PT100 ..... *51*
5.3 PROUDOVÁ NOSNOST 51

6 ZÁVĚR **53**

SEZNAM LITERATURY **54**

SEZNAM OBRÁZKŮ **56**

SEZNAM TABULEK **58**

SEZNAM PŘÍLOH **58**

ÚVOD

Podstatou technologie tlustých vrstev je depozice funkčních materiálů ve formě past na keramické substráty aditivním způsobem, nejčastěji sítotiskem. Na rozdíl od standardně používané cermetové pasty, jejíž výsledná tloušťka po výpalu dosahuje hodnot v řádu jednotek až desítek μm, resinátová pasta má tu vlastnost, že výsledná tloušťka její vrstvy je menší než 1 μm. Srovnatelné tloušťky vrstvy se dosahuje u technologie tenkých vrstev, jejichž výroba je však značně dražší.

Zásadní úlohou práce je zvládnutí technologického procesu nanášení resinátové pasty pro potřeby laboratoře Ústavu mikroelektroniky. Tento proces zahrnuje správné nastavení parametrů sítotiskového zařízení a optimalizaci pracovních podmínek pro bezproblémové sušení a následný výpal.

Je představen návrh topologie testovacího motivu pro ověření stanovených parametrů resinátové pasty. Mezi ně patří odpor na čtverec, teplotní součinitel odporu a proudová nosnost. Všechny tyto parametry jsou v rámci diplomové práce podrobeny měření.

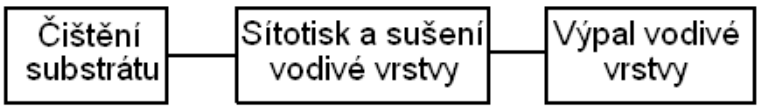
Vlastnosti resinátové pasty jsou dány jejím složením. Použitý ušlechtilý kov, který tvoří funkční složku pasty, je rozpuštěný v organickém materiálu a pasta tak neobsahuje pevné částice. Lze s ní tudíž dosáhnout velmi tenkých motivů a rozlišení tisku se pohybuje v řádu desítek μm při tloušťkách vrstev v řádu stovek nm. Tento předpoklad bude ověřen s pomocí elektronového mikroskopu.

Nezanedbatelnou předností resinátových past jsou také nižší pořizovací náklady z důvodu úspory použitého materiálu vzhledem k malým výsledným tloušťkám vrstev – objem nanesené resinátové pasty oproti pastě cermetové je až několikanásobně menší.

1 MATERIÁLY PRO TLUSTÉ VRSTVY

Tlusté vrstvy (TLV) jsou vytvářeny nanášením funkčních materiálů ve formě pasty na keramické substráty aditivním způsobem. Charakteristickým znakem tlustovrstvové technologie používané v elektronice pro realizaci vodivých, odporových a dielektrických vrstev je amorfní struktura vytvořená nevakuovými depozičními metodami (nejčastěji sítotiskem), a následným výpalem při teplotě kolem 850°C. (Obr. 1). Tloušťky vrstev po výpalu se pohybují řádově v jednotkách až desítkách μm podle typu použité pasty.

Mezi nejčastější využití tlustých vrstev vedle realizace výkonových či mikrovlnných obvodů patří nekonvenční aplikace, kam lze v současnosti zahrnout oblast optických displejů, topných elementů, solárních článků, antén pro čipové karty, vysokonapěťové izolace, rychlých tlustovrstvových pojistek, vysokoteplotních supravodičů, piezoreproduktorů a hlavně senzorů, včetně biosenzorů [1].



Obr. 1.1: Sled operací při postupu vytváření TLV

1.1 Substrát

Substrátem se rozumí elektroizolační nosná podložka, tvořená izolačním materiálem, sloužící jako nosič pro vodivý motiv a k montáži elektronických součástek. Jsou na ni kladeny následující požadavky [2]:

- Zajistit propojení součástek do systému a mechanickou soudržnost
- Zajistit určitou hodnotu relativní permitivity ε_r, navíc konstantní v celém používaném kmitočtovém pásmu a příslušném teplotním rozsahu
- Zajistit malé dielektrické ztráty, respektive nízký ztrátový činitel tgδ
- Zajistit odvod tepla ze systému
- Být chemicky odolný vůči prostředí
- Poskytnout minimální drsnost povrchu a co nejdokonalejší rovinatost

V TLV technologii je nejběžnějším materiálem substrátu korundová keramika, která se získává z horniny bauxit. Korund je anorganický materiál, jehož základem je polykrystalický oxid hlinitý. V největší míře se používá 96 % Al_2O_3 s malým množstvím kovových oxidů pro dosažení požadovaných fyzikálních vlastností v

plošných velikostech od několika mm^2 po 100 i více cm^2 a o tloušťkách od 0,25 do 2,5 mm. Standardním rozměrem je substrát (50 x 50) mm, který se pak dělí na poloviny, třetiny, čtvrtiny atd. Dělení obyčejně probíhá po vytvoření pasivní sítě. K dostání jsou i 99 % Al_2O_3 (podložka pro tenké vrstvy) a toxický BeO (vyšší tepelná vodivost) [3].

Specifické vlastnosti korundové keramiky mají mnohé přednosti:

- Velmi dobrou tepelnou vodivost
- Dobrou chemickou odolnost
- Hladkost
- Malou hodnotu TCE (teplotní koeficient roztažnosti)

Mezi nevýhody patří:

- Vyšší hmotnost
- Cena
- Křehkost

V následující tabulce jsou uvedeny nejvýznamnější elektrické a materiálové parametry substrátu 96 % Al_2O_3.

Tab. 1: Parametry substrátu 96 % Al_2O_3.

Tepelná vodivost	35 J/(s·m·K)
Součinitel teplotní roztažnosti	6,4 ppm/K
Elektrická pevnost	8 kV/mm
Měrný odpor	$7 \cdot 10^{13}$ Ω·mm
Ztrátový činitel (100 MHz)	0,55%
Relativní permitivita	9

Za zmínku stojí i hustota materiálu, která činí 3,8g/cm^3 a teplota tání je 2050°C.

V ČR je jedním z dodavatelů substrátů pro TLV firma ELCERAM z Hradce Králové, která nabízí 96% Al_2O_3, přičemž zbylé 4 % tvoří další přísady zlepšující zpracovatelnost keramické suspenze a vlastnosti vypálené keramiky. Dalším výrobcem keramiky je např. firma Alumina Ceramic Components z USA.

1.2 Pasty

Materiály pro vytváření vodivých motivů a funkčních vrstev jsou dodávány ve formě past s definovanou viskozitou. Tlustovrstvové pasty představují heterogenní termodynamický systém, tj. systém s více složkami o různých fyzikálních a chemických vlastnostech [1]. Vědní obor reologie se zabývá fyzikálními mechanismy, z nichž vychází vlastnosti a chování past během jejich tisku na keramický substrát. Tyto vlastnosti vychází z Newtonova a Hookova zákona.

Newtonův zákon viskozity η v kapalině je charakterizován jako vnitřní tření, které přenáší pohyb od jedné její vrstvy ke druhé. Viskozita je pak konstantou úměrnosti mezi smykovým napětím σ a smykovou rychlostí γ podle vztahu

$$\sigma = \eta \cdot \gamma . \tag{1.1}$$

Tento zákon se projevuje tak, že u stěn je proudění kapalin pomalejší než směrem ke středu. Materiály, které mění viskozitu v závislosti na tlaku, se nazývají tixotropní. Tixotropnost je druhem strukturální viskozity, která se vyznačuje poklesem viskozity při mechanickém smykovém namáhání (tisku) a opětovném stoupnutí viskozity, přestává-li mechanické působení [3].

Hookův zákon o deformaci tuhých těles pojednává o teorii pružnosti. Říká, že při tahovém zatížení je mechanické napětí přímo úměrné deformaci podle vztahu

$$\sigma = E \cdot \varepsilon , \tag{1.2}$$

kde σ je napětí, ε relativní prodloužení a konstanta E Youngův modul pružnosti.

Reologické vlastnosti popisují změny v chování pájecí pasty, zejména změny v tečení a deformaci vlivem působících faktorů, tj. tlaku při tisku, rychlosti pohybu stěrky, teploty, aj. Reologické chování pasty je dáno složením, tvarem a velikostí částic a strukturou tavidlového pojidla. Hlavní reologické vlastnosti u past jsou viskozita a tixotropnost [3].

Podle účelu použití se pasty pro TLV technologii dají rozdělit do tří základních skupin:

- vodivé
- odporové
- izolační

Podle chemického složení lze pasty rozdělit do dvou skupin:

- cermetové (směs částic kovu, skelných frit a pojiva)
- resinátové (sloučenina kovu s organickým materiálem)

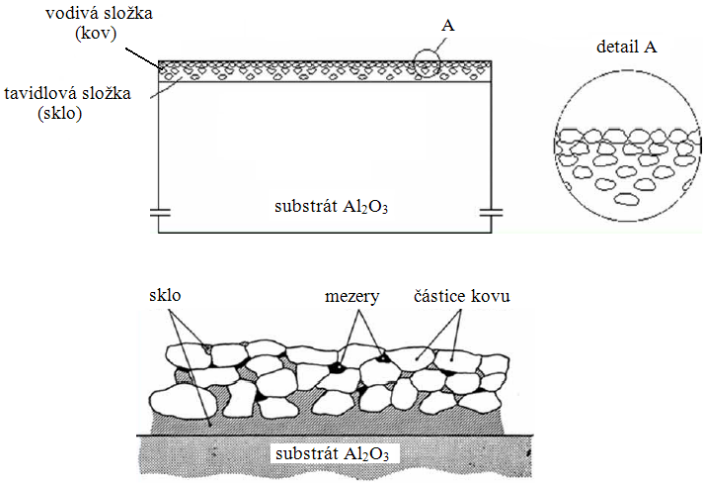
1.2.1 Cermetová pasta

Cermetová pasta je založena na kombinaci práškového vodivého pigmentu a skelné boritokřemičité frity. Požadované hodnoty odporu lze dosáhnout volbou koncentrace vodivých částic v heterogenním systému. S ní souvisí i uspořádání vodivých částic ve skelné matrici. Pasta je vytvářena mícháním a roztíráním práškových komponent s definovanou velikostí (jednotky μm), aby bylo zajištěno dobré nanesení přes síto, s pojivem, např. terpineolem, z důvodu dosažení optimální viskozity.

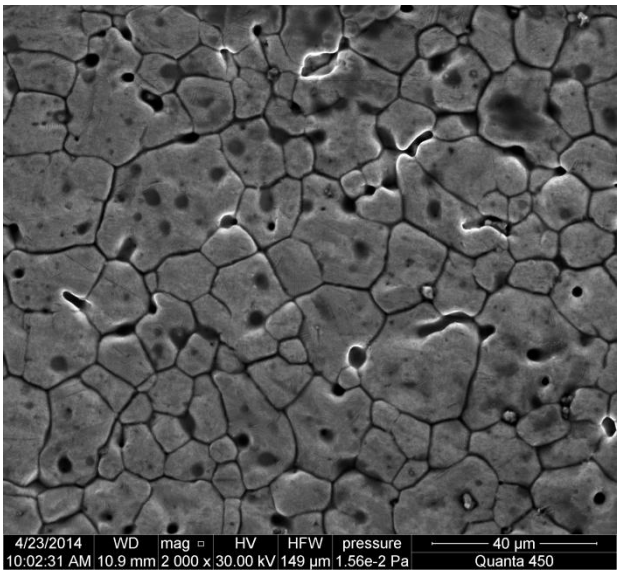
Sítotisková cermetová pasta se skládá ze tří základních složek:

- Funkční složka – určuje charakter pasty. Podle použití je tvořena buď částicemi drahých kovů u vodivých materiálů, nebo částicemi dielektrických a skelných frit u izolačních materiálů. U odporových materiálů může být funkční složka tvořena směsí drahých kovů nebo oxidy. Velikost takovýchto částic se pohybuje v jednotkách μm a musí být dostatečně malá oproti velikosti ok síta
- Tavivová složka – slouží k vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Používají se skelné frity nebo oxidové vazby s přídavným kovem. Při výpalu dochází k měknutí tavivové složky, vzniká nosná matrice pro funkční složku
- Pojivová složka – zajišťuje tiskové vlastnosti (viskozitu). Je tvořena organickými látkami, např. terpineolem. Během výpalu se tato látka odpaří a nepodílí se na konečné funkčnosti vrstvy.

Na obr. 1.2 je znázorněna nanesená pasta na keramickém substrátu po výpalu. Je zřejmé, že natavená složka – sklo – působí jako spojovatel mezi složkou funkční a keramickou podložkou. Ukázka struktury vodivé pasty po výpalu je na obr. 1.3. Tloušťka vrstvy po výpalu dosahuje hodnot od jednotek μm do desítek μm.



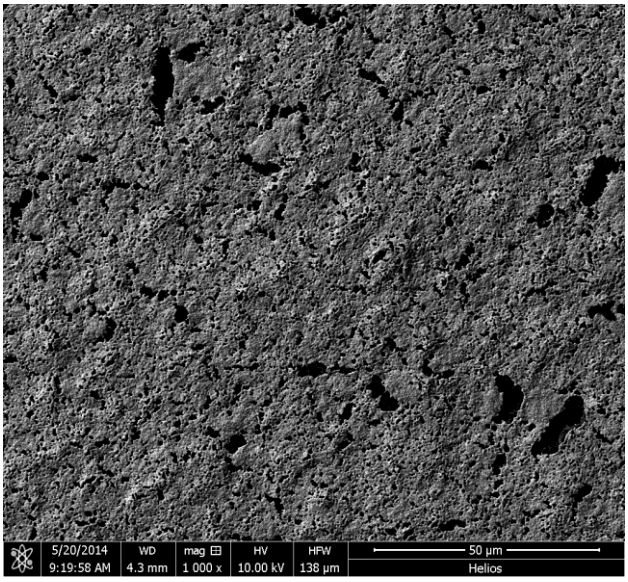
Obr. 1.2: Pasta na substrátu po výpalu – převzato z [5]



Obr. 1.3: Mikroskopická struktura vrstvy po výpalu cermetové pasty

1.2.2 Resinátová pasta

Resináty jsou organicko-kovové sloučeniny rozpuštěné v éterickém oleji. To znamená, že v rozpouštědle (pojivu) jsou homogenně rozptýlené molekuly nebo atomy rozpuštěných látek (oxidy kovů a organického materiálu), které reprezentují funkční a tavivovou složku pasty. V závislosti na konkrétním složení mohou být pasty vodivé nebo odporové.



Obr. 1.4: Mikroskopická struktura vrstvy po výpalu resinátové pasty

Přetavením pasty dojde ke slinutí a přichycení vrstvy na substrát (obr. 1.4). Tloušťka vrstvy po výpalu se pohybuje v rozmezí hodnot 0.1µm až 0.6µm. Jemná struktura nanesené vrstvy dovoluje následné leptání pro dosažení velice jemné ostrosti čáry. Z důvodu velmi tenkých vrstev je nezbytné je nanášet na odpovídající hladké

substráty, např. Al_2O_3. Drahé kovy, které se používají v těchto pastách, jsou zlato, stříbro, platina, případně paladium. Jejich podíl v celkovém objemu pasty je velmi nízký, obvykle do 25%. Nejpoužívanější metodou nanášení je sítotisk.

RP 070107-15% (Heraeus) [8]- tlustovrstvová vodivá pasta pro Al_2O_3 a glazovanou Al_2O_3. Obsahuje platinu a malé množství neušlechtilých kovů ve formě rozpuštěných organicko-kovových sloučenin. Simultánním slinutím oxidů neušlechtilých kovů pasta dosahuje vysoké přilnavosti na oba zmíněné substráty. K dosažení silnějších vrstev je potřeba tisknout několik vrstev na sebe a vypalovat je postupně po jedné. Neobsahuje olovo, kadmium, nikl ani ftaláty. Teplotní koeficient odporu pro rozsah teplot 25-125 °C se pohybuje v rozmezí 3300-3600 ppm/K [8].

RP 110410-15% (Heraeus)[11] - ušlechtilým kovem v této pastě je zlato. Oproti pastě RP 070107-15% má mnohem menší viskozitu a taky odpor na čtverec. Obě pasty se nanáší na Al_2O_3.

Doporučení od firmy Heraus k technologickému procesu nanášení a vypalování resinátové pasty [8]:

1. Po vytažení pasty z lednice je potřeba vyčkat, než teplota pájecí pasty dosáhne teploty okolí, až poté je vhodné kelímek otevřít. Zabrání se tím kondenzaci.

2. Tisk přes síto 300-350 mesh z nerezové oceli s tloušťkou vrstvy emulze 15-20µm. Rychlost tisku až do minimálně 10cm/s. Je možné použít i polyesterové síto. Čerstvě natištěná vrstva by neměla přesáhnout tloušťku 20-35µm, aby bylo zamezeno tvorbě bublin a prasklin během výpalu.

3. Nechat natištěnou vrstvu usadit při pokojové teplotě po dobu 10 minut, aby se vyrovnaly nerovnosti.

4. Sušit 15 minut při teplotě 90°C. Nepřesáhnout teplotu 130°C, protože by mohlo dojít k trhání pasty. Sušení většího objemu pasty vyžaduje odvětrání těkavých látek. Před vypalováním je vhodné se přesvědčit o rovnoměrnosti nanesené vrstvy.

5. Vypalovat při teplotě 850°C 7-10 minut, doba celého cyklu 40-60 minut. Během vypalování dochází k rozkladu zbývajících organických látek, formování a slinutí kovové vrstvy a nastane spojení s preparátem.

1.2.3 Srovnání past

Příkladem cermetové je např. pasta **5545** [7]. Jedná se o vodivou platinovou cermetovou pastu od ElectroScience určenou pro topná tělesa a senzory. Je to sítotisková pasta, hustá, navržená pro použití s oxidem zirkoničitým pro kyslíkové senzory. Může být použita i se substrátem Al_2O_3 pro polovodičové tenké oxidové senzory k detekci plynů jako CO nebo uhlovodíky. Změna odporu je pak lineární v rozsahu teplot od -50°C do 500°C. Tato pasta je vhodná pro použití jako topné těleso a je stabilní při 600°C ve vodíkové atmosféře bez významného zhoršení adheze (výpal při 1300°C) [7].

Firma ElectroScience nabízí komerčně 2 typy organicko-kovových past, **5051** a **8081**. Výrobcem deklarovaná tloušťka vrstvy, za předpokladu dodržení doporučeného pracovního postupu, je u obou past menší než 1μm. Dodavatel však v dokumentaci k produktu bohužel neuvádí procentuální zastoupení daného prvku ušlechtilého kovu, na rozdíl od firmy Heraeus. Pasta **5051** je platinová, určená pro aplikace jako např. odporové teploměry nebo chemické senzory. Pasta je určená pro nanášení na glazovanou keramiku. **8081** se nanáší na Al_2O_3 a ušlechtilým kovem je zde zlato. Může sloužit např. jako ploška pro TLV rezistory.

Pro malé tloušťky vrstev jsou nevhodné pro pájení nebo připojování vodičů.

Tab. 2: Srovnání hlavních parametrů past a podmínek výpalu dodavatelů ElectroScience a Heraeus, pasta cermetová a resinátové [7], [8], [11], [12], [13]

Parametr/Typ	ElectroScience			Heraeus	
	Cermetová	Resinátová	Resinátová	Resinátová	Resinátová
	5545 Pt	5051 Pt	8081 Au	070107 Pt	110410 Au
Viskozita [Pa·s]	200-250	25±5	50	40-60	5-8.5
Obsah pevných částic [% hmotnostních]	77-79	-	-	15.3±0.75	15.5±0.75
Síto [mesh]/ emulze [μm]	325/25	325-400/0	200-325/ 25-33	300-350/ 15-20	300-350/ 15-20
Sušení [°C]/ [min]	125/10-15	125/5-20	125/10-15	90/15	90/15
Teplota vypalování [°C]	980	850	850	850	850
Doba trvání špičky [min]	15	10-12	-	7-10	7-10
Tloušťka vrstvy [μm]	-	0.15-0.25	<1	0.1-0.3	0.1-0.5
Odpor/čtverec [mΩ/ □]	45-110	3000-4000	<400	800-1200	140-240
Přibližné pokrytí [cm^2/g]	80-100	680	-	500	400

Dalšími produkty, určené pro sítotisk a substrát Al_2O_3 , které nabízí dodavatel Heraeus, jsou resinátové pasty Ag 080310 -22.5 % a Au 080910 -22 %, pro něž jsou doporučené aplikace pojistky, tepelné tiskové hlavy, teplotní senzory a leptané vodivé struktury. Resinátová pasta B 3745/2 je doporučená k použití jako senzor tlaku. V tab. 3 jsou shrnuté jejich parametry.

Tab. 3: Parametry resinátových past [14], [15], [16]

Parametr/Typ	B 3745/2	080310	080910
Kov	Au, Pt	Ag	Au
Viskozita [Pa·s]	10-30	20-40	20-30
Obsah pevných částic [% hmotnostních]	17.5±1.5	22.6±1.0	22.5±0.75
Pokrytí [cm^2/g]	500	400	400
Tloušťka vrstvy [µm]	0.1-0.3	0.1-0.5	0.1-0.5
Ostrost čáry [µm]	≥150	≥300	≥100
Odpor na čtverec [Ω/ □]	≤1.5	-	0.08-0.13

Shrnutím výše uvedených poznatků můžeme konstatovat, že pasta resinátová oproti cermetové má nižší zastoupení ušlechtilého kovu v objemu, vyšší pokrytí na 1 gram a menší tloušťku vrstvy. Všechny tyto parametry příznivě ovlivňují cenu. Dalším rozdílem je obvykle nižší viskozita resinátové pasty, která je dána jejím složením a potřebná kvůli tisku jemných motivů.

2 NÁVRH TESTOVACÍHO MOTIVU

V návrhu topologie testovacího motivu je předpokládáno použití podložky z Al_2O_3 o rozměrech 2x2 palce (50,8x50,8mm). Návrh obsahuje 8 segmentů a je vyhotoven ve dvou vrstvách. První vrstva má červenou barvu a předpokládá použití prověřované resinátové pasty RP 070107-15% od firmy Heraeus. Druhá vrstva má modrou barvu a je určena k tisku vodivé pasty určené pro vyhotovení kontaktních plošek a číslování segmentů. Obě vrstvy slouží jako předloha pro výrobu motivů na sítu pro sítotisk.

Každý segment v topologii má přiřazeno číslo. Pro měření teplotního koeficientu odporu bude vyhrazena oblast, ve které budou realizovány vrstvové odpory o velikosti 50Ω (segment č. 1), 70Ω (segment č. 2) a 100Ω (segment č. 3). Další část substrátu připadne motivu pro zjištění skutečné hodnoty odporu na čtverec použité resinátové pasty čtyřbodovou metodou. Motiv bude vyhotoven pro měření s neohraničenou odporovou oblastí (segment č. 5) i s ohraničenou odporovou oblastí (segmenty č. 4, 6 a 7), jenž poslouží i pro měření proudové nosnosti. Segment č. 8 je určen ke zjištění dosažitelného rozlišení tisku čára/mezera – ve směru tisku a ve směru kolmém na tisk.

2.1 Teplotní koeficient odporu

TKR je fyzikální veličina udávající poměrnou změnu el. odporu materiálu v závislosti na teplotě odpovídající nárůstu teploty o 1°C v rozsahu teplot, ve kterých je tato změna vratná.

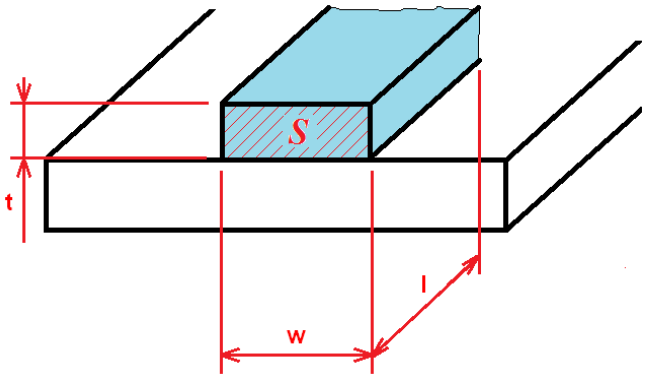
Teoretickým základem je vztah mezi proudovou hustotou J a intenzitou elektrického pole E, který je dán důsledkem srážek elektronů s kmitajícími atomy krystalové mřížky nebo s poruchami (příměsi, dislokace, …). Pro pohybující se nosič elektrického náboje představují srážky elektronů s kmitajícími atomy krystalové mřížky nebo s poruchami překážky. Zvyšující se počet srážek se projeví zkrácením doby relaxace τ (střední doba mezi srážkami) [4]. Platí vztah

$$TKR = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} \text{ [ppm/K]}, \tag{2-1}$$

kde dR/dT vyjadřuje změnu odporu v závislosti na teplotě vztaženou na hodnotu odporu R_0. U TLV odporů je hodnota TKR závislá na materiálu, ze kterého je pasta vyrobena. Na výsledné hodnotě TKR se dále podílí tvar, tloušťka, délka a šířka výsledné vrstvy.

Návrh TLV odporu 50Ω, 70Ω a 100Ω

Na obr. 2.4 jsou je modře zobrazena odporová vrstvy a její rozměry.

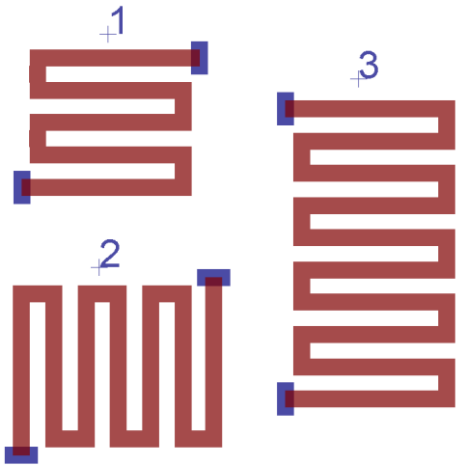


Obr. 2.1: Řez TLV vrstvou – převzato z [10]

Za předpokladu, že ρ je rezistivita materiálu, ze kterého je pasta vyrobena, *l* je délka vrstvy, *w* je šířka vrstvy, *t* je tloušťka vrstvy a *S* je její příčný obsah, pro el. odpor takovéto vrstvy platí

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w} = R_{sh} \cdot \frac{l}{w} = R_{sh} \cdot A. \qquad (2\text{-}2)$$

Hodnota *A* ze vztahu 2-2 udává počet čtverců, které jsou potřeba k dosažení požadované hodnoty odporu. Respektováním pravidel uvedených v [6], kde se píše, že počet čtverců v řadě by neměl překročit hodnotu 10, je potřeba odpory o velikosti 50Ω, 70Ω a 100Ω natisknout v meandrovitém tvaru. V tom případě je potřeba vzít v úvahu fakt, že rohové čtverce představují polovinu své velikosti. Za předpokladu, že pasta RP 070107-15% má plošný odpor 1Ω/ □ a počet čtverců v jednom rameni je 10, pak 50Ω TVL rezistor má 5 ramen, 70Ω TVL rezistor má 7 ramen a 100Ω TVL rezistor má 10 ramen (obr. 2.5).



Obr. 2.2: Motivy pro 50Ω, 70Ω a 100Ω TLV odpor – segment č. 1, 2 a 3

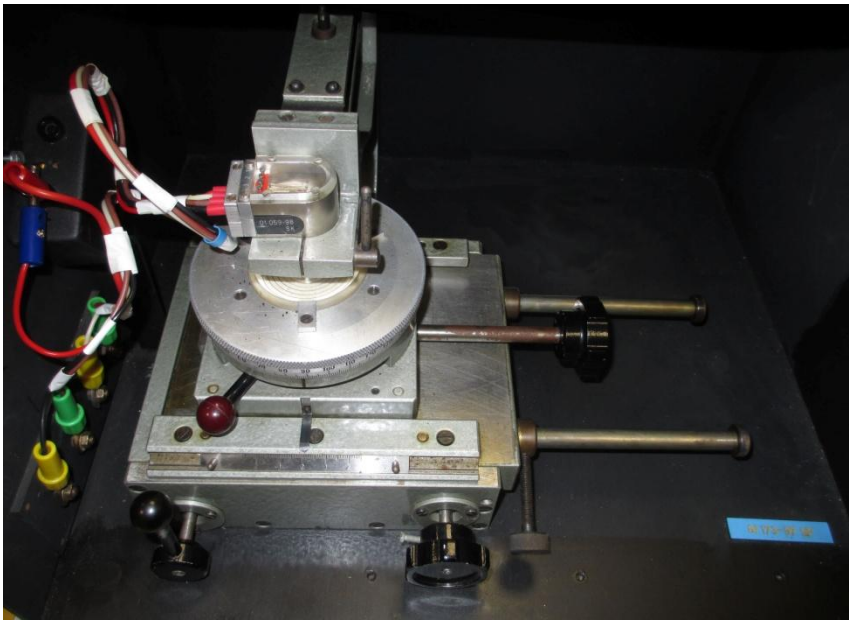
2.2 Odpor na čtverec

K nejdůležitější veličině, která charakterizuje pastu v technologii tlustých vrstev, patří odpor na čtverec R_{sh}. Je to hodnota, která udává velikost rezistivity materiálu ρ, ze kterého je pasta složena, s přihlédnutím k tloušťce vrstvy pasty t, podle vztahu

$$R_{sh} = \frac{\rho}{t} \ [\Omega/\square]. \tag{2-3}$$

Dodavatel tedy udává hodnotu odporu pasty na čtverec při určité tloušťce vrstvy pasty. V případě resinátové pasty RP 070107-15% je očekáván R_{sh} v rozmezí 0.8-1.2Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 10µm a 0.4-0.8Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 15µm. K ověření tohoto předpokladu bude využito čtyřbodové metody měření odporu.

Čtyřbodová metoda – tato metoda je využívaná především ke zjišťování homogenity křemíkových destiček, ale je využitelná i k měření vrstvových odporů. Základem metody je přiložení čtyř hrotů na proměřovanou vrstvu, přičemž vnějšími hroty je do vzorku dodáván proud a na vnitřních hrotech je odečítáno napětí. Pro jednoduchost výpočtu jsou hroty od sebe vzdáleny o konstantní velikost. V případě laboratorního přípravku na obr. 2.1, který bude k dispozici, je vzdálenost hrotů od sebe s=1.1mm.

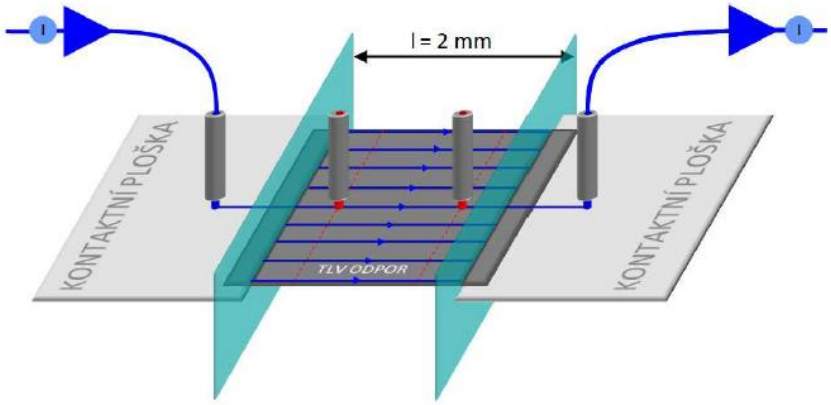


Obr. 2.3: Přípravek pro měření odporu čtyřbodovou metodou

Existují dva způsoby určení odporu touto metodou. Do výpočtu je nutné zahrnout korekční faktory, které se stanoví na základě toho, zda se jedná o měření na neohraničené nebo ohraničené ploše.

Ohraničená odporová plocha

Ohraničená odporová plocha vznikne tak, že měřená odporová vrstva je natištěná na kontaktní plošky. Za předpokladu konstantní tloušťky vrstvy v ní vznikne přímé homogenní proudové i napěťové pole, to znamená, že proudová hustota je v celé šířce i délce odporu konstantní (Obr. 2.2) [9].



Obr. 2.4: Model měření vrstvového odporu čtyřbodovou metodou - charakter homogenního pole

Podmínkou pro měření homogenního pole je max. rozestup kontaktních plošek, který musí být roven maximálně trojnásobku vzdálenosti elektrod *s*, tedy 3.3mm. Takto je zajištěno rozvedení proudu z hrotu přes kontaktní plošku a vytvoření homogenního pole, jak je znázorněno na obr. 2.2.

Pro výslednou hodnotu odporu na čtverec je nutné do výpočtu zahrnout i korekční faktor proudu. Tato korekce je nutná z toho důvodu, že proud je rozložen po celé vrstvě libovolné šířky, ale napětí je odečítáno vždy pouze mezi hroty o vzdálenosti 1.1 mm. Zjišťujeme-li tedy čtvercovou hodnotu odporu, bereme v potaz pouze poměrnou část celkového proudu, která odpovídá vzdálenostem hrotů pro měření napětí. Výše uvedené vyjadřuje vztah

$$R_{sh} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot K_I} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot \frac{s}{w}} = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{w}{s} \quad [\Omega/\square], \tag{2-4}$$

kde U_{23} je napětí na vnitřních hrotech sondy, I_{14} je proud protékající vnějšími hroty, w je celková šířka odporové vrstvy a s je aktivní šířka odporové vrstvy (s=1.1mm).

Neohraničená odporová plocha

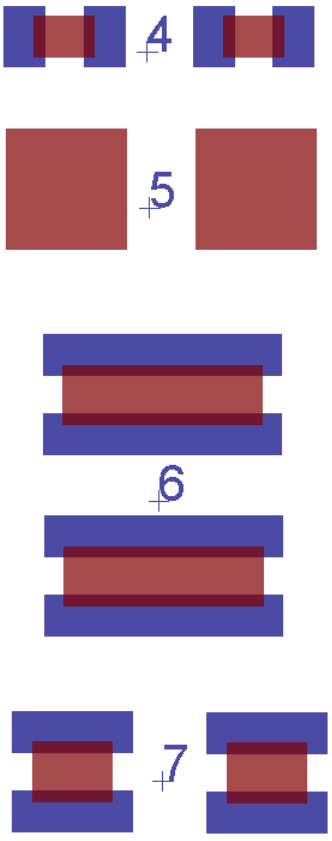
V případě, že vrstvový odpor je natištěn přímo na substrát, neplatí, že el. pole uvnitř vrstvy je homogenní. Hroty proudové sondy jsou umístěny přímo na měřeném vzorku a vytváří se tak nehomogenní el. pole. Tento fakt komplikuje výpočet, protože je

potřeba vzít do úvahy vícero vlivů, a tedy i korekčních faktorů. Za předpokladu, že tloušťka vrstvy bude menší než 0.6mm a proudy tekoucí odporem nebudou příliš vysoké, postačí do výpočtu zahrnout pouze korekci pro plošný rozměr. Potom se hodnota vrstvového odporu vypočítá podle vztahu [9]:

$$R_{sh} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot K_I} = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot C\,, \tag{2-5}$$

kde U_{23} je napětí na vnitřních hrotech sondy, I_{14} je proud protékající vnějšími hroty a C je korekční faktor pro plošný rozměr. Hodnota C je tedy závislá na rozměrech odporové vrstvy.

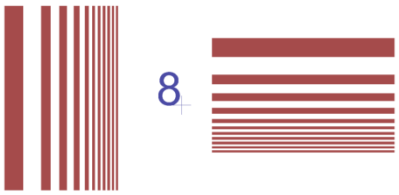
Laboratornímu přípravku z obr. 2.1 byl přizpůsoben návrh motivu pro ověření hodnoty odporu na čtverec ohraničené i neohraničené odporové plochy použité resinátové pasty (obr. 2.3). Segment č. 5 slouží pro měření na neohraničené odporové oblasti – jedná se o čtverec o hraně 6mm. Segmenty č. 4, 6 a 7 budou využity k měření odporu na čtverec na uzavřené odporové oblasti a ke zjištění proudové nosnosti. Hodnota el. odporu segmentu č. 4 vychází ze vztahu 2-2, kde parametr A udává počet čtverců, který je v tomto případě A=1. U segmentu č. 6 je hodnota A=0.2 a u segmentu č.7 A=0.5. Každý typ segmentu je v topologii obsažen dvakrát pro porovnání měřených hodnot.



Obr. 2.5: Motivy TLV odporu a kontaktních plošek

2.3 Rozlišení tisku

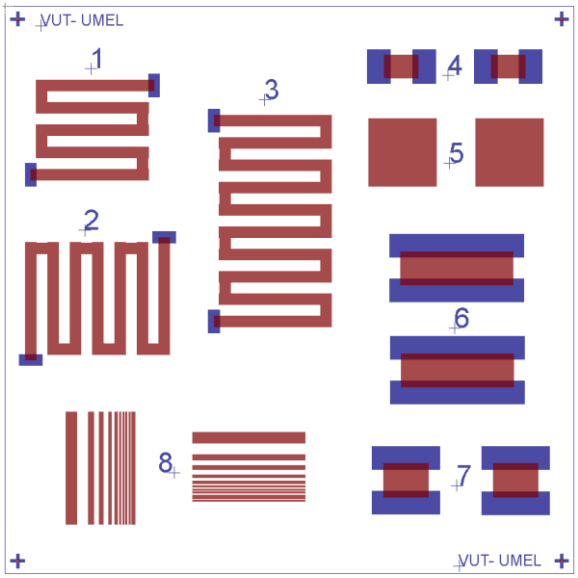
Ostrost tisku patří mezi důležitý ukazatel kvality sítotisku. Mezi nejkritičtější faktory při tisku patří tlak na těrku, rychlost pohybu těrky a průběh odtrhu. Mimo uvedené parametry technologie tisku se na ostrosti výsledného motivu podílí významnou měrou reologické vlastnosti pasty. V případě resinátové pasty RP 070107-15% je garantováno rozlišení ≥130 µm při dodržení správného technologického postupu. Tomu je přizpůsoben návrh motivu, který obsahuje šířky čar a mezer ve sledu 1000-500-300-250-220-200-180-160-150-140-130-120µm (obr. 2.6, na předloze se jedná o segmenty č. 8). Tímto způsobem bude možné zjistit skutečné dosažitelné rozlišení, a to jak ve směru tisku, tak i ve směru kolmém na tisk.



Obr. 2.6: Motiv pro zjištění rozlišení tisku čára - mezera

2.4 Celková topologie testovacího motivu

Rozložení jednotlivých segmentů je znázorněno na obr. 2.7. Návrh byl proveden v programu Eagle Layout Editor v. 6.5.0. Motiv pro rozlišení byl upraven v programu Adobe Photoshop 12.0 CS5, protože export do obrazových souborů v programu Eagle zkresluje šířky čar. Modrou barvou je vyznačena vodivá vrstva, červenou barvou odporová vrstva. Návrh obsahuje i 4 rohové značky sesouhlasení vrstev, jejichž rozměry jsou navrženy podle [6]. Předlohy pro osvit jsou uvedeny v příloze A a B.



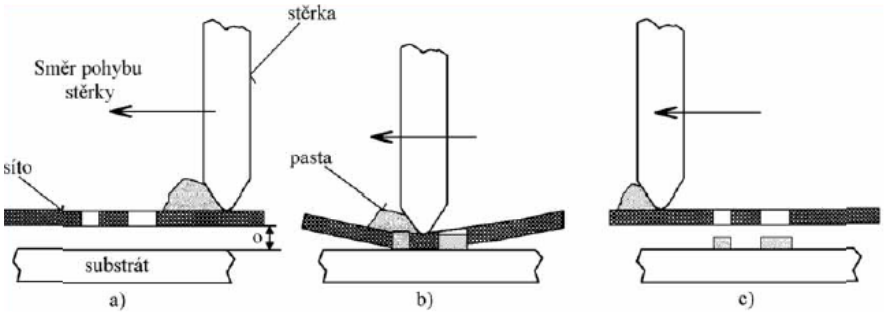
Obr. 2.7: Výsledný motiv

3 VÝROBA TESTOVACÍCH VZORKŮ

Obsahem této kapitoly je popis technologického postupu výroby tlusté vrstvy realizované platinovou resinátovou pastou RP 070107-15% na podložce z korundové keramiky. Nanášení pasty je uskutečněno pomocí sítotiskového poloautomatu Aurel C880. Motiv pro ovrstvení síta vychází z návrhu v předchozí kapitole. Po sítotisku následuje ustálení natisknuté vrstvy, tzv. leveling a dále sušení, jemuž je věnována detailnější pozornost, protože se při něm vyskytují problémy s praskáním pasty. Závěrečnou fází procesu je výpal zasušených vzorků s definovaným profilem v průtažné peci.

3.1 Sítotisk - obecný popis

Sítotisk je nejpoužívanějším způsobem nanášení TLV past na substrát. Další metody jsou např. šablonový tisk nebo dávkování dispenzery. Princip sítotisku spočívá v protlačování pasty těrkou prázdnými oky v sítu s motivem.



Obr. 3.1: Princip sítotisku [5]

Na obr. 3.1 je znázorněn proces tisku přes síto. Stěrka (a) s definovaným sklonem, přítlakem a rychlostí se pohybuje v určeném směru po sítu, které se prohýbá a dotýká se substrátu. Tlačí před sebou pastu, kterou v místě otvoru (oku) v sítu protlačí na substrát (b) a následně dojde s odtržení síta od substrátu a jeho opětovnému natažení (c).

K dostatečně kvalitnímu dosažení vrstvy natištěné pasty je potřeba analyzovat faktory působící v průběhu tisku. Podle [2] lze faktory působící při tisku rozdělit do dvou skupin, a to faktory působící při tisku (vnitřní) a před započetím tisku (vnější).

Vnitřní faktory obsahují:

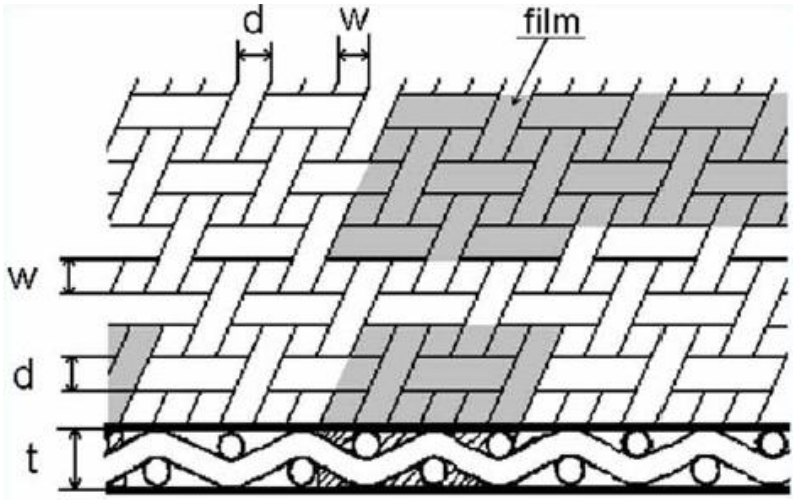
- Výška odtrhu
- Působení síly na stěrku
- Rychlost stěrky
- Úhel stěrky

Vnější faktory, zvolené před započetím tisku, ovlivňují:

- Podložka (drsnost)
- Pasta (viskozita, zrnitost, atd.)
- Síto (materiál, světlost, …)
- Šablona (přímá nebo nepřímá)

Síto - používají se především materiály polyester (PES) nebo nerezová ocel. Přednosti nerezové oceli jsou lepší soutisk než u PES (kvůli většímu napnutí síta v rámu), lepší mech. odolnost a vyšší životnost. Naproti tomu PES je levnější. Kvůli lepšímu rozložení sil během tisku a reprodukovatelnější šířce zejména tenkých vodivých motivů je síťovina upnuta do rámu pod určitým úhlem, zpravidla 45°.

Vytvoření vodivého motivu je možné dvěma způsoby: metodou přímou a nepřímou. Přímá metoda znamená, že světlocitlivá emulze je nanesena na síťovinu přímo, přičemž je vtlačena do ok síťoviny. Následuje světelná expozice přes šablonu a vyplavení nevytvrzených míst. Nepřímou metodou se přilepuje nosič se světlocitlivou emulzí na síto a po expozici se sejme.



Obr. 3.2: Tkanina a její parametry [5]

Na obr. 3.2 je znázorněna síťovina a její rozměry, kde *d* je průměr vlákna, *w* je šířka oka a *t* je tloušťka síta. V místech, kde se nachází vrstva krycího filmu, nebude docházet k přenosu pasty na substrát.

Hlavní parametry tkaniny:

Hustota tkaniny je počet ok na jednotku délky, zde palec a je definována vztahem

$$n = \frac{25{,}4}{w} + d \qquad \text{[mesh]}, \tag{3-1}$$

kde d je průměr vlákna, w je šířka oka.

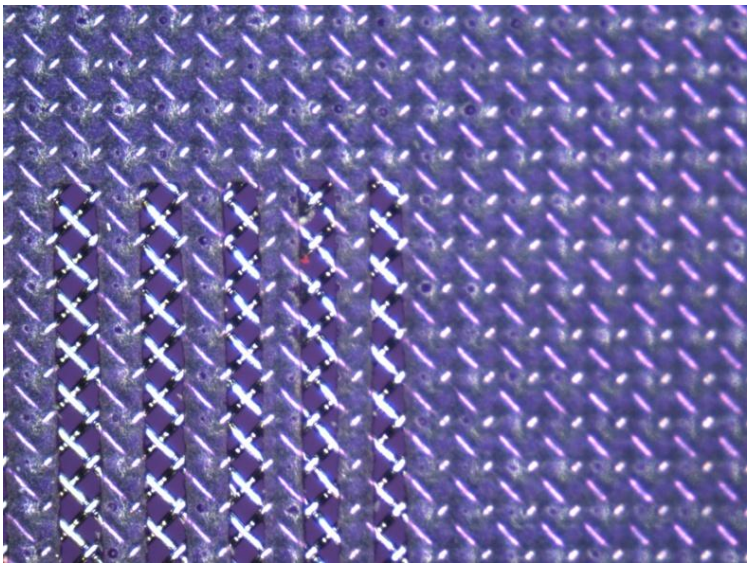
Světlost síta je otevřená plocha mezi výpletem a platí pro ni vztah

$$A_0 = \left(\frac{w}{w+d} + d \right)^2 \cdot 100\% \,. \tag{3-2}$$

Pro hrubá síta je např. n=120 mesh, pro jemná síta, používaná pro vysoké rozlišení, může být n=400 mesh. V případě požadavku na menší tloušťku nanášené vrstvy je vhodnější použít síta s malým průměrem vlákna.

3.2 Ovrstvení síta

K dispozici bylo síto z nerezové oceli o hustotě ok 282 mesh. V technickém listu k resinátové pastě RP 070107-15% je doporučená hodnota 300-350 mesh, avšak v obecných podmínkách aplikace resinátových past od firmy Heraeus se uvádí rozmezí 280-450 mesh. Síto by tedy mělo být dostatečně jemné, přestože se nachází na okraji doporučených hodnot. Dá se tedy očekávat náročnější a citlivější nastavování sítotiskového stroje vzhledem k očekávaným nízkým tloušťkám nanesených vrstev a vysokému rozlišení tisku, což jsou charakteristické vlastnosti resinátových past. Dalším parametrem je tloušťka světlocitlivé emulze, která je doporučená v rozmezí 15-20µm. Ovrstvení bylo zadáno firmě SERVIS CENTRUM a.s. se sídlem v Brně. Předlohy pro osvit, které se nachází v přílohách A a B, byly vytištěny na průhlednou fólii firmou G5 – studio, s.r.o. se sídlem v Brně. Výsledná podoba nanesené emulze na sítu po osvitu je na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Snímek síta z optického mikroskopu - motiv pro rozlišení

3.3 Sítotiskový poloautomat Aurel C880

Pro účely práce je k dispozici poloautomatický sítotisk Aurel C880 (obr. 3.4). Jedná se o přístroj, na kterém vystředění a usazení síta s vytvořeným motivem provádí obsluha. Odpovídající množství pasty se nanese před stěrku a substrát se uchytí podtlakem na posuvnou stolici. Stolice je pak zasunuta pod síto a po nastavení přítlaku je těrka uvedena do pohybu stiskem tlačítka, přičemž dojde k samotnému tisku.

Obr. 3.4: Sítotiskový poloautomat Aurel C880

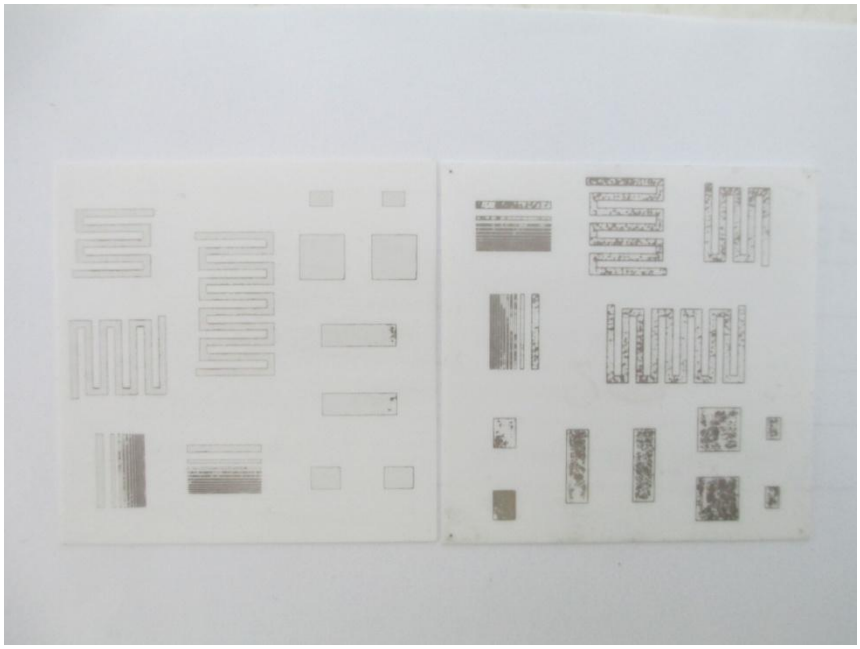
Ovládání – poloautomat Aurel C880 nabízí několik nastavitelných parametrů

- Přítlak na těrku – jeden z nejdůležitějších parametrů tisku. Vzhledem k reologickým vlastnostem pasty, mechanické působení způsobuje změnu její viskozity a tedy i tekutosti. Nastavení přítlaku se provádí otočným šroubem na horní části tělesa těrky, které je umístěno v rameni posuvného mechanismu (obr. 3.5)
- Výška odtrhu – je vzdálenost mezi sítem a podložkou. Při tisku se síto prohýbá a dotýká se substrátu, přičemž po skončení tisku dojde k odtrhu a uvolnění pasty na substrát. Nastavení se provádí otočným šroubem ve střední části poloautomatu
- Rychlost těrky – je nastavitelná jak pro tisk, tak pro zpětný pohyb. Zpomalení rychlosti tisku se dá docílit dotažením šroubu, který má cejchovanou stupnici. Změřený rozsah rychlostí je velmi vysoký, od 0.3 $cm \cdot s^{-1}$ na první rysce po 15 $cm \cdot s^{-1}$ na čtvrté rysce
- Tuhost těrky (na obr. 3.5 vlevo- posuvník ve svislém směru). Dolní poloha posuvníku nastaví vyšší tuhost těrky
- Boční náklon těrky (na obr. 3.5 otočný šroub v pravé části tělesa)

Obr. 3.5: Posuvné těleso těrky umístěné na rameni

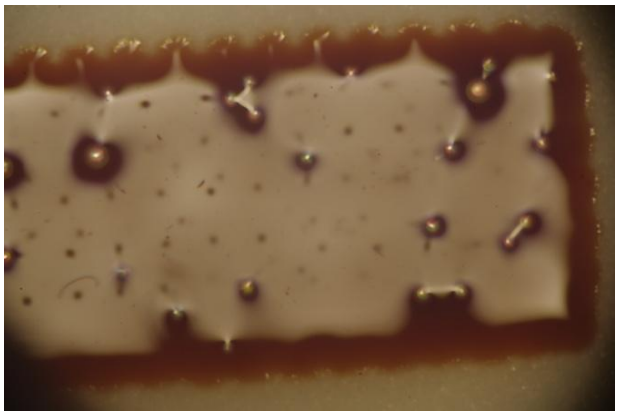
3.4 Tisk resinátové pasty

Sítotisk na poloautomatu je do značné míry intuitivní záležitost, která vyžaduje zkušenost obsluhy a cit pro posouzení vlivu jednotlivých nastavitelných parametrů tisku na výsledný produkt. V případě použití resinátové pasty platí tyto zásady ještě v mnohem větší míře než u klasické cermetové TLV pasty. Hlavní rozdíl tkví v tom, že je potřeba tisk vyladit na takovou úroveň, kdy tloušťka natištěné vrstvy nepřesáhne hodnotu 35 µm (doporučený rozsah čerstvě natištěné mokré vrstvy je 20-35 µm). Změřit takto nízkou vrstvu není jednoduché a její výška je pro výpal zásadní. V laboratoři Ústavu mikroelektroniky se nachází přístroj optické inspekce Ersascope, který byl k tomuto účelu vyzkoušen. Jeho použití bylo užitečné v tom směru, že změřením profilu čerstvě natištěné pasty se podařilo zjistit, že tloušťka vrstvy při vyladěném sítotisku se přibližuje hodnotě 35 µm. Měření však není zcela přesné a uživatelsky příznivé, protože tato hodnota se blíží k měřitelné citlivosti přístroje. Navíc během měření dochází k zanášení vzorků prachem. Proto bylo přistoupeno k jiné metodě vyhodnocení správně natištěných vzorků. Prvním určujícím ukazatelem je průsvitnost a odstín natištěné vrstvy. Je-li vrstva příliš tmavá, určitě je příliš silná. Po zasušení a výpalu takového vzorku dojde k jevu, že pasta se speče k sobě a nepřilne k substrátu (obr. 3.6).

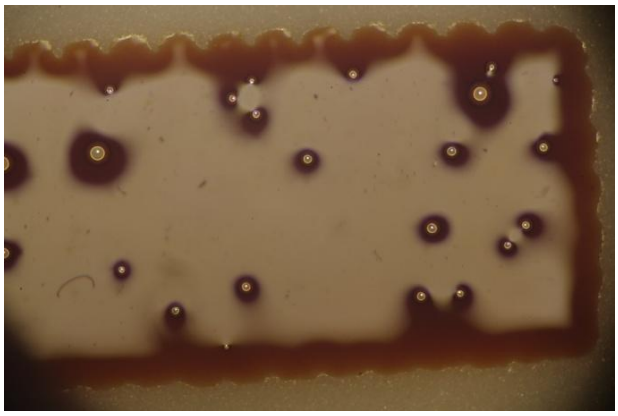


Obr. 3.6: Vzorky po výpalu – velká tloušťka natištěné mokré vrstvy

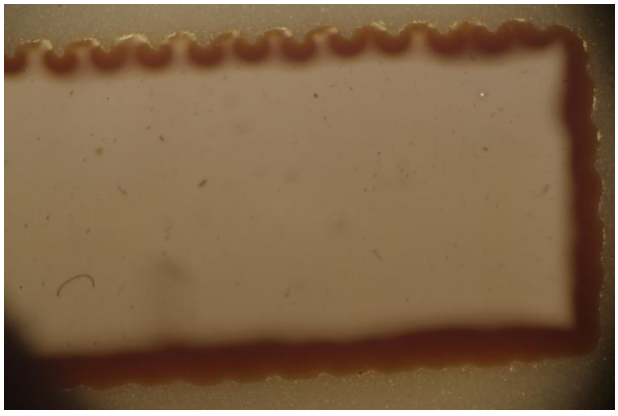
Objektivnějším kritériem k posouzení dostatečně nízké vrstvy mokré pasty se jeví způsob s použitím optického mikroskopu. V laboratoři byl k tomuto účelu využit mikroskop optické inspekce Jenavert. Experimentálně bylo zjištěno, že je-li vrstva dostatečně tenká, okamžitě po tisku je v ní vidět obtisk síta, který rychle mizí (obr. 3.7-3.9).



Obr. 3.7: Obrázek vrstvy z optického mikroskopu okamžitě po tisku



Obr. 3.8: Průběh levelingu v čase t=20s



Obr. 3.9: Průběh levelingu v čase t=60s

Tytéž fotky ukazují i na význam levelingu. Ten následuje okamžitě po tisku a je definován jako časové období, během kterého dojde k rovnoměrnému rozlití pasty a vyrovnání nerovností. Obvyklý postačující časový úsek je 10 až 15 minut. V případě tisku vyšších vrstev je proces levelingu značně pomalejší a k úplnému slití pasty nemusí dojít ani po uplynutí doby 15 minut.

K experimentování byly použity substráty o tloušťce 0.25 mm a k vyladění sítotiskového poloautomatu došlo za následujících podmínek:

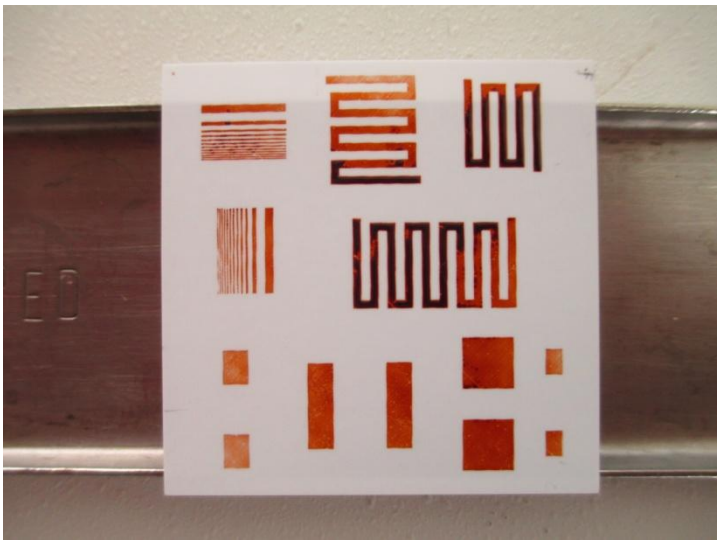
- Výška odtrhu 1.5 mm
- Rychlost těrky 30 $mm \cdot s^{-1}$ (druhá malá ryska na stupnici zleva)
- Velký přítlak (hodnota na stupnici 8)

Během procesu tisku, před ním i po něm je potřeba dbát na čistotu práce, aby bylo co nejvíce zabráněno možné kontaminaci vzorků prachem, případně jinými nečistotami. Doporučení pro tisk jsou následující:

- Pastu po vytažení z lednice nechat ohřát na teplotu okolí, poté otevřít a promíchat
- Vyčistit substráty, síto i posuvný stolek pro uchycení substrátu
- Vyčistit a nasadit těrku
- Po osazení sítotiskového poloautomatu sítem a před započetím tisku s pastou je vhodné vyzkoušet tisk nanečisto, tzn. bez použití pasty. Ideální postup je nastavení výšky odtrhu cca 1.5 mm a přítlak postupně přidávat tak, aby se síto dotýkalo substrátu. Velikost přítlaku je nutno určit experimentálně, protože hodnota na stupnici nemá určující charakter, poněvadž šroub je možno několikrát protočit.
- Nanést odpovídající množství pasty na síto před těrku
- Uvolnit rameno s těrkou vytažením zajišťovacího šroubu a sklopit ho dolů
- Stiskem tlačítka dojde k přejetí těrky přes síto. Je potřeba mít na paměti, že prvním tiskem se zaplní otvory v sítu, a proto až druhý a další tisky je možno považovat za relevantní.

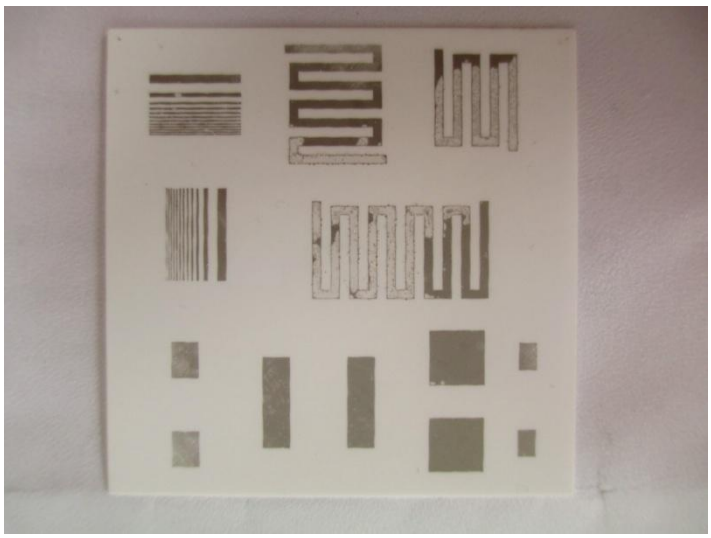
Následuje dolaďování parametrů tisku. Vzhledem k použití resinátové pasty a snaze docílit nízký profil vrstvy je nutno nastavit relativně vysoký přítlak, abychom docílili dostatečné tekutosti pasty, na druhou stranu ale nesmí dojít k prasknutí keramické podložky.

Během tisku se objevuje problém s nerovnoměrností nanesené vrstvy, jak ilustruje obr. 3.10. Tento fakt způsobuje skutečnost, že pasta už je příliš hustá, což je dáno jejím pobytem na vzduchu. V takovém případě je potřeba pastu stáhnout ze síta, síto vyčistit a poté pastu rozmíchat v kelímku a opět nanést na síto. Doba, po kterou je možné tisknout bez tohoto nežádoucího efektu, je 10 až 15 minut. Indikací tuhnoucí pasty je neobvyklý zvuk, doprovázející průběh odtrhu, který by se dal charakterizovat jako mlasknutí. V krajním případě dochází při odtrhu k přilepení substrátu k sítu.



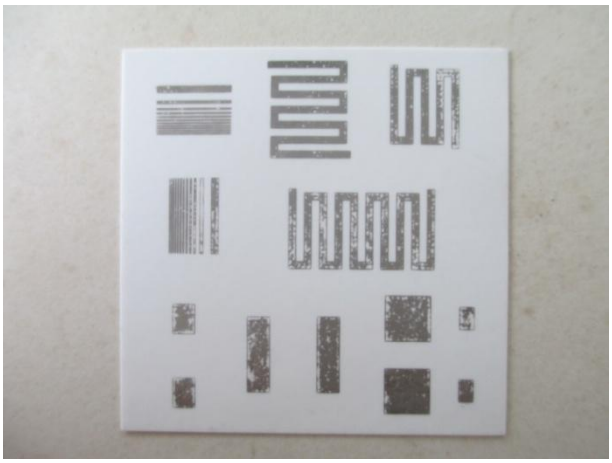
Obr. 3.10: Nerovnoměrně natištěná mokrá vrstva

Na obr. 3.11 je vysušený a vypálený vzorek z obr. 3.10. Jejich porovnáním lze vypozorovat, že příliš tmavý odstín natisknuté pasty signalizuje její příliš silnou vrstvu, která se po vypálení na substrátu neuchytí. Naopak světlá vrstva je příliš tenká, tvoří ji pouze obtisk síta, a tedy nedošlo k jejímu slití. Vrstva je sice na vzorku po výpalu přichycená, ale je nekompaktní, a tedy nepoužitelná.

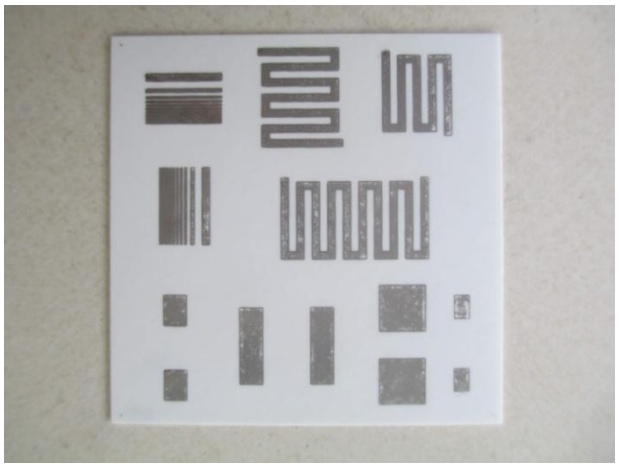


Obr. 3.11: Vzorek s nerovnoměrnou vrstvou (z obr. 3.10) po výpalu

Během práce na vylaďování tisku směřujícímu k celistvosti vypálené vrstvy byl vybrán vzorek z obr. 3.12, který bude podroben přetisknutí. V technickém listě k resinátové pastě RP 070107-15% je uvedeno, že k dosažení vyšších vrstev pasty je možné jich tisknout až několik na sebe, za předpokladu, že každá bude vypálena zvlášť.

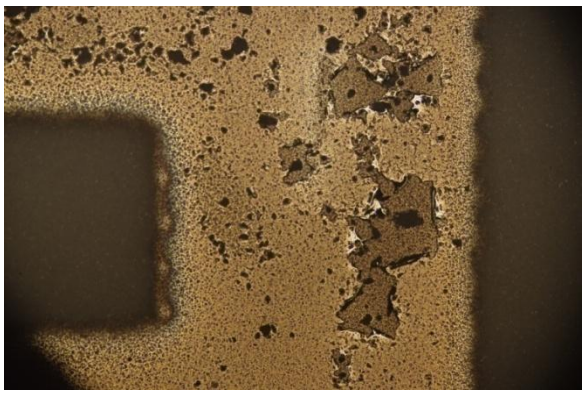


Obr. 3.12: Vzorek vybraný k natisknutí 2. vrstvy



Obr. 3.13: Vzorek s dvojitou vrstvou

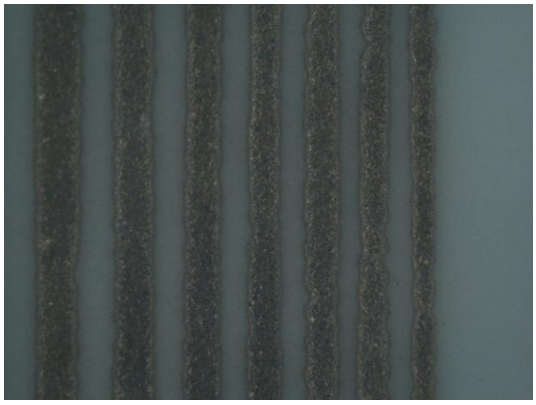
Na obr. 3.13 je vidět výsledek experimentu. Při nedokonale vyladěném tisku dojde k nahodilému překrytí nesouvislých oblastí spodní vrstvy. Na horní vrstvě jiné nesouvislé oblasti naopak vzniknou (obr. 3.14). Při tisku několika vrstev na sebe, obzvláště jemných motivů, je potřeba dbát na soutisk, což je vidět na segmentu č. 8 (motiv rozlišení). Tento vzorek bude podroben měření odporu na čtverec.



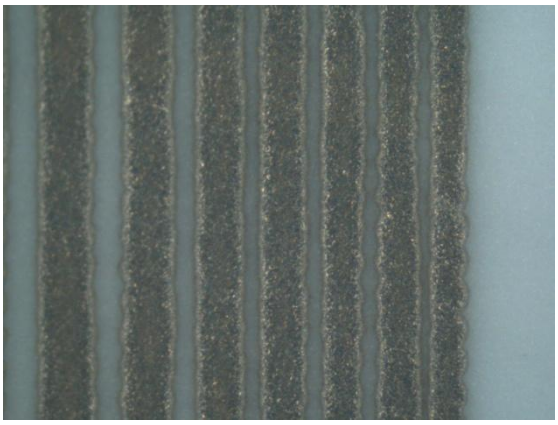
Obr. 3.14: Detail přetisknuté vrstvy

V rámci hledání technologického okna bylo experimentováno i s rychlostí těrky. Ukázalo se, že zvyšování rychlosti tisku má negativní dopad ve snaze zmenšit tloušťku natisknuté vrstvy. Naopak mírné snížení rychlosti (z 30 $mm \cdot s^{-1}$ na 20 $mm \cdot s^{-1}$) může v kombinaci s vhodně nastaveným přítlakem vést k dosažení požadovaného výsledku.

Pokusy s rychlostí těrky a přítlakem vedly k dalším zjištěním ohledně minimální dosažitelné šířky čar a ostrosti tisku. Pozorováním motivu pro rozlišení tisku (segment č. 8) se ukázalo, že zvyšování rychlosti má příznivý vliv při realizaci tenkých čar. Negativní vliv má ovšem zvyšování přítlaku, přičemž je potřeba dodržet určitou minimální úroveň, aby nedocházelo k tisku přerušených čar. Rozdíly ilustrují obr. 3.15 a 3.16. Tyto závěry korespondují se závěry v článku [17], ve kterém se autoři zabývají parametry nastavení sítotisku a jejich vlivy na výslednou tloušťku čar s použitím stříbrné resinátové pasty.



Obr. 3.15: Užší čáry způsobené nastavením parametrů sítotisku

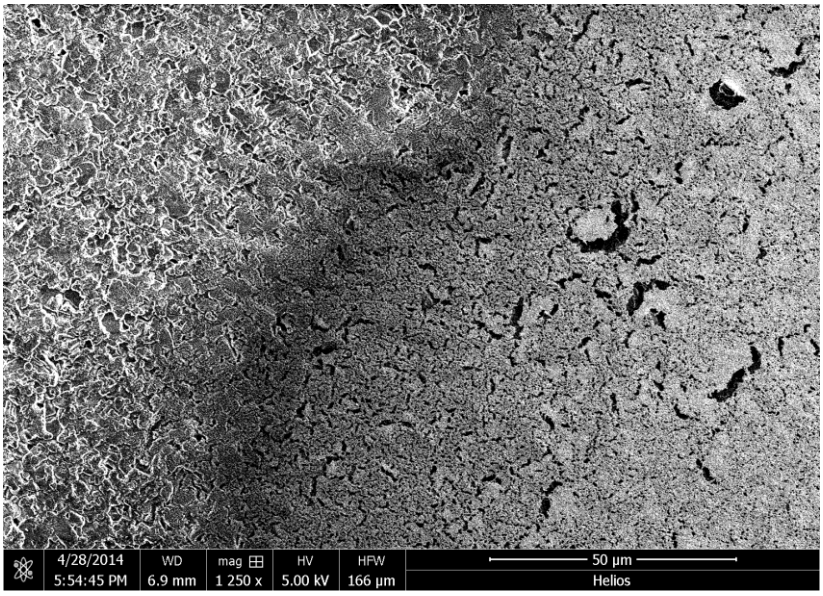


Obr. 3.16: Širší čáry způsobené nastavením parametrů sítotisku

Vzhledem k testovacímu motivu navrženému v kapitole 2 lze učinit závěr, že snaha o dosažení rovnoměrného pokrytí nízkou vrstvou relativně rozsáhlých motivů (segmenty č. 1 až 3, 5) jde proti snaze o dosažení co nejtenčích čar. Tento fakt je vhodné zohlednit už v návrhu motivu a pokud možno volit vhodnou topologii obvodu tak, aby obrazce byly podobného typu, případně rozměru. Například se ukázalo, že nastavení parametrů sítotisku při použití resinátové pasty není tak pracné (a tudíž nemá

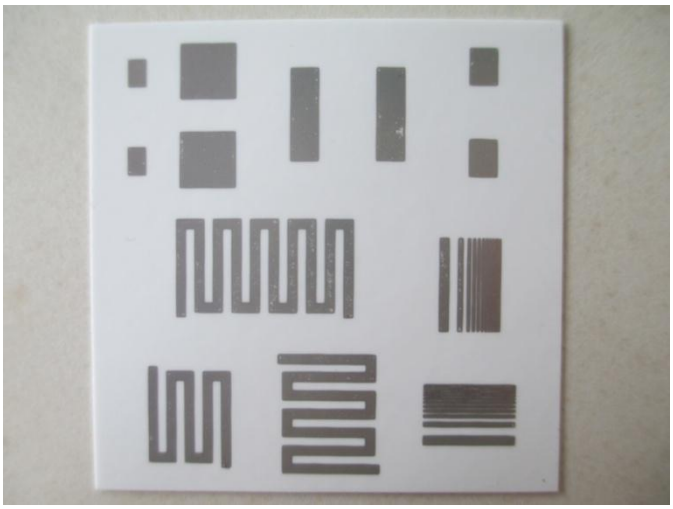
zásadní vliv na výslednou kvalitu vrstvy) pro tloušťky čar od 150 µm do 250 µm, proto je v případě návrhu odporových meandrů možno doporučit držet se uvedených rozměrů.

Jak již bylo uvedeno výše, pro navržený motiv je důležité zajistit, aby nanesená vrstvy byla pokud možno co nejnižší, současně potřebujeme docílit vysoké tekutosti pasty, aby se během levelingu rovnoměrně slila tak, aby během výpalu nedošlo k trhání pasty. Podrobnějším zkoumáním v elektronovém mikroskopu se dá vypozorovat, že pasta kopíruje nerovnosti keramické podložky, která není dokonale hladká a během výpalu pak dochází k trhání pasty (obr. 3.17).



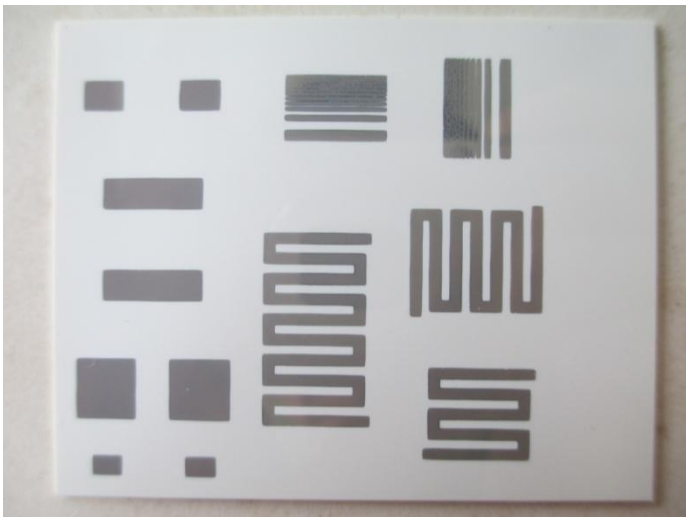
Obr. 3.17: Rozhraní substrát – resinátová pasta

Z důvodu snížení povrchového napětí podložky bylo přistoupeno k experimentu, kdy substrát byl podroben plazmatickému čištění v komoře elektronového mikroskopu při tlaku 40 Pa a výkonu plazmy 6W po dobu 70 hodin. Před samotným plazmováním byly substráty vyčištěny ultrazvukovým vlněním v lázni s isopropylalkoholem. Výsledek pokusu je na obr. 3.18.



Obr. 3.18: Vzorek s plazmaticky vyčištěným substrátem

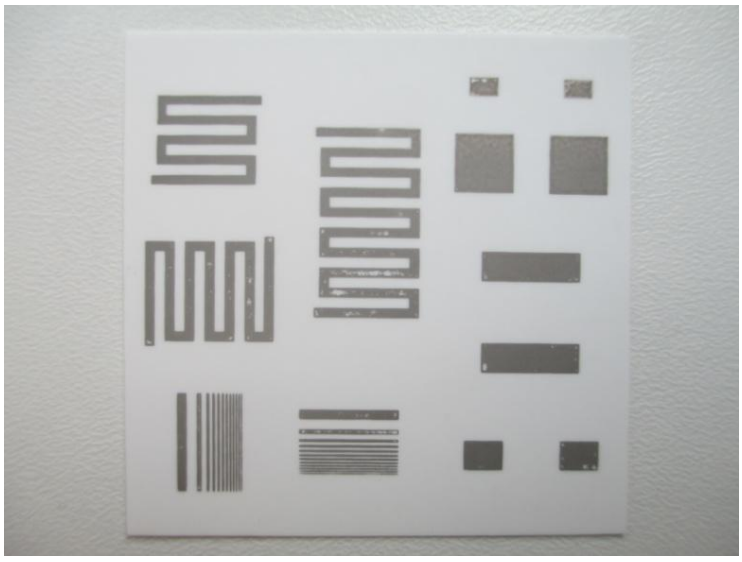
Snížení drsnosti povrchu se dá dosáhnout použitím substrátu s hladším povrchem. V rámci práce byl vyzkoušen substrát SITAL. Jedná se o alumino-silikát s chemickým vzorcem Al_2SiO_5, který je odvozen korundové keramiky Al_2O_3 a oxidu křemičitého SiO_2. Vzorek po výpalu je na obr. 3.19.



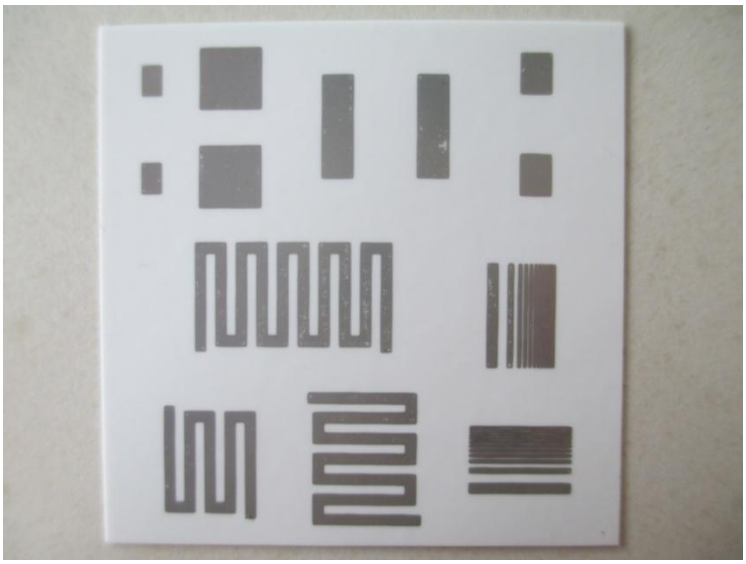
Obr. 3.19: Vzorek se substrátem SITAL

Byl tedy ověřen fakt, že po snížení drsnosti a povrchového napětí podložky dojde k většímu rozlití pasty po podložce, což má za následek skutečnost, že výsledná vrstva je nižší, a proto při výpalu nedochází k trhání pasty a vrstva je kompaktnější. Současně však dojde ke změně rozměrů navržených motivů. V případě odporových meandrů se očekává snížení celkového odporu, protože dojde ke snížení počtu čtverců.

K dosažení celistvosti vrstvy s neupravovaným substrátem z korundové keramiky je potřeba vydat se cestou jemnějšího ladění sítotiskového poloautomatu. Je potřeba přidržovat se postupu, který je uveden na začátku této podkapitoly, tzn. nastavit vysoký přítlak, aby došlo k dostatečnému roztečení pasty, ale jen do té míry, aby nedocházelo ke slívání nejtenčích čar v motivu. Rychlost těrky udržovat mezi 20 – 30 $mm \cdot s^{-1}$, výšku odtrhu 1.5 mm. Vyhodnocení vzorků správně vyladěného sítotisku se provádí optickou kontrolou odstínu vrstvy a pod optickým mikroskopem, kde očekáváme obtisk síta a rychlé slití pasty do celistvé vrstvy (do 1 minuty). Na základě tohoto postupu bylo realizováno 8 vzorků, na kterých bude provedeno měření odporu na čtverec neohraničené odporové oblasti. Z těchto 8 vzorků jsou vybrány 2 vzorky (obr. 3.20 a 3.21), na něž bude nanesena vodivá vrstva a provedeno měření odporu na čtverec ohraničené odporové oblasti, měření teplotního součinitele odporu pasty a proudové nosnosti.



Obr. 3.20: Testovací vzorek č. 1



Obr. 3.21: Testovací vzorek č. 2

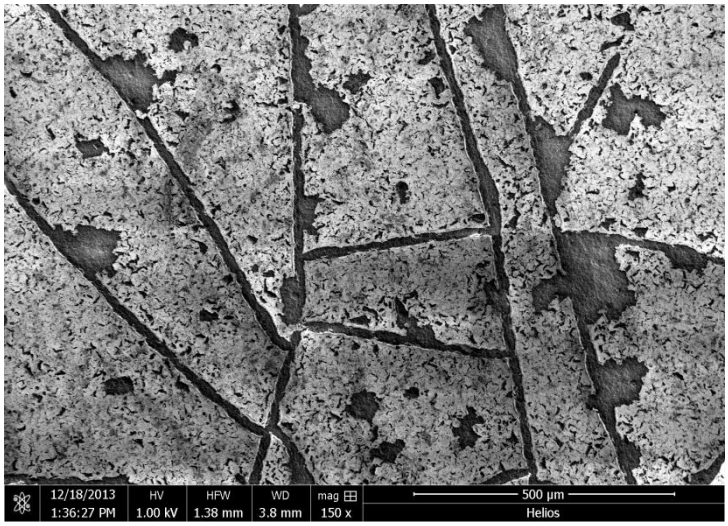
3.5 Sušení resinátové pasty

Dalším krokem v technologickém procesu výroby tlusté vrstvy je sušení a následný výpal. Proces sušení tedy následuje po sítotisku a ustálení natištěné pasty. Je nutný kvůli odstranění těkavých rozpouštědel, které pasta obsahuje k upravení svých reologických vlastností, před vložením do pece. Mezi usušením vzorku a výpalem není stanoven časový limit, výpal je možno provést i několik dní po sušení. V takovém případě je vhodné skladovat vzorky v boxu bez přístupu vlhkosti.

Dle technického listu je pro resinátovou pastu RP 070107-15% doporučena teplota sušení 90°C po dobu 15 minut, přičemž nesmí dojít k přesáhnutí teploty 130°C. V laboratoři Ústavu mikroelektroniky je k sušení tlustých vrstev používána sušička

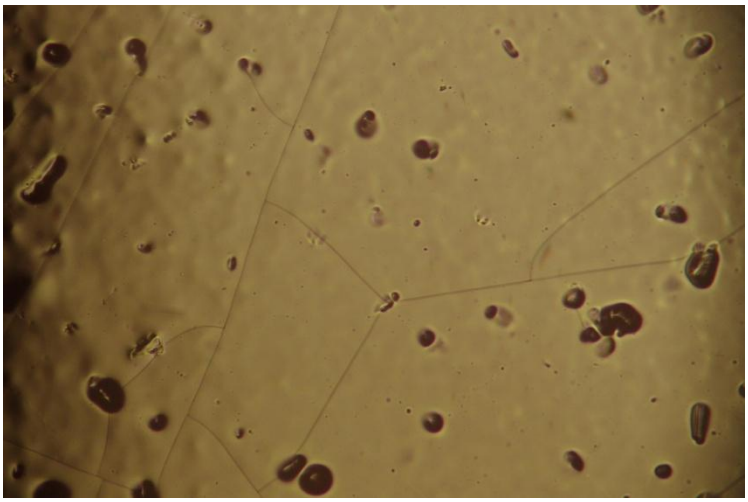
Sterilizátor Chirana HS62A. Tato pec byla použita i k sušení vzorků s resinátovou pastou za dodržení doporučených podmínek výrobce pasty. Po výpalu vzorků se ukázalo, že vrstvy jsou rozpraskané (obr 3.22 a obr. 3.23).

Obr. 3.22: Rozpraskaný povrch – snímek z optického mikroskopu



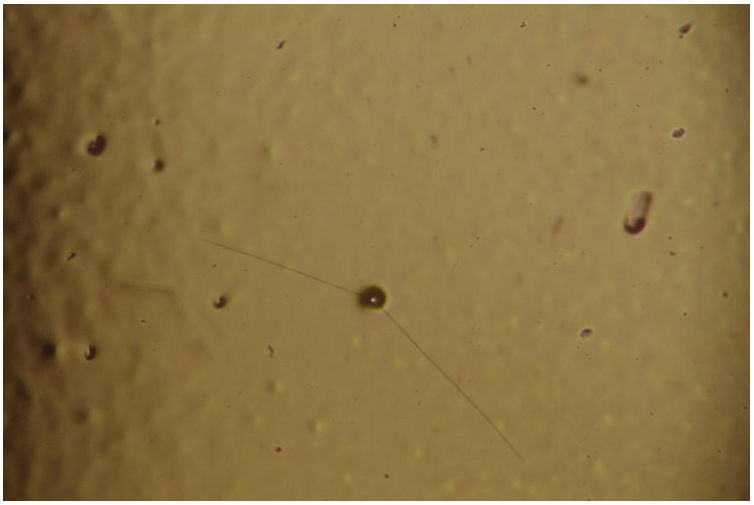
Obr. 3.23: Rozpraskaný povrch – snímek z elektronového mikroskopu

Pozorováním vzorků pod optickým mikroskopem bylo zjištěno, že k praskání dochází už po sušení (obr. 3.24). Je patrné, že ve vrstvě se nacházejí bubliny, kterými praskliny procházejí, a tudíž mohou být jejich příčinou. Byla tedy provedena série opatření k odstranění bublin. Předně je vhodné udržovat substráty, pastu i síto nezanesené prachem a nečistotami. Byl vyzkoušen leveling (ustálení čerstvě natištěné pasty) ve vakuu s následným napuštěním dusíkem a leveling v ultrazvukové vaně. Cílem bylo dosáhnout před sušením rovnoměrného rozložení pasty v celém objemu bez prázdných a volných míst. Žádaný efekt však tyto pokusy nepřinesly.



Obr. 3.24: Praskliny po vysušení vzorku

Další úvaha směřovala k teplotní roztažnosti podložky. Ta je vložením vzorku o pokojové teplotě do pece o teplotě 90°C vystavena teplotnímu šoku, stejně tak její okamžité vyjmutí z pece po dosažení 15 minut. To může být pro vrstvy o tloušťce 30 µm, jež mokrá resinátová pasta dosahuje, problém. Byl proto upraven proces sušení tak, že vzorky byly vkládány do studené pece, ve které byl poté zapnut ohřev na dobu 15 minut při 90°C. Poté byla pec vypnuta a chladnutí probíhalo s otevřenými dveřmi, následně došlo k vyjmutí vzorku. Přítomnost prasklin se pak vyskytuje v mnohem menší míře, ale je vždy patrná (obr. 3.25).



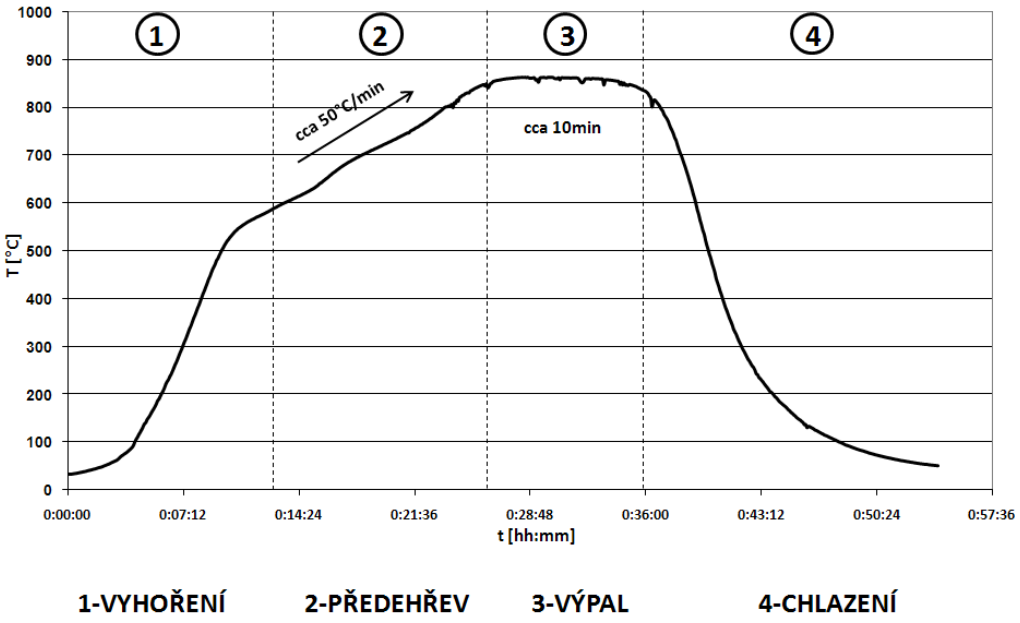
Obr. 3.25: Zmenšený výskyt prasklin po sušení

Problém s praskáním vrstev zcela vymizel s používáním ohřevné desky ERSA Heating-Plate. Tato deska má regulovatelný rozsah teplot od 75 do 300°C (obr. 3.26). Také u ní je však nutné dodržet postup vkládání vzorků na desku za studena – vyjmutí vzorků za studena. Pro praktické použití (kratší doba čekání) je postačující vkládání a vyndávání vzorků při teplotě cca 50 °C. Při používání substrátů o rozměrech 2x2 palce je kapacita desky až 6 vzorků.

Obr. 3.26: ERSA Heating-Plate

3.6 Výpal resinátové pasty

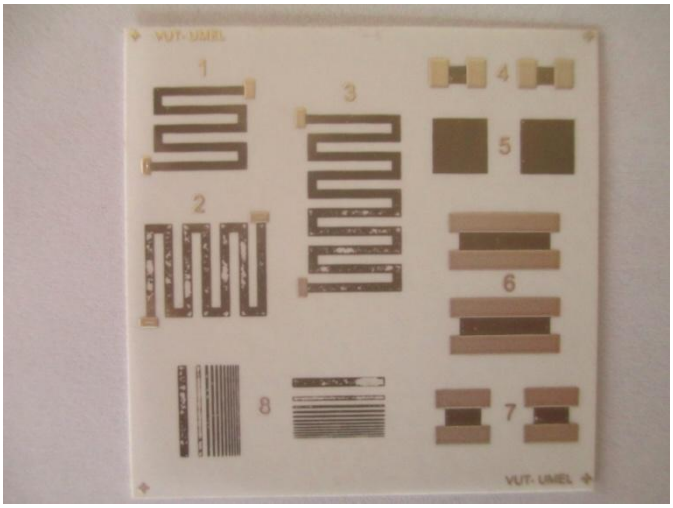
Po zasušení resinátové pasty následuje její přetavení. Během výpalu probíhá rozklad a vyhoření organické pryskyřice (resinu) a nastává slinutí kovové vrstvy a její přichycení na substrát. K výpalu byla používána čtyřzónová průtažná pec BTU BUCR-1 s teplotním profilem 850new z obr. 3.27. Tento profil plně vyhovuje doporučenému požadavku vypalovat pastu RP 070107-15 % při teplotě 850°C po dobu 7 až 10 minut s celkovou dobou cyklu 40 až 60 minut.



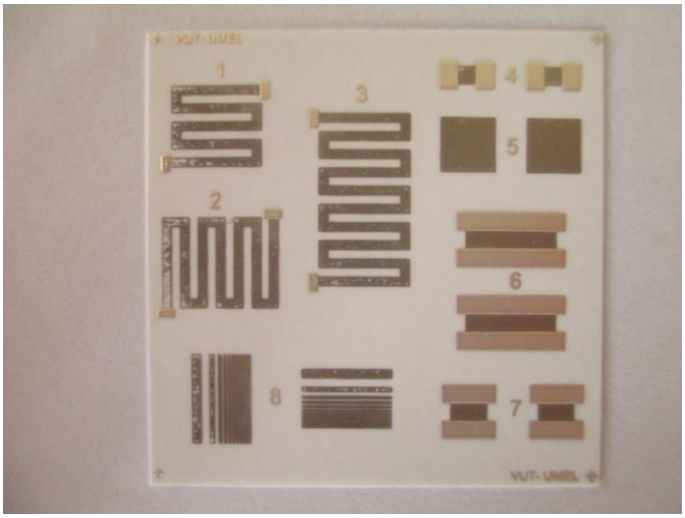
Obr. 3.27: Profil výpalu in-line pece [18]

3.7 Realizace vodivé vrstvy

Pro uskutečnění měření elektrických a teplotních vlastností resinátové pasty je potřeba na ni nanést vodivé plošky, které slouží jako kontakty určené k připojení svorek od zdrojů a měřicích přístrojů. Tyto terminály jsou tvořeny vodivou pastou, stejně tak i čísla motivů pro přehlednost a lepší orientaci na vzorcích. Pro tisk vodivé vrstvy byla vybrána pasta AG CSP-1381. Jedná se o pastu s 83% obsahem stříbra o viskozitě 200 Pa·s určenou pro keramické substráty. Pro tisk vodivé pasty byl použit stejný typ síta jako v případě resinátové pasty, tzn. kovové 282 mesh s tloušťkou světlocitlivé emulze 15µm a sítotiskový poloautomat Aurel C880. Sušení pasty probíhá při teplotě 150°C po dobu 15 minut, opět byl využit ERSA Heating-Plate. Výpal vzorků se uskutečnil s teplotním profilem z obr. 3.27 v průtažné peci BTU BUCR-1. Na obr. 3.28 a 3.29 se nachází 2 kompletní testovací vzorky určené k měření.

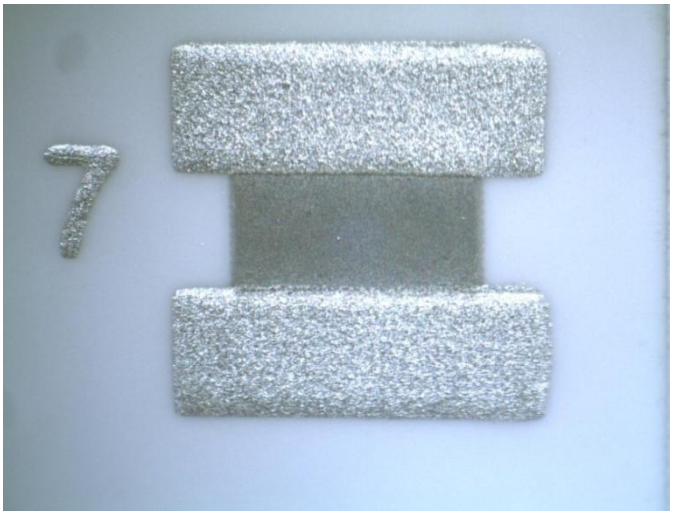


Obr. 3.28: Kompletní testovací vzorek č. 1



Obr. 3.29: Kompletní testovací vzorek č. 2

V detailnějším provedení je na obr. 3.30 vidět nátisk stříbrné vodivé vrstvy na tmavší platinovou resinátovou vrstvu segmentu č. 7 po výpalu.



Obr. 3.30: Segment č. 7 s vodivou vrstvou

4 ANALÝZA VYROBENÝCH VZORKŮ

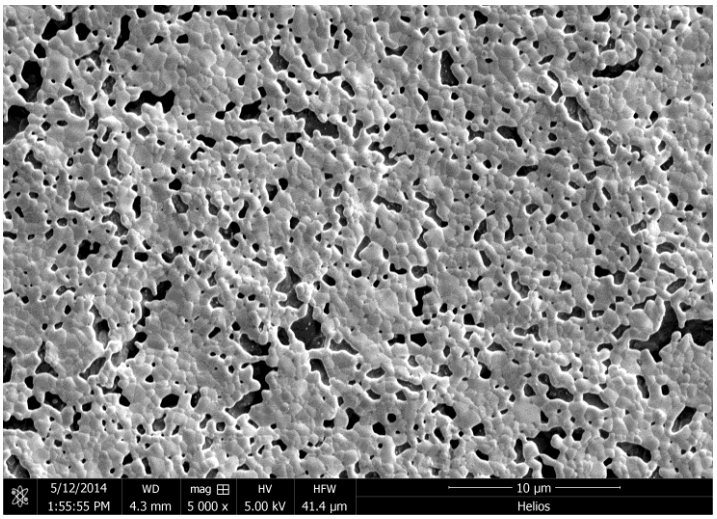
Tato kapitola se věnuje ukázkám povedených vzorků, je přiblížena struktura a chemické složení vrstvy s využitím elektronového mikroskopu, je změřena její tloušťka a šířka nejtenčích čar.

4.1 Celistvost, struktura a materiálové složení

Ukázalo se jako relativně velmi náročné dosáhnout vyladění tisku na takovou úroveň, že všechny segmenty navrženého testovacího motivu měly po výpalu celistvou vrstvu bez většího množství trhlin. Tato vodivá přerušení způsobují zvýšení el. odporu, což bylo ověřeno orientačním měřením. Je tedy žádoucí realizovat vzorky pokud možno dokonale uniformní (obr. 4.1).

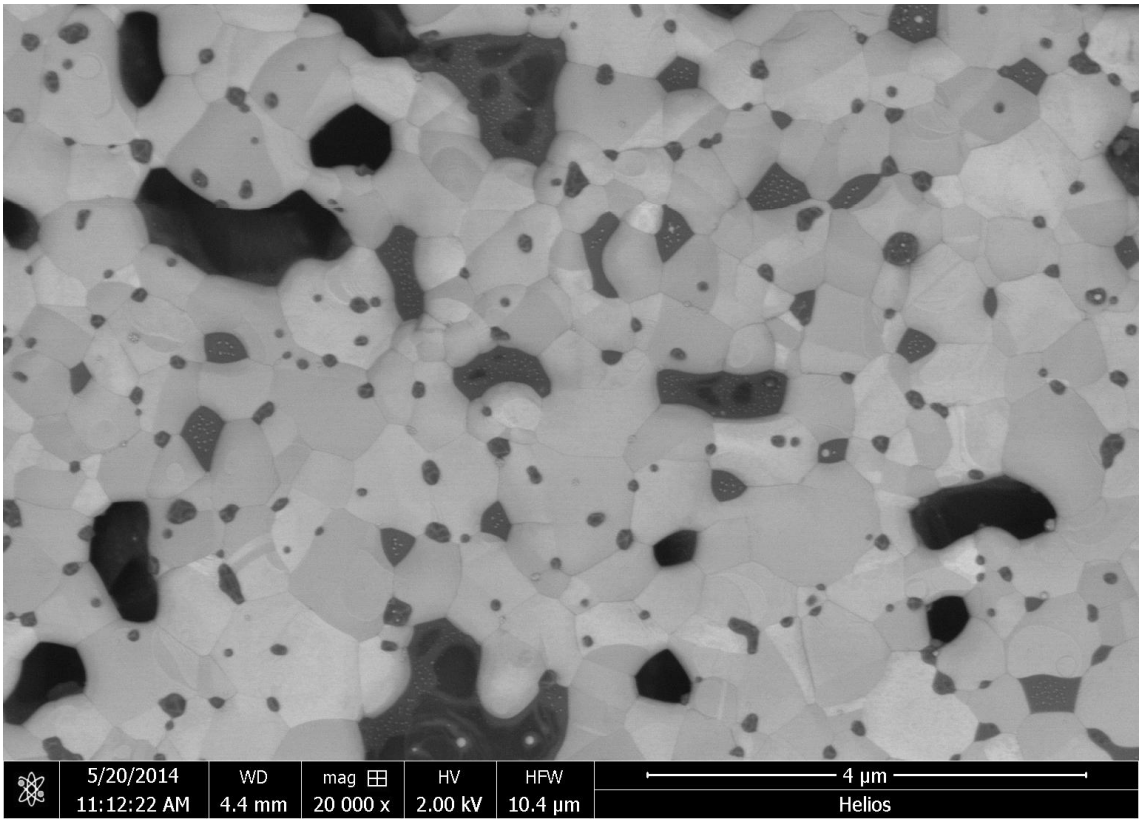
Obr. 4.1: Příklady rovnoměrných kompaktních vrstev

Na obr. 4.2 je povrch vypálené vrstvy snímán sekundárními elektrony v elektronovém mikroskopu. Tyto elektrony mají nízkou energii a vycházejí ze vzorku pouze z povrchu materiálu (v závislosti na energii paprsku – hloubka jednotky až desítky nm). Světlejší oblasti značí vyšší detekci sekundárních elektronů, tzn. povrch je blíže k detektoru. V případě svítících okrajů trhlin se jedná o hranu vrstvy, protože sekundární elektrony jsou emitovány i z bočních okrajů vrstvy.



Obr. 4.2: Ukázka struktury resinátové pasty po výpalu – scintilační detektor

Na obr. 4.3 je povrch vypálené vrstvy snímán zpětně odraženými elektrony v elektronovém mikroskopu. Tyto elektrony mají vyšší energii než sekundární a vycházejí ze vzorku z hloubky jednotek mikrometrů, úroveň kontrastu pak odpovídá střednímu atomovému číslu materiálu vzorku. Černé oblasti odpovídají korundové keramice (trhlina ve vrstvě), světlé oblasti platině (platina má vyšší atomové číslo než korundová keramika). Podle různých odstínů a jemné struktury na světlých oblastech se dá soudit, že vrstva platiny vznikla postupnou krystalizací atomů během výpalu, přičemž různé odstíny odpovídají různým natočením krystalové mřížky. Relativně vysoký plošný odpor platinové resinátové pasty (desetiny Ω) by se dal vysvětlit přechodovým odporem mezi krystaly platiny. Vrstva dále obsahuje šedé oblasti, které by se daly vyhodnotit jako residua pojivové složky, která zůstala jako zbytky organického materiálu po vyhoření. Tyto šedé oblasti obsahují bílé tečky, s největší pravděpodobností se jedná o nevykrystalizované nanočástice platiny.



Obr. 4.3: Ukázka struktury resinátové pasty po výpalu - diodový detektor

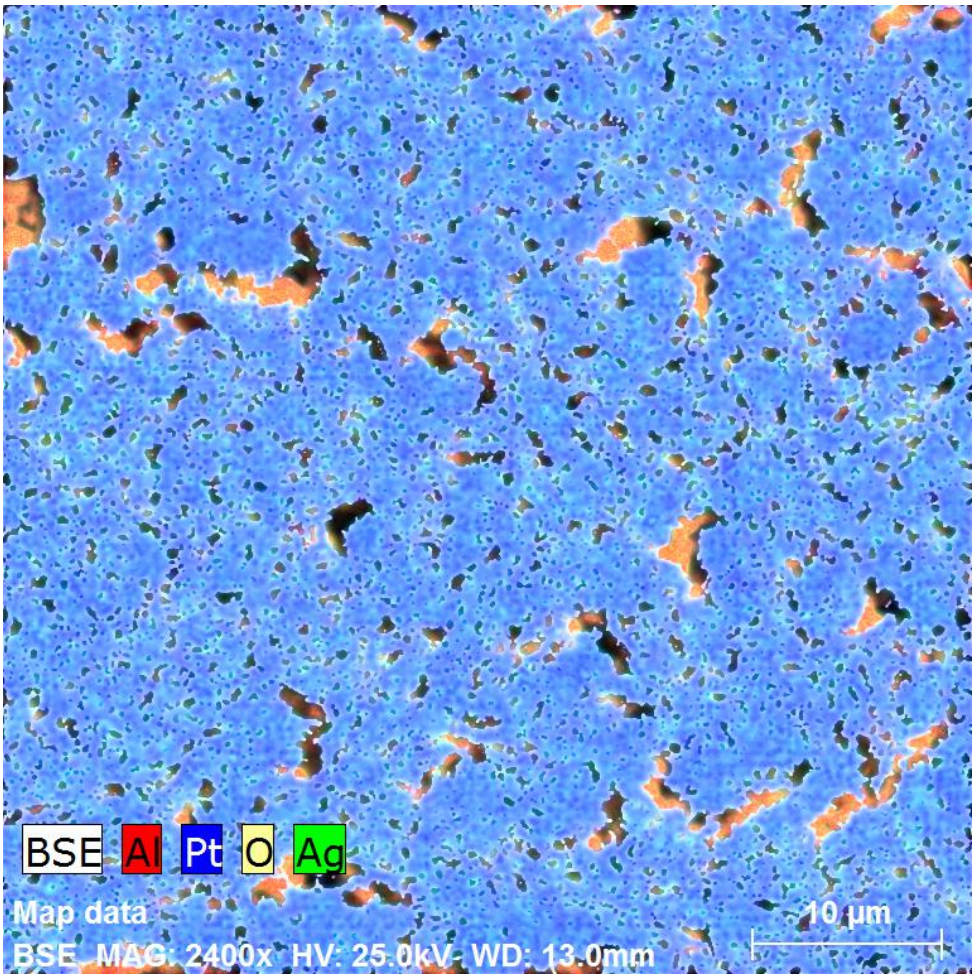
Podrobíme-li vzorek EDS analýze (Energy-dispersive X-ray spectroscopy), získáme procentuální zastoupení prvků ve vzorku (tab. 4). Vzhledem k tomu, že nebyl zjištěn výskyt jiného prvku, šedé oblasti by mohly skutečně odpovídat zbytkům organického materiálu po výpalu a vysoký podíl atomů uhlíku ukazuje na jeho amorfní strukturu (větší hustota než u krystalické platiny). Výskyt uhlíku je ovšem potřeba brát s rezervou, protože se vyskytuje v EDS analýze vždy, s libovolným vzorkem (i

čištěným), navíc bude nejspíš zastoupen i ve vodivém lepidle, které je na vzorku z toho důvodu, aby se vzorek nenabíjel – je přizemněn vodivým lepidlem obsahujícím stříbro, jenž je v analýze také přítomno. Kyslík a hliník ukazují na korundovou keramiku a oxidy, možná je i přítomnost kyslíku ve zbytcích pojiva.

Tab. 4: Zastoupení prvků ve vzorku (při energii primárního svazku 25keV)

Prvek	Atomové číslo	% hmotnostní	% atomů
Pt	78	84.3	32.0
C	6	6.5	39.7
O	8	4.7	21.8
Ag	47	2.8	1.9
Al	13	1.1	3.1
Si	14	0.6	1.6

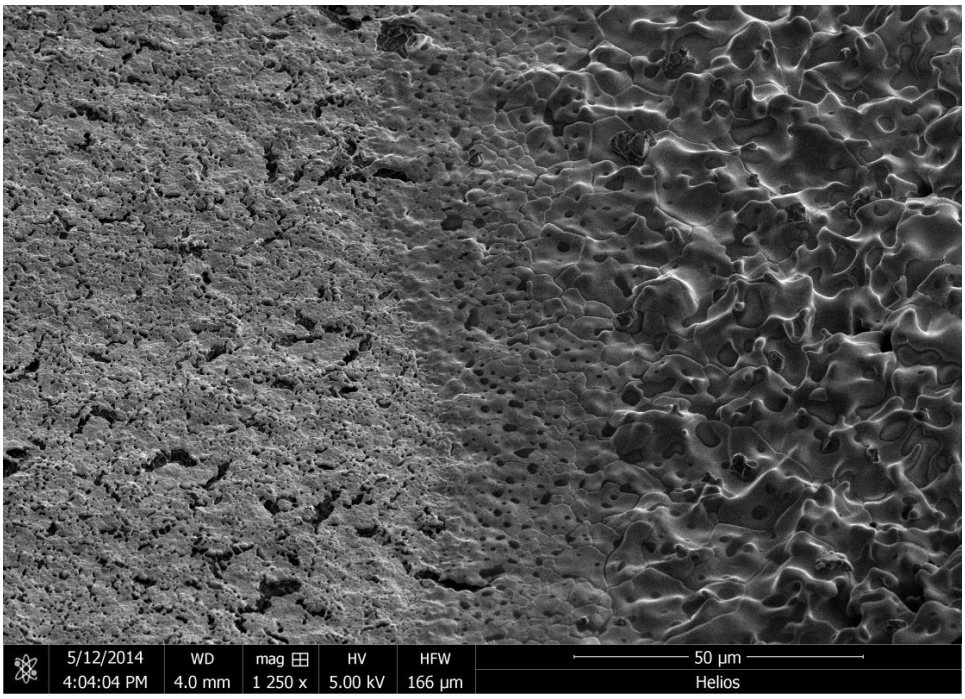
Na obr. 4.4 je zobrazena mapa prostorového rozložení jednotlivých prvků. Tmavé oblasti pak označují místa, kam detektor nedohlédne, protože je vůči vzorku umístěn pod úhlem.



Obr. 4.4: Mapa rozložení prvků ve vzorku

V příloze E je znázorněno rozložení spektrálních čar, vodorovná osa zobrazuje energie elektronů od určitých slupek v elektronovém obalu atomů.

Na obr. 4.5 je snímek pro porovnání vrstev resinátové platinové vrstvy a vodivé stříbrné vrstvy. Vzorek je snímán v úhlu 52°. Vidíme, že resinátová vrstva je několikanásobně nižší a hladší než vrstva z vypálené cermetové pasty, obsahuje však trhliny. Také můžeme vyvodit, že došlo k bezproblémovému napojení obou zmíněných vrstev na sebe.



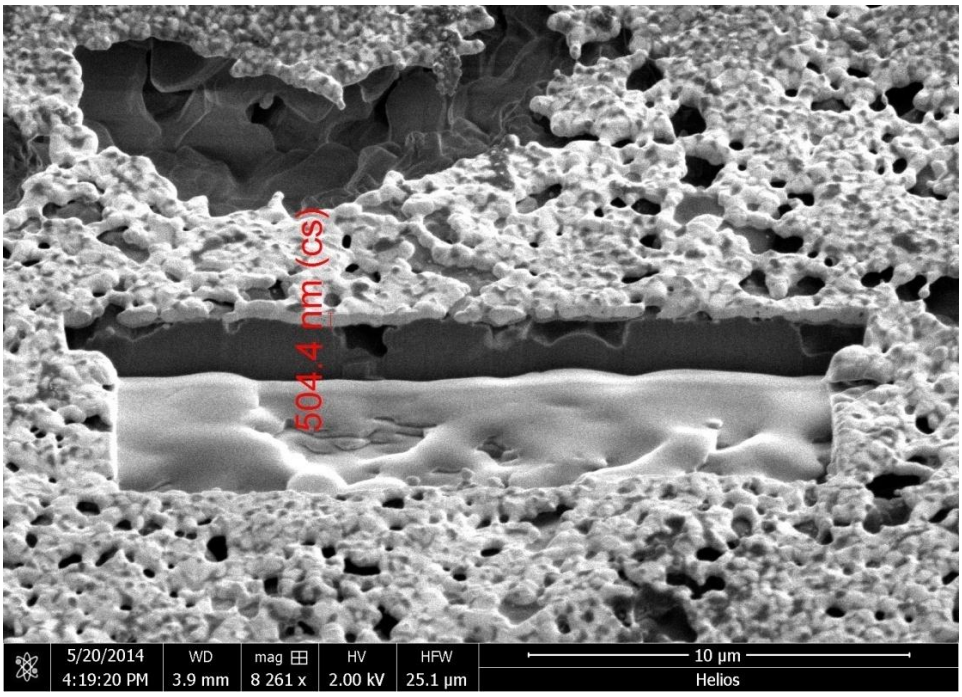
Obr. 4.5: Rozhraní resinátová Pt vrstva - vodivá Ag vrstva (v úhlu pozorování 52°)

4.2 Tloušťka vrstvy

Významnou vlastností resinátové pasty je tloušťka vrstvy po výpalu, jenž dosahuje hodnot menších než 1µm, čímž se blíží k technologii tenkých vrstev, která se však vyrábí napařováním nebo naprašováním ve vakuu, na rozdíl od levnější depozice resinátové pasty sítotiskem.

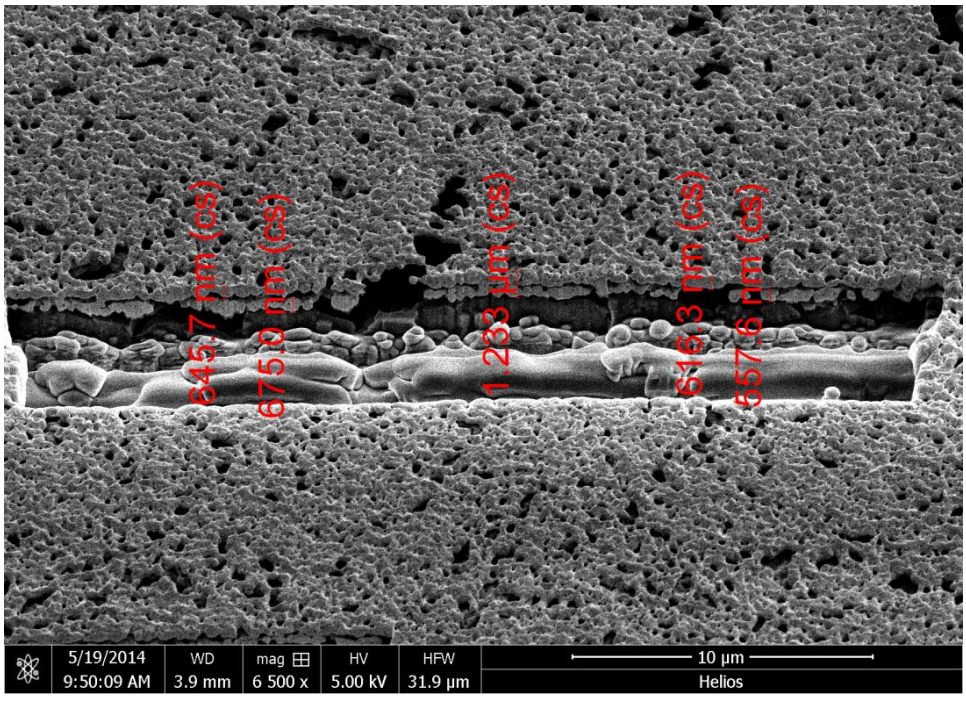
Pasta RP 070107-15% má v technickém listu uvedeno rozmezí vypálené vrstvy 0.1-0.3 µm s použitím síta 325 mesh, tloušťkou emulze 15 µm a šířkou natištěné čáry 500 µm.

Pro zobrazení profilu vrstvy a změření její výšky byl zvolen způsob využívající elektronového mikroskopu. Po provedení řezu jontovým paprskem je vzorek zobrazen elektronovým paprskem pod úhlem 45°. Tloušťka vrstvy byla změřena 500nm (obr. 4.5-značka CS neboli cross section v závorce označuje softwarové přepočtení hodnoty zahrnující úhel náklonu vzorku). Tato hodnota by se dala označit jako maximální, protože ze snímku je patrné, že povrch pasty není hladký, nýbrž je velmi členitý.



Obr. 4.6: Řez jontovým paprskem – jedna vrstva

Na obr. 4.6 je snímek se vzorkem, jenž obsahuje dvě vrstvy, přičemž každá se vypaluje zvlášť. Měření ukazuje, že obě vrstvy dosahují přibližně stejné tloušťky. Tisknutí několika vrstev na sebe je doporučený způsob, jak dosáhnout vyšších výsledných vrstev.



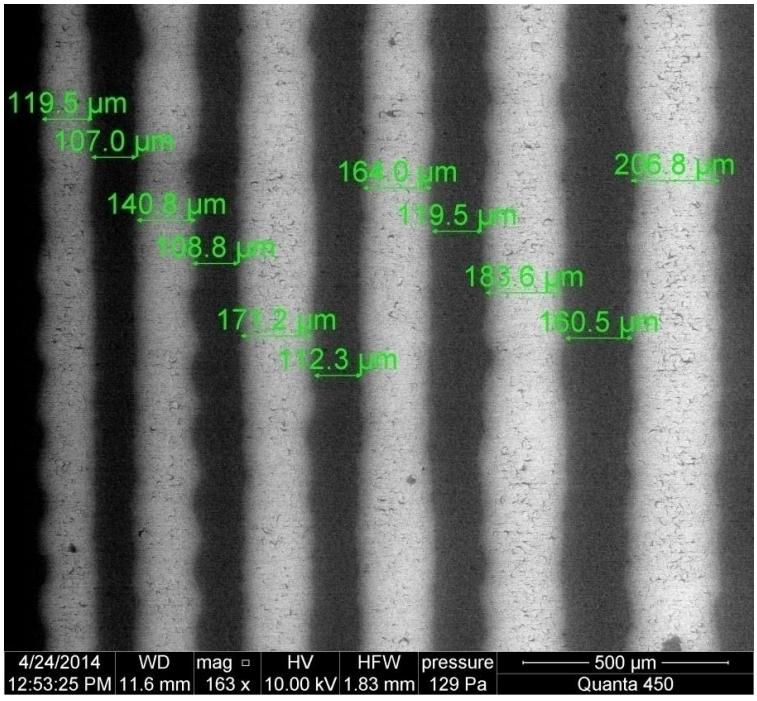
Obr. 4.7: Řez jontovým paprskem – dvě vrstvy

4.3 Rozlišení tisku

Dle předpokladů by měla používaná resinátová pasta mít schopnost dosáhnout šířky čáry a mezery 130 µm. Byl tedy navržen motiv, který zahrnuje nejtenčí šířku čáry a mezery 120 µm, následují 130, 140, 150, 160, 180, 200 µm atd. Na obr. 4.7 je snímek z elektronového mikroskopu dokazující, že uskutečnit šířku čáry 120 µm je možné. Nesnadnější úlohou je zajistit, aby čáry na navrženém motivu č. 8 měly přesný požadovaný rozměr. Snímek byl pořízen v elektronovém mikroskopu v režimu vysokého tlaku za přítomnosti vodních par, aby došlo k neutralizaci nabíjení nevodivé podložky z keramiky.

Na rozdíl od ostatních motivů na vzorku, tisk těchto tenkých čar (segment č. 8) se dařil bez větších problémů. Dá se usuzovat, že výška natištěné pasty nemá zásadní vliv na degradaci pasty při výpalu při použití dostatečně tenkých čar, a proto nastavení parametrů sítotisku vedoucí k úspěšné realizaci (celistvé vrstvě) takového motivu je jednodušší. Vliv parametrů sítotisku na šířce čar je uveden v kapitole 3. Zároveň je potřeba zmínit, že nebyl zjištěn vliv natočení čar na směr tisku na výsledném provedení.

Dosažitelného rozlišení tisku resinátové pasty se věnují autoři v článku [19]. Ukázali, že s použitím speciálních extra jemných sít, nízké emulze a speciálně upravené pasty se dá uskutečnit tisk až 50 µm tenkých čar. Pod tuto hranic se dá dostat se sítem s šířkou vlákna pod 18µm, které má velkou světlost.



Obr. 4.8: Šířky čar

5 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ RESINÁTOVÉ PASTY

S kvalitou výsledného provedení vyrobených vzorků úzce souvisí jeho elektrické a tepelné vlastnosti, především el. odpor. Vybrané vzorky jsou proto podrobeny měření plošného odporu, TKR a proudové nosnosti. Výsledky jsou srovnány s očekávanými předpoklady.

5.1 Odpor na čtverec

Charakteristickou vlastností tlustovrstvové pasty je plošný odpor, který je dán složením pasty. Možný způsob měření čtyřbodovou metodou je popsán v kapitole 2. Na laboratorním přípravku z obr. 2.3 byla provedena série měření, a to s neohraničenou odporovou oblastí na 8 vzorcích a s ohraničenou odporovou oblastí na 2 vzorcích.

5.1.1 Neohraničená odporová oblast

Bylo vybráno 7 vzorků s kompaktní vrstvou segmentu č. 5 a vzorek s dvojitou vrstvou (značen A). Každý segment je na vzorku zastoupen dvakrát, proto jsou číslovány 5a a 5b. V tab. 5 jsou výsledky měření.

Tab. 5: Měření plošného odporu na neohraničené odporové oblasti

Vzorek	Segment	I_{14} [mA]	U_{23} [mV]	$R_{\square}$ [Ω]
1	5a	107,8	28,5	1,44
	5b	108,2	26,1	1,32
2	5a	100,0	24,0	1,31
	5b	107,3	27,3	1,39
3	5a	107,9	27,9	1,41
	5b	106,5	27,1	1,39
4	5a	100,5	22,0	1,19
	5b	100,3	23,5	1,28
5	5a	108,7	26,8	1,34
	5b	108,5	27,1	1,36
6	5a	108,2	31,0	1,56
	5b	104,6	30,6	1,60
7	5a	109,5	23,8	1,19
	5b	107,9	25,0	1,26
A	5a	100,2	15,6	0,85
	5b	107,1	24,1	1,23

Výpočet byl proveden podle rovnice (2-5), příklad výpočtu odpovídá prvnímu řádku tabulky:

$$R_{sh} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot K_I} = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot C = \frac{28{,}5mV}{107{,}8mA} \cdot \frac{6mm}{1{,}1mm} = 1{,}44\,\Omega/\square \ .$$

K měření byly použity ampérmetr a voltmetr UNI-T, UT804 a zdroj PSM3 – Multichannel High Performance Regulated DC Power Supply.

V technickém listu k pastě RP 070107-15% je uvedeno předpokládané rozmezí plošného odporu v rozmezí 0.8-1.2Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 10µm a 0.4-0.8Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 15µm. Naměřený odpor je ve většině případů vyšší, tzn. buď byla nanesena nižší vrstva platiny (nepravděpodobné), nebo tuto skutečnost způsobuje nedokonalá kompaktnost vrstev. Výjimku tvoří vzorek A, který obsahuje dvě vrstvy platiny - na segmentu 5a se podařilo dosáhnout nižšího odporu než na ostatních vzorcích i přes nedokonalost tisku (obr. 3.12 až 3.14). V každém případě se dá tvrdit, že plošné odpory vykazují podobné hodnoty na stejných vzorcích a liší se vzorek od vzorku. Odchylku od skutečné hodnoty odporu může způsobovat i nepřesnost měření zanesením korekčního faktoru do výpočtu.

5.1.2 Ohraničená odporová oblast

Měření plošného odporu na ohraničené ploše je charakteristické rovnoměrným rozložením proudu v celém objemu vrstvy připojením kontaktů na vodivé plošky. V tab. 6 jsou shrnuty výsledky měření čtyřbodovou metodou.

Tab. 6: Měření plošného odporu na ohraničené odporové oblasti

Vzorek	Segment	I_{14} [mA]	U_{23} [mV]	s [mm]	w [mm]	K_I [-]	$R_\square$ [Ω]
1	4a	104,5	125,8	1,1	2	0,55	2,19
	4b	104,2	82,0	1,1	2	0,55	1,43
	6a	104,5	11,8	1,1	10	0,11	1,03
	6b	104,4	11,6	1,1	10	0,11	1,01
	7a	104,5	26,1	1,1	4	0,275	0,91
	7b	104,4	29,4	1,1	4	0,275	1,02
2	4a	105,5	82,4	1,1	2	0,55	1,42
	4b	105,8	87,6	1,1	2	0,55	1,51
	6a	105,3	14,7	1,1	10	0,11	1,27
	6b	105,0	14,3	1,1	10	0,11	1,24
	7a	105,2	35,5	1,1	4	0,275	1,23
	7b	104,8	32,3	1,1	4	0,275	1,12

Měření odporu segmentu 4a na vzorku č. 1 je ovlivněno jeho nedokonalostí.

Ačkoliv se na první pohled jeví jako kompaktní, při bližším zkoumání se ukázalo, že plocha souvislé vrstvy je přibližně poloviční, na ostatní ploše je pouze obtisk síta.

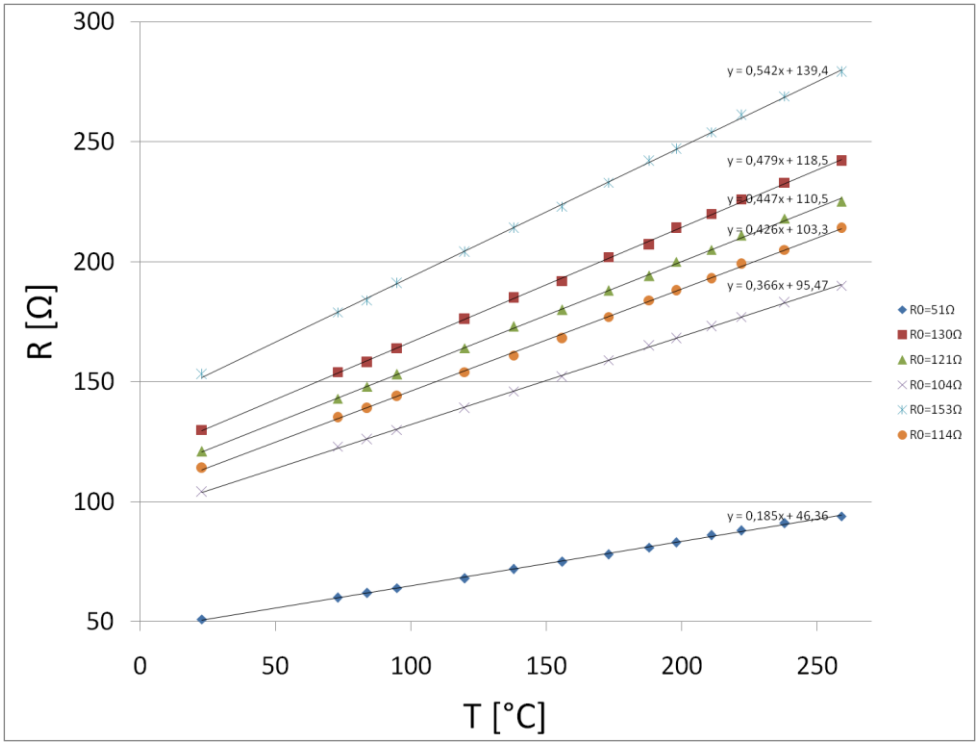
Výpočet byl proveden podle rovnice (2-4), příklad výpočtu odpovídá prvnímu řádku tabulky:

$$R_{sh} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot K_I} = \frac{U_{23}}{I_{14} \cdot \frac{s}{w}} = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{w}{s} = \frac{125{,}8mV}{104{,}5mA} \cdot \frac{2mm}{1{,}1mm} = 2{,}19\,\Omega/\square.$$

Vidíme, že měření čtyřbodovou metodou vykazuje nižší hodnoty plošného odporu pro nižší celkové hodnoty odporů segmentů (počet čtverců segmentu č. 6 je A=0.2, u segmentu č. 7 A=0.5). Toto může vysvětlovat nepřesné určení korekčního faktoru proudu vzhledem k velké celkové šířce plochy měřené vrstvy.

5.2 Teplotní koeficient odporu

Významným parametrem platinové resinátové pasty je její teplotní součinitel odporu. Udává závislost odporu na teplotě a charakteristickou aplikací jsou teplotní snímače. Měření bylo provedeno na ohřevné desce Ersa heating plate z obr. 3.26 s termočlánkem připojeným k multimetru METEX M-3860M a přilepeným kaptonovou páskou k substrátu. Odpor byl odečítán multimetrem UT 33C s vnitřním odporem přívodů 0.3 Ω, jenž byl ve vyhodnocení zanedbán. Na obr. 5.1 je graf závislosti odporů odporových meandrů č. 1, 2 a 3 na vzorcích č. 1 a 2 na teplotě.



Obr. 5.1: Teplotní závislost odporu resinátové pasty R=f(T) pro různé hodnoty odporů

V tab. 7 je hodnota TKR_1 určena jako teplotní změna odporu krajních změřených hodnot, TKR_2 je vypočtena z rovnice regrese proložené křivky změřených hodnot pomocí programu Excel.

Tab. 7: Změřené hodnoty odporů při teplotě 23°C a vypočtené hodnoty TKR

	Vzorek č. 1			Vzorek č. 2		
	Segment č. 1	Segment č. 2	Segment č. 3	Segment č. 1	Segment č. 2	Segment č. 3
R_0 [Ω]	51	130	121	104	153	114
TKR_1 [ppm/K]	3573	3651	3642	3504	3490	3717
TKR_2 [ppm/K]	3627	3685	3694	3519	3542	3737

Příklad výpočtu je uveden níže, odpovídá prvnímu sloupci v tab. 4. Jednotka je uvedena v ppm/K, přestože bylo měření provedeno v °C, protože relativní změna teploty je shodná u obou jednotek.

$$TKR_1 = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{1}{51\Omega} \cdot \frac{(94-51)\Omega}{(259-23)°\mathrm{C}} \cdot 10^6 = 3573 \mathrm{ppm/K}.$$

$$TKR_2 = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{1}{51\Omega} \cdot 0{,}185 \cdot 10^6 = 3627 \mathrm{ppm/K}.$$

Na první pohled je zřejmé, že závislost odporu na teplotě resinátové pasty RP 070107-15% v rozmezí měřených teplot je lineární. Velikost TKR se pohybuje v rozmezí hodnot 3490 až 3737 ppm/K. V technickém listu k této pastě je teplotní součinitel odporu v rozmezí teplot 25-125°C uváděn 3300-3600ppm/K při tloušťce usušené vrstvy 15µm a 3300-3450 při tloušťce usušené vrstvy 10µm.

Dále si můžeme povšimnout, že s výjimkou 50Ω meandru na vzorku č. 1, všechny ostatní segmenty mají vyšší odpor než navržený. Navržené hodnotě odporu se ještě blíží segment č. 3 na vzorku č. 1 i 2, který má skutečnou hodnotu při pokojové teplotě 121Ω, resp. 114Ω, přičemž navržen byl na 100Ω. Přesná hodnota odporu se dociluje relativně obtížně vzhledem k tomu, že plošný odpor hodně závisí na tloušťce vrstvy, což předpokládá i výrobce pasty, který vydal 2 verze technického listu, kdy v jedné z nich je uvedeno předpokládané rozmezí plošného odporu v rozmezí 0.8-1.2Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 10µm a 0.4-0.8Ω/□ při tloušťce usušené vrstvy 15µm. Výsledný odpor dále úzce závisí na výsledném provedení vrstvy, která v případě většího množství trhlin má logicky větší odpor. Tento fakt je vidět i v tab. 7, kde oba segmenty č. 2 mají výrazně vyšší hodnotu než navrženou (70Ω), oba také byly během měření značně nekompaktní.

5.2.1 Teplotní snímač PT100

Hodnotě odporu 100 Ω při teplotě 23°C se nejvíce blíží segment č. 1 na vzorku č. 2, a proto jej můžeme prohlásit za teplotní snímač PT100. Jedná se tedy o platinový tlustovrstvový meandr na korundové keramice, jehož hlavním parametrem je teplotní součinitel odporu, jehož hodnota činí 3504 ppm/K. V tab. 8 uvedeno srovnání této veličiny se dvěma tenkovrstvými senzory.

Tab. 8: Srovnání senzorů PT100 [20], [21]

	RP 070107-15%	Model 22810	CPT100 SMD 1206
TKR [ppm/K]	3500	3850	3850

Model 22810 je tenkovrstvový platinový odporový senzor v polyimidovém pouzdře určený k přilepení na měřený povrch. Typ CPT100 je tenkovrstvový senzor, v pouzdře SMD 1206 určený k pájení na tištěné obvody (např. tlusté vrstvy).

5.3 Proudová nosnost

Měření proudové nosnosti resinátové pasty bylo provedeno na segmentech č. 4, 6 a 7 na vzorku č. 1 přichycením svorek od proudového zdroje na vodivé plošky. Na obr. 5.2 je vidět měření na segmentu č. 4. Průchodem proudu skrz vrstvu z resinátové pasty dochází k teplotnímu namáhání keramiky tloušťky 0.25 mm a jejímu zlomení uprostřed vrstvy.

Obr. 5.2: Tepelné záření a prasknutí podložky vlivem vysoké teploty

V tab. 9 jsou shrnuty výstupy z měření. Na základě obr. 4.6 je tloušťka vrstvy zvolena orientačně 0.5 µm, její skutečná velikost však bude nižší vzhledem ke členitosti vrstvy. Proudová hustota J je pak definována jako proud I tekoucí vrstvou vztažený na plochu průřezu S vrstvy.

Tab. 9: Měření mezní dosažitelné proudové hustoty

Segment	**4**	**6**	**7**
Šířka vrstvy - w [mm]	2	10	4
Tloušťka vrstvy - t [µm]	0,5	0,5	0,5
Plocha průřezu - S [µm^2]	1000	5000	2000
Napětí - U [V]	6,4	3,2	3,4
Proud - I [A]	1,6	3	2,8
Proudová hustota - J [mA·µm^{-2}]	**1,6**	**0,6**	**1,4**

Výpočet plochy průřezu pro segment č. 4:

$$S = w \cdot t = 2mm \cdot 0{,}5\mu m = 1000\mu m^2$$

Výpočet proudové hustoty pro segment č. 4:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{1{,}6A}{1000\mu m^2} = 1{,}6mA \cdot \mu m^{-2}$$

Měření na segmentu č. 6 i 7 bylo provedeno s přichycenou podložkou a přiloženou kovovou lištou pro odvádění tepla (obr. 5.3). Tentokrát k viditelnému rozžhavení materiálu nedošlo, podložka praskla opět uprostřed vrstvy.

Obr. 5.3: Měření proudové nosnosti na segmentu č. 7

Mezní dosažená proudová hustota struktury se pohybuje okolo hodnoty 1 mA na 1 µm^2, což teoreticky odpovídá hodnotě 1 kA na 1 mm^2. Tato veličina je závislá na rozměrech keramické podložky, a to tak, že u menších rozměrů dochází k menšímu pnutí než u větších rozměrů. Tento předpoklad potvrzuje fakt, že dosažená proudová hustota je nižší u segmentu č. 6, který měl během měření proudové nosnosti podložku přibližně dvojnásobného obsahu plochy než podložka se segmenty č. 4 a 7.

6 ZÁVĚR

Resinátová pasta je speciální typ tlustovrstvové pasty, jenž je díky svému složení charakteristická svou náročností na techniku sítotisku a specifickými podmínkami sušení. Postup výroby tlusté vrstvy obvyklý pro standardní typy past je pro pasty resinátové nevhodný. Po výpalu je vrstva rozpraskaná, nebo má jiné vady. Byl proto zadán úkol optimalizovat proces výroby tak, aby výsledné provedení vrstvy bylo dostatečně kvalitní.

Pro účely práce byl navržen testovací motiv pro ovrstvení síta, který obsahuje motivy pro zjištění plošného odporu pasty, teplotního součinitele odporu a tiskového rozlišení. Na základě této topologie byly realizovány 2 síta s motivy pro vrstvu resinátou a vodivou.

Jádro diplomové práce tvoří samotná výroba tlusté vrstvy na podložce z korundové keramiky, jejímž úspěšným předpokladem je zvládnutí obsluhy a ladění parametrů sítotiskového poloautomatu do té míry, že se podaří rovnoměrné natisknutí mokré vrstvy do tloušťky 35µm. Byl proto vypracován postup, s jakým lze tohoto požadavku dosáhnout. Nesplnění výše uvedeného má za následek žádné, částečné nebo neúplné uchycení pasty na substrát během výpalu. Dalším zásadním problémem bylo praskání vrstev během sušení, který vyřešilo až používání ohřevné desky namísto horkovzdušné pece.

Realizace tlusté vrstvy (příprava, sítotisk, sušení, výpal) může trvat i 2,5 hodiny a zmíněné problémy se samozřejmě vyskytovaly současně. Bylo proto časově náročné je diverzifikovat, najít konkrétní příčiny a stanovit postup k jejich odstranění.

S tiskem souvisí i volba motivu. Návrh odporových meandrů se šířkou čar 1mm lze vyhodnotit jako nevhodný. Jednodušší se jeví tisk čar o šířce 150-250µm. Stejně tak tisk čtvercových a obdélníkových útvarů nečinil významnější obtíže, pouze jejich zařazení do topologie s tenkými čarami nelze doporučit.

Zkoumáním vzorků v elektronovém mikroskopu se ukázalo, že vyrobená vrstva má maximální tloušťku 500nm, je nedokonale souvislá, vzniká krystalizací nanočástic platiny a ve vrstvě se nachází residua organického pojiva. Další směr výzkumu by se mohl ubírat směrem k adhezi zmíněné vrstvy k podložce. Šířky čáry 120µm se dařilo dosáhnout bez obtíží.

Na základě výsledků měření se dá konstatovat, že závislost odporu na teplotě prověřované pasty je lineární, plošný odpor velmi závisí na kvalitě provedení výrobků a mezní dosažená proudová hustota struktury vykazuje velmi vysoké hodnoty.

SEZNAM LITERATURY

[1] SZENDIUCH, I. *Mikroelektronika a technologie součástek*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2009, 190 s. ISBN 9788021439603.

[2] SZENDIUCH, I. *Mikroelektronika a technologie součástek: Laboratorní cvičení*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 73 s.

[3] STARÝ, J. *Montážní a propojovací technologie*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 262 s.

[4] *ADÁMEK, M. Moderní technologie elektronických obvodů a systémů: Laboratorní cvičení – teplotní koeficient odporu LN01_Lab4_TKR*

[5] SZENDIUCH, I. Tlusté vrstvy. Online dostupné z http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf

[6] HILL, Mcgraw. *Handbook of thick film hybrid microelectronics: a practical sourcebook for designers, fabricators, and users*. Editor Charles A Harper. New York,: McGraw-Hill, 1974, ISBN 00-702-6680-8.

[7] Datasheet k produktu *Cermet platinum conductor*. [cit. 2013-12-17] Online dostupné z http://www.electroscience.com/pdf/5545.pdf

[8] Datasheet k produktu *Platinum resinate paste*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://heraeus-hickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/resinates/RP_070107-15pctPt_151211.pdf

[9] BURŠÍK, M. *Mikroelektronika a technologie součástek, laboratorní cvičení: L02-Měření vrstvového odporu.*

[10] SZENDIUCH, I. *Mikroelektronika a technologie součástek. Přednáška 01*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-01A-BMTS_%C3%BAvod_n%C3%A1vrh%20HIO(Bc).pdf

[11] Datasheet k produktu *Gold resinate paste*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/resinates/RP_20003-330-15.pdf

[12] Datasheet k produktu *Platinum metallo-organic conductor*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://www.electroscience.com/pdf/5051.pdf

[13] Datasheet k produktu *Gold metallo-organic conductor*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://www.electroscience.com/pdf/8081-A.pdf

[14] Datasheet k produktu *Platinum resinate paste*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/resinates/B_3745-2AuPt_071211.pdf

[15] Datasheet k produktu *Silver resinate paste*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/resinates/RP_Ag_080310_151211.pdf

[16] Datasheet k produktu *Gold resinate paste*. [cit. 2013-12-17]. Online dostupné z http://heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/resinates/RP_Au_080910_22pct_300112.pdf

[17] HROMADKA, K., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., DŽUGAN, T., KRPAL, O. *Diagnostic of printed resinate paste*. In *Diagnostika '11*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 13-16. ISBN: 978-80-261-0020-1

[18] HEJÁTKOVÁ, E., ADÁMEK, M., ŠTEKOVIČ, M. *Realizace hybridních integrovaných obvodů.* Laboratorní úloha č. 1, BMTS – Mikroelektronika a technologie součástek

[19] SOUKUP, R., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J. *Technical Challenges of Screen Printing Deposition for Ultra-fine Patterns.* Článek z ElectroScope, číslo III, ročník 2011. Online dostupné z http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2011/Cislo3_2011/r5c4c7.pdf

[20] Datasheet k produktu *PT100 Model 22810*. [cit. 2014-05-26]. Online dostupné z http://html.alldatasheet.com/html-pdf/157816/RHOPOINT/PT100/382/1/PT100.html

[21] Datasheet k produktu *CPT100 SMD 1206*. [cit. 2014-05-26]. Online dostupné z http://html.alldatasheet.com/html-pdf/325092/RHOPOINT/51206902/385/1/51206902.html

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Sled operací při postupu vytváření TLV....8
Obr. 1.2: Pasta na substrátu po výpalu – převzato z [5]....11
Obr. 1.3: Mikroskopická struktura vrstvy po výpalu cermetové pasty....12
Obr. 1.4: Mikroskopická struktura vrstvy po výpalu resinátové pasty....12
Obr. 2.1: Řez TLV vrstvou – převzato z [10]....17
Obr. 2.2: Motivy pro 50Ω, 70Ω a 100Ω TLV odpor – segment č. 1, 2 a 3....17
Obr. 2.3: Přípravek pro měření odporu čtyřbodovou metodou....18
Obr. 2.4: Model měření vrstvového odporu čtyřbodovou metodou - charakter homogenního pole....19
Obr. 2.5: Motivy TLV odporu a kontaktních plošek....20
Obr. 2.6: Motiv pro zjištění rozlišení tisku čára - mezera....21
Obr. 2.7: Výsledný motiv....21
Obr. 3.1: Princip sítotisku [5]....22
Obr. 3.2: Tkanina a její parametry [5]....23
Obr. 3.3: Snímek síta z optického mikroskopu - motiv pro rozlišení....25
Obr. 3.4: Sítotiskový poloautomat Aurel C880....25
Obr. 3.5: Posuvné těleso těrky umístěné na rameni....26
Obr. 3.6: Vzorky po výpalu – velká tloušťka natištěné mokré vrstvy....27
Obr. 3.7: Obrázek vrstvy z optického mikroskopu okamžitě po tisku....28
Obr. 3.8: Průběh levelingu v čase t=20s....28
Obr. 3.9: Průběh levelingu v čase t=60s....28
Obr. 3.10: Nerovnoměrně natištěná mokrá vrstva....30
Obr. 3.11: Vzorek s nerovnoměrnou vrstvou (z obr. 3.10) po výpalu....30
Obr. 3.12: Vzorek vybraný k natisknutí 2. vrstvy....31
Obr. 3.13: Vzorek s dvojitou vrstvou....31
Obr. 3.14: Detail přetisknuté vrstvy....31
Obr. 3.15: Užší čáry způsobené nastavením parametrů sítotisku....32
Obr. 3.16: Širší čáry způsobené nastavením parametrů sítotisku....32
Obr. 3.17: Rozhraní substrát – resinátová pasta....33

Obr. 3.18: Vzorek s plazmaticky vyčištěným substrátem 34
Obr. 3.19: Vzorek se substrátem SITAL 34
Obr. 3.20: Testovací vzorek č. 1 35
Obr. 3.21: Testovací vzorek č. 2 35
Obr. 3.22: Rozpraskaný povrch – snímek z optického mikroskopu 36
Obr. 3.23: Rozpraskaný povrch – snímek z elektronového mikroskopu 36
Obr. 3.24: Praskliny po vysušení vzorku.....37
Obr. 3.25: Zmenšený výskyt prasklin po sušení 37
Obr. 3.26: ERSA Heating-Plate 38
Obr. 3.27: Profil výpalu in-line pece [18] 38
Obr. 3.28: Kompletní testovací vzorek č. 1 39
Obr. 3.29: Kompletní testovací vzorek č. 2 39
Obr. 3.30: Segment č. 7 s vodivou vrstvou.....40
Obr. 4.1: Příklady rovnoměrných kompaktních vrstev 41
Obr. 4.2: Ukázka struktury resinátové pasty po výpalu – scintilační detektor 41
Obr. 4.3: Ukázka struktury resinátové pasty po výpalu - diodový detektor.....42
Obr. 4.4: Mapa rozložení prvků ve vzorku.....43
Obr. 4.5: Rozhraní resinátová Pt vrstva - vodivá Ag vrstva (v úhlu pozorování 52°) 44
Obr. 4.6: Řez jontovým paprskem – jedna vrstva.....45
Obr. 4.7: Řez jontovým paprskem – dvě vrstvy 45
Obr. 4.8: Šířky čar.....46
Obr. 5.1: Teplotní závislost odporu resinátové pasty R=f(T) pro různé hodnoty odporů 49
Obr. 5.2: Tepelné záření a prasknutí podložky vlivem vysoké teploty.....51
Obr. 5.3: Měření proudové nosnosti na segmentu č. 7.....52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Parametry substrátu 96 % Al_2O_3. 9

Tab. 2: Srovnání hlavních parametrů past a podmínek výpalu dodavatelů ElectroScience a Heraeus, pasta cermetová a resinátové [7], [8], [11], [12], [13] 14

Tab. 3: Parametry resinátových past [14], [15], [16] 15

Tab. 4: Zastoupení prvků ve vzorku (při energii primárního svazku 25keV) 43

Tab. 5: Měření plošného odporu na neohraničené odporové oblasti 47

Tab. 6: Měření plošného odporu na ohraničené odporové oblasti 48

Tab. 7: Změřené hodnoty odporů při teplotě 23°C a vypočtené hodnoty TKR.....50

Tab. 8: Srovnání senzorů PT100 [20], [21] 51

Tab. 9: Měření mezní dosažitelné proudové hustoty 52

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Předloha pro resinátovou vrstvu 59

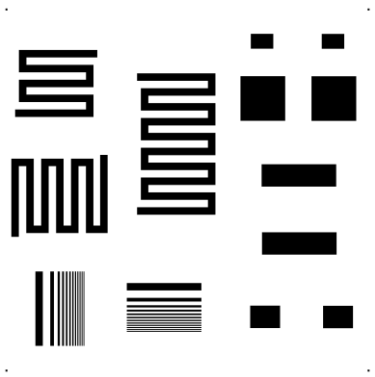
Příloha B Předloha pro vodivou vrstvu 59

Příloha C Technický list pasty RP 070107-15% 60

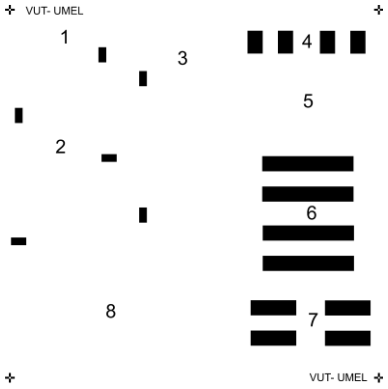
Příloha D Technický list pasty AG CSP-1381 62

Příloha E Energiové spektrum prvků 63

Příloha A Předloha pro resinátovou vrstvu



Příloha B Předloha pro vodivou vrstvu



Příloha C Technický list pasty RP 070107-15%

Heraeus

Resinates

RP 070107 - 15%

Platinum Resinate Paste / DPIS*

* Development Product Information Sheet

Description
RP 070107-15% is a thin film conductor paste for use on alumina and glazed alumina. RP 070107-15% contains platinum and a small amount of non-precious metals in form of soluble organo metallic compounds.

After firing a conducting platinum film is obtained. Due to simultaneous sintering of non-precious metal oxides RP 070107-15% offers a high adhesion on above mentioned substrates.

To reach higher film thicknesses it is necessary to print several layers on top of each other. Each applied layer has to be fired separately.

Key Benefits
- Free of lead, cadmium and nickel
- Free of phthalate
- REACH [3] and RoHS [4] compliant

Processing
1. Spatulate well prior to processing. When stored in a refrigerator allow paste to come to room temperature prior to opening, to avoid condensation.
2. Print through a 300 - 350 mesh stainless steel screen with an emulsion thickness of 15 - 20 µm.
3. Let the print settle at room temperature for 10 minutes.
4. Dry at 90 °C for 15 minutes. Do not exceed peak of 130 °C.
5. Fire at 850 °C (peak) for 7 - 10 minutes and with a total firing cycle time of 40 - 60 minutes.

Thinner HVS 100

Typical Properties (Paste)

Form:	Thixotropic paste
Viscosity:	40 - 60 Pas (20 °C, D = 205 sec^{-1})
Solid Content:	15.3 ± 0.75 %
Printing Speed:	Up to at least 10 cm/s
Coverage: (325 mesh screen)	Approx. 500 cm^2 / g (FFT at 0.4 µm)
Shelf life:	6 months from date of shipment with correct storage (in a dry, cool (5 - 25 °C) and dark place with container tightly shut)

Typical Properties (Fired) [1]

Fired Film Thickness [2]: (FFT)	0.1 - 0.3 µm
Line Definition:	≥ 130 µm (width and space)
Resistivity (25 °C) [2]:	0.8 - 1.2 Ω/□ (DFT [5]: 10 µm)
HTCR [6] (25 - 125 °C)	3300 – 3450 ppm/K

Heraeus

Resinates

RP 070107 - 15%

Platinum Resinate Paste / DPIS*

* Development Product Information Sheet

1 Typical properties based on laboratory test methods. For optimum results all materials should be fired in a profiled furnace supplied with dried, hydrocarbon and other contaminant free air (PP-1).

2 Measured on alumina 96% after printing with a 325 mesh steel screen; thickness of screen and emulsion combined was c. 15 µm, and the resultant printed track was 500 µm wide.

3 REACH compliant according to the Commission Regulation (EU) No 143/2011 of 17 February 2011 amending Annex XIV to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals ("REACH") by European Chemicals Agency and its subsequent amendments; we define a material as REACH compliant, as long as substances used are not recorded in the Annex XIV.

4 RoHS compliant according to the Directives (European Union) No 2011/65/EC of Restriction of Hazardous Substances ("RoHS") and its subsequent amendments (including the exceptions No. 7. c. I of the EU Directive e.g. related to Pb)

5 DFT: Dried Film Thickness; FFT: Fired Film Thickness

6 HTCR: Hot Temperature Coefficient of Resistance

The descriptions and engineering data shown here have been compiled by Heraeus using commonly-accepted procedures, in conjunction with modern testing equipment, and have been compiled as according to the latest factual knowledge in our possession. The information was up-to date on the date this document was printed (latest versions can always be supplied upon request). Although the data is considered accurate, we cannot guarantee accuracy, the results obtained from its use, or any patent infringement resulting from its use (unless this is contractually and explicitly agreed in writing, in advance). The data is supplied on the condition that the user shall conduct tests to determine materials suitability for a particular application.

Europe [TH]
Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG
Thick Film Materials Division
Heraeusstr. 12 – 14
63450 Hanau
Germany
Tel: +49 (6181) 35 – 5466
E-Mail: th-info@heraeus.com
Internet: www.heraeus-thickfilm.com

Americas [TH]
Heraeus Materials Technology LLC
Thick Film Materials Division
24 Union Hill Road
W. Conshohocken, PA 19428
USA
Tel: +1 (610) 825 – 6050
E-Mail: techservice.hcd@heraeus.com
Internet: www.heraeus-thickfilm.com

Asia [TH]
Heraeus Materials Technology Shanghai Ltd.
No. 1 Guang Zhong Road
Zhuanquiao Town, Minhang District
201108 Shanghai
People's Republic of China
Tel: +86 (21) 3357 - 5688
E-Mail: th.hmts@heraeus.com
Internet: www.heraeus-thickfilm.com

Příloha D Technický list pasty AG CSP-1381

CSC
Thick film Materials

Silver Paste : CSP-1381

Description

This product is designed as a screen Printing electrode paste for ceramic antenna.

Main feature

1. This product has very good printing characteristics because of its uniform dispersion of inorganic powder in the organic binder.
2. The structure of fired silver is very dense and of high surface hardness.
3. The adhesion to the ceramic is excellent.
4. The special feature of this paste is its high solder resistance because of the specialized design of the silver powder and glass frit(Pb-free).

Specification

Item	Unit	Spec.
Solid content	wt%	83±2
Viscosity*	Pa•s	200±20
T.I.**	-	2.4±0.3
F.O.G.	㎛	< 5
Specific Gravity	g/cc	3.8±0.2

* Brookfield HBDV II + #14(@25℃, 10 rpm)
* Can be specified freely
** viscosity @10rpm/viscosity @100rpm

Application

Thinning

In order to reduce viscosity, small amount of acetate solvent is added.

Printing

Stainless steel screen (Mesh #200-#325) can be used.

Drying

Drying temperature is below 150~180℃ for 10~15minutes.

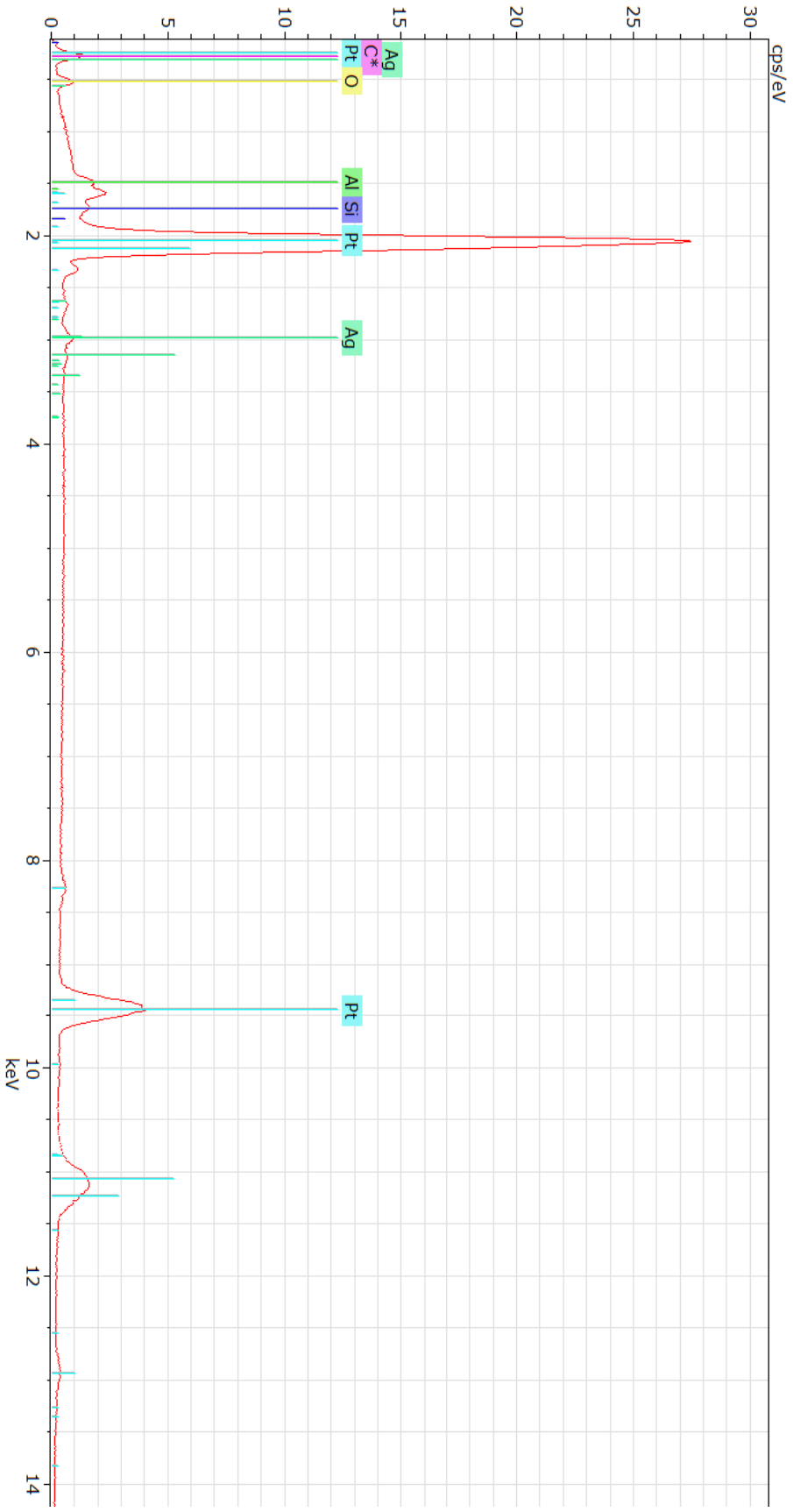
Firing

Firing should be accomplished at 800~850℃ in air atmosphere furnace for 10~15 minutes.

Storage & Shelf Life

The paste should be stored in a cool and dry place away from direct sunlight at a temperature not exceeding 5℃.

The shelf life is 6 months from its manufacturing in case of keeping at our recommended storage condition.

Head Office : 11-9, Namdong Industrial Area, Namdong-Gu, Incheon, Korea Tel) 032-450-8700, Fax) 032-812-8779
Seoul Office : #303, Kukjae Bldg, 127-1, Nonhyun-Dong, Kangnam-Gu, Seoul, Korea Tel) 02-512-3211-3, Fax) 02-512-3214

Příloha E Energiové spektrum prvků